Analyse de la robustesse et des améliorations potentielles du protocole RadioFréquences Sub-GHz KNX utilisé pour l'IoT domotique

Salma Oudji

▶ **To cite this version:**

Salma Oudji. Analyse de la robustesse et des améliorations potentielles du protocole RadioFréquences Sub-GHz KNX utilisé pour l'IoT domotique. Electronique. Université de Limoges, 2016. Français. NNT : 2016LIMO0121 . tel-01467429v2

HAL Id: tel-01467429

https://theses.hal.science/tel-01467429v2

Submitted on 28 Mar 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Thèse de doctorat

Université de Limoges

Ecole Doctorale n°521 Sciences et Ingénierie de l'Information

Laboratoire Xlim – RESYST UMR CNRS 7252

Thèse

pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE LIMOGES

Discipline : Electronique des Hautes Fréquences, Photonique et Systèmes

Présentée et soutenue par

Salma OUDJI

Le 12/12/2016

Analyse de la robustesse et des améliorations potentielles du protocole RadioFréquences Sub-GHz KNX utilisé pour l'IoT domotique

Thèse dirigée par Vahid MEGHDADI et Stanis COURREGES (responsable industriel)

JURY :

M. Benoit GELLER	Professeur, ENSTA ParisTech	Président du jury
Mme. Atika RIVENQ	Professeure, Université de Valenciennes	Rapporteur
M. Samir SAOUDI	Professeur, TELECOM Bretagne	Rapporteur
M. Stanis COURREGES	Pilote de compétences Radiofréquences et Connectivité, Hager Controls	Examinateur
M. Vahid Meghdadi	Professeur, Université de Limoges	Examinateur
M. Jean-Pierre Cances	Professeur, Université de Limoges	Examinateur
M. Christophe FOURTET	Directeur scientifique et co-fondateur, SIGFOX	Examinateur
M. Olivier PAJONA	Directeur technique, Ethertronics	Examinateur

BY-NC-ND

A mes parents, ma sœur et mon frère.

BY-NC-ND

“I believe that everything happens for a reason. People change so that you can learn to let go, things go wrong so that you appreciate them when they're right, you believe lies so you eventually learn to trust no one but yourself, and sometimes good things fall apart so better things can fall together.”

— Marylin Monroe

BY-NC-ND

Remerciements

Je remercie très chaleureusement mes directeurs de thèse, Vahid MEGHDADI et Stanis COURREGES, qui ont su diriger mes travaux avec beaucoup de disponibilité, de tact et d'intérêt. Je les remercie pour leur patience et bienveillance tout au long de ces trois années. Ils n'ont ménagé ni leurs commentaires, toujours judicieux et rigoureux, ni leurs encouragements. Qu'ils trouvent ici l'expression de ma profonde gratitude.

J'adresse également mes remerciements à Jean-Noël Paillard pour son soutien et sa disponibilité, la qualité de ses analyses et ses conseils.

Je remercie également mes nombreux collègues de bureau qui ont partagé mon quotidien durant cette thèse, au niveau de l'entreprise : Kaoutar, Clément, Jean-Yves, Mickael, Philippe (x3), Daniel (x2), Jérémie, Mélanie, Myriam, Richard, Alexis, Rodolphe, Alexandre…, ainsi qu'au niveau du laboratoire : Ao, Jordan, Asmaa, Karim, Imad, Abraham, Fréjus, Thomas, Jean-pierre, … Je les remercie tous pour leur bonne humeur, leur sympathie et les nombreux échanges qu'on a eu qui ont contribué de quelque manière que ce soit au bon déroulement de ma thèse. Je remercie aussi toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail.

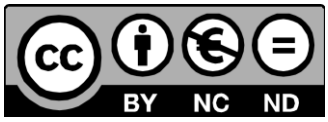
Il convient aussi de remercier l'ensemble des personnes qui ont accepté d'évaluer mes travaux.

Mes derniers remerciements, et non des moindres, s'adressent à mes parents, ma sœur et mon frère qui m'ont toujours accompagné et soutenu dans mes choix. Ils gardent une place de choix dans mon cœur.

BY-NC-ND

Droits d’auteurs

Cette création est mise à disposition selon le Contrat : « **Attribution-Pas d'Utilisation Commerciale-Pas de modification 3.0 France** » disponible en ligne : *http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/fr/*



BY-NC-ND

Table des matières

Thèse de doctorat 1
Analyse de la robustesse et des améliorations potentielles du protocole RadioFréquences Sub-GHz KNX utilisé pour l'IoT domotique 1
Remerciements 4
Droits d'auteurs 5
Table des matières 6
Introduction Générale 9
Chapitre I. Historique du Home & Building Automation et contexte des travaux 16
I.1. Historique et état des lieux 16
I.2. Les exigences normatives européenne pour les standards RadioFréquences 18
I.2.1. Introduction 18
I.3. Les principales caractéristiques d'un système HBA radio 21
I.3.1. La configuration 22
I.3.2. Faible coût par produit / nombre élevé de produits 22
I.3.3. Durée de vie de batterie élevée 22
I.3.4. La portée RadioFréquences 22
I.3.5. La topologie 23
I.3.6. Les taux de perte de trames 23
I.3.7. La latence 24
I.3.8. Longueur de trame, inter-trame et débit binaire 25
I.4. Les interférences 25
I.4.1. Le cadre analytique 25
I.4.2. Le domaine fréquentiel 27
I.4.3. Le domaine temporel 28
I.4.4. Le domaine spatial et la puissance d'émission 28
I.4.5. D'autres paramètres ayant un impact sur la coexistence radio 28
I.4.6. Récapitulatif des paramètres et comportements régissant les interférences 29
I.4.7. Approches pour contourner les interférences 30
I.5. Les intérêts pour l'entreprise 30
I.5.1. Introduction à la problématique 30
I.5.2. Le problème d'interférence dans le contexte des boxs multi-protocolaires 31
I.6. Conclusion 32
Chapitre II. Etat de l'art des technologies utilisées dans les applications du Home & Building Automation 34
II.1. Introduction 34
II.2. Les protocoles HBA filaires 35
II.2.1. LonWorks 35
II.2.2. KNX 36
II.2.3. BACnet 36
II.2.4. Conclusions de la comparaison des protocoles filaires 37
II.3. Les protocoles sans fil RadioFréquences dédiés aux systèmes HBA 39
II.3.1. KNX-RF 41

BY-NC-ND

II.3.2. ZigBee 49
II.3.3. Bluetooth Low Energy (BLE) 57
II.3.4. EnOcean 65
II.3.5. Z-wave 69
II.3.6. SigFox 71
II.3.7. LoRa 77
II.3.8. Conclusions de la comparaison des protocoles RadioFréquences sans fil étudiés et conclusions 82
Chapitre III. Les concepts théoriques fondamentaux de transmission de données, de propagation RF et d'interférences 87
III.1. Les concepts théoriques fondamentaux de transmission de données 87
III.2. Les différents types d'architectures de transceiver pour la transposition de fréquence 90
III.3. Les caractéristiques de bruits internes au transceiver radio : les non-linéarités, le bruit et leur impact sur le signal reçu 94
III.3.1. Le bruit 95
III.3.2. Le bruit de phase 97
III.3.3. La sensibilité 98
III.3.4. Les non-linéarités 98
III.4. Les caractéristiques de bruits externes au transceiver radio : le canal de propagation radio indoor et ses modélisations mathématiques 104
III.4.1. Propagation radio dans l'espace libre 105
III.4.2. Propagation radio dans un environnement indoor 106
III.5. Cas d'application réaliste de l'impact des interférences et du bruit sur la fiabilité d'un système radio: Application sur une box domotique compacte multi-protocoles et multi-profils 111
III.6. Conclusion 114
Chapitre IV. Simulation de la robustesse RadioFréquences de KNX-RF sous MATLAB / Simulink 116
IV.1. Description et validation du modèle élaboré sous MATLAB/Simulink 116
IV.1.1. Première validation du modèle 119
IV.1.2. Mise en place d'un banc de test pour vérifier les résultats de simulation 121
IV.1.3. KNX-RF et d'autres types d'interférence 122
IV.2. Utilisation du modèle pour simuler les interférences dans une box domotique compacte multi-protocoles et multi-applications dans un environnement indoor 124
IV.2.1. Description de la box muti-protocole et du scenario d'application 124
IV.2.2. Description de la problématique d'interférence associée à la box multi-protocolaire 126
IV.2.3. Calcul théorique de probabilité de perte de trames KNX-RF 128
IV.2.4. Les résultats de simulation avec le modèle Matlab / Simulink 131
IV.2.5. Test expérimentaux dans un environnement outdoor 131
IV.2.6. Test expérimentaux dans un environnement indoor 134
IV.3. Conclusion 138
Chapitre V. Simulation de la robustesse RadioFréquences de KNX-RF sous OMNet++ 140
V.1. Présentation du simulateur OMNet++ 140
V.1.1. Description de la structure d'OMNet++ 141
V.1.2. Les différentes extensions (frameworks) de OMNet++ 143
V.2. Description du Framework MiXiM 143
V.2.1. Le module « Node » 144
V.2.2. Le module NIC (Network Interface Card): 144
V.2.3. Le module « Mobility » 146

BY-NC-ND

V.2.4. Le module « Battery » 147
V.2.5. Le module « Connection Manager » 147
V.3. Implémentation du protocole KNX-RF danx MiXiM 148
V.3.1. Présentation générale du modèle simulé 148
V.3.2. Le scénario de simulation 148
V.3.3. La couche Physique 150
V.4. La couche MAC 151
V.4.1. Description de la couche B-MAC disponible sur MiXiM 151
V.4.2. Description du module MAC_KNX_RF implémenté 152
V.5. La topologie étoile 155
V.6. Résultats de simulation d'un scénario de collision de trames KNX-RF 155
V.7. Proposition d'amélioration et validation par le modèle MiXiM 157
V.8. Les propriétés potentiellement améliorables en KNX-RF 158
V.8.1. Les mécanismes de robustesse 158
V.8.2. Sécurité des données 161
V.8.3. Nouvelles applications potentielles pour KNX-RF 161
V.8.4. Le débit 161
V.8.4.1. Augmentation du nombre de bit par symbole de la FSK 162
V.8.4.2. Changement du type de modulation 162
V.8.5. KNX-RF en mode Energy Harvesting 163
V.8.6. KNX-RF en mode Long Range 166
V.9. Conclusion 166
Conclusion générale 169
Références bibliographiques 172
Annexes 180
Annexe 1. Caractéristiques des champs électromagnétiques 181
Annexe 1.1. Caractéristiques générales 181
Annexe 1.2. Composantes du champ 181
Annexe 1.3. Champ lointain 181
Annexe 1.4. Champ proche 185
Annexe 2. Les différents modules et classes qui constituent la couche Physique de MiXiM 186
Glossaire 187
Table des illustrations 191
Table des tableaux 195
Liste des Publications 197

BY-NC-ND

Introduction Générale

L'automatisation des bâtiments Home & Building Automation (HBA) est aujourd'hui plus que jamais au cœur de notre environnement et elle évolue à une vitesse vertigineuse, profitant de toutes les avancées technologiques et surtout de la démocratisation des smartphones et de l'internet des objets. Les bâtiments intelligents répondent aux besoins des personnes en améliorant leur qualité de vie. Pour accroître leur confort, les utilisateurs peuvent par exemple directement piloter les équipements d'éclairage et de chauffage ou alors programmer des scénarios de confort via des interfaces selon leurs habitudes quotidiennes. L'efficacité énergétique est un autre enjeu des bâtiments intelligents[1]. Les travaux de recherche concernant le Smart Grid font d'ailleurs aussi l'objet d'un fort engouement ces dernières années [1]. En effet, la mise en veille des dispositifs de chauffage pendant certains périodes (absences des occupants du bâtiment, changements de la température extérieure) et l'adaptation automatique des ressources électriques en fonction du besoin des consommateurs (autrement dit l'efficacité énergétique active), permettent de réduire le gaspillage d'énergie et faire des économies sur les coûts d'électricité. Il existe également une autre application importante de la domotique qui est la sécurité des personnes. Des équipements dans le bâtiment ont ainsi pour tâches de réagir rapidement aux intrusions et aux situations mettant en danger l'intégrité des individus, mais aussi d'anticiper les situations potentiellement dangereuses. Plus ludique, les équipements du HBA offrent également de nombreuses fonctionnalités en matière de réseau multimédia (audio, vidéo, médiacenter, etc.). Enfin, ces systèmes ne bénéficient pas seulement aux personnes autonomes, mais aussi aux personnes à autonomie réduite comme les handicapés et les personnes âgées. Sur ce dernier point, l'augmentation du nombre de personnes âgées causée par le vieillissement de la population a un impact social et économique considérable au sein de la société. Cela représente donc une véritable opportunité pour les acteurs du secteur du HBA. Grâce à des systèmes intelligents, les personnes dépendantes ou en perte d'autonomie peuvent recevoir des alertes pour prendre leurs médicaments, communiquer plus facilement avec des personnes de l'extérieur ou encore alerter automatiquement les services d'urgence en cas d'accident. La Figure 0-I-1 montre des estimations sur le chiffre d'affaire que générera le secteur de la domotique en Europe d'ici 2020 et la part qu'occuperont les différentes applications citées précédemment dans le marché [1]. En 2015, ce chiffre a atteint 1,8 millions de dollars, et il devrait connaître un taux annuel de croissance de 38%, qui entrainerait un chiffre d'affaire de 10190 millions de dollars à l'horizon 2020, soit une augmentation de 465 % en 5 ans entre 2015 et 2020.

[1] S. Oudji, S. Courrèges, J.N. Paillard, P. Magneron, V. Meghdadi, C. Brauers and R. Kays, « Radiofrequency Interconnection between Smart Grid and Smart Meters Using KNX-RF and 2,4 GHz Standard Protocols for Efficient Home Automation Applications », dans Journal of Communications, Volume 10, Numéro 10, pages 812-820, Octobre 2015, et dans 5th International Workshop on Communications and Smart Grid (IWCSG), Offenburg, 20-23 Octobre 2015.

BY-NC-ND

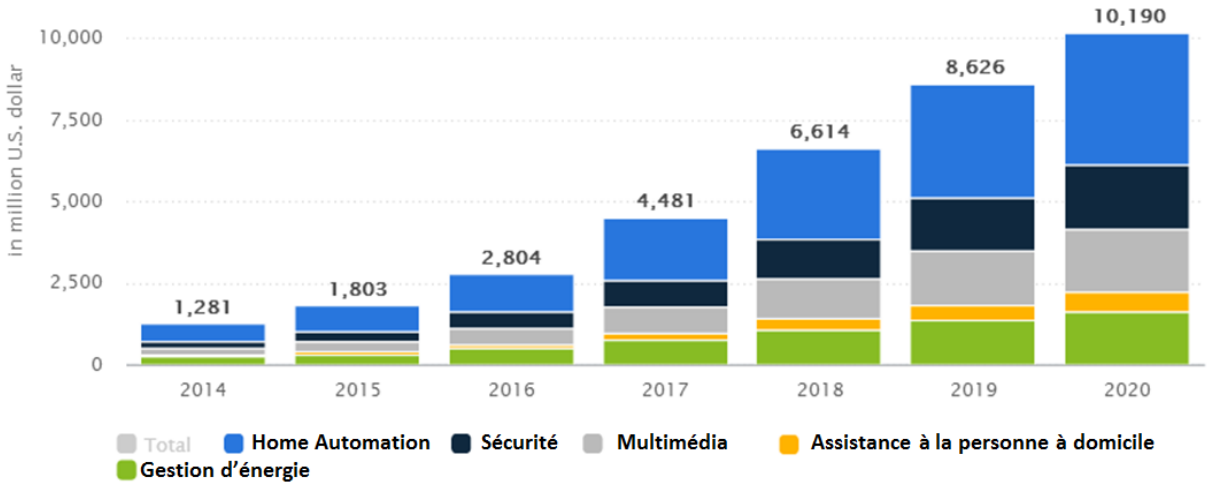


Figure 0-I-1 : Evolution du chiffre d'affaire du secteur de la domotique en Europe. Source [1].

Les investissements des grandes compagnies en recherche et développement, le nombre de plus en plus élevé de startups ainsi que les parts de marché qui ne cessent d'augmenter confirment cette montée en puissance du HBA. Par ailleurs, les produits semblent devenir à la portée de tout le monde grâce notamment à la production de masse, aux nouveaux services d'abonnements proposés aux clients, mais aussi à de plus en plus de personnes adeptes des objets connectés qui n'hésitent pas à investir dans les solutions du HBA pour améliorer leur quotidien et celui de leurs proches.

Comme son nom l'indique, dans le Home & Building Automation, il ne s'agit pas seulement de maisons intelligentes « domotique », mais aussi de bâtiments intelligents, ou ce que l'on appelle « immotique ». Cette dernière concerne les grands bâtiments, immeubles et les grands sites industriels et tertiaires. Avec l'évolution des technologies du HBA, il est devenu difficile de distinguer la barrière entre la domotique et l'immotique qui utilisent, en général, les mêmes équipements et produits. Cependant, des différences existent bien entre les deux comme le montre le Tableau 0-I-1.

La domotique et l'immotique toutes deux promettent le confort, l'efficacité énergétique, les soins de santé et la sécurité. Dans le reste de ce manuscrit et par souci de simplicité, le terme « domotique » fera références aussi bien à la domotique qu'à l'immotique. Pour réaliser les fonctions d'automatisation du bâtiment, des capteurs (température, humidité, mouvement, lumière), des actionneurs (interrupteurs, vannes motorisées, thermostats), des dispositifs de contrôle (interface IHM, télécommande, applications Smartphone) et éventuellement une unité centrale de commande sont utilisés. Ces composants communiquent entre eux grâce à des protocoles universels ou propriétaires. Selon le protocole, différents supports de transmission filaire (pair torsadées : TP, courants porteurs en ligne : CPL, Ethernet : IP) et sans fil (RadioFréquences et infrarouge) sont utilisés. Les deux modes de transmissions sont compatibles avec l'usage de coupleur de média, mais ne conviennent pas à toutes les constructions, ni à toutes les utilisations.

BY-NC-ND

Tableau 0-I-1 : Les différences entre la domotique (Home Automation) et l'immotique (Building Automation)

Description	Home automation	Building automation
Type de bâtiment	Maison familiale	Grand bâtiment (résidentiel, commercial, tertiaire)
Utilisateurs	Personnes seules, Famille	Personnes nombreuses
Type d'activité	Temps libre, Travaux ménagers	Travaux professionnels, Temps libre
Interface d'opération	User-friendly, imagée et intuitive	Interface IHM professionnelle
Type d'installation	Scénarios variant	Scénarios récurrents et préfixés
Emplacement des produits	Murs en béton / béton armé	Murs en béton / béton armé, faux plafonds, cloisons, étages
Protocoles	Tendance grandissante à utiliser la radio	Base filaire, avec intégration de la radio à petite échelle (usage de coupleurs)

L'étude menée dans cette thèse se focalise essentiellement sur les technologies sans fil RadioFréquences (RF). Dans le passé, les installations domotiques n'étaient basées que sur des solutions filaires. Les systèmes filaires sont installés dans les bâtiments au moment de leur construction et les câbles dédiés au réseau du HBA sont tirés en parallèle du réseau électrique afin de relier tous les équipements (éclairage, chauffage, volets roulants) et les commandes (interrupteurs, interfaces IHM) à un tableau de communication, le plus souvent placé à proximité du tableau électrique. Dans le cas d'une rénovation, le choix se porte généralement sur la mise en place d'un système sans fil car un système réseau filaire serait plus coûteux. En effet, l'utilisation de protocoles de communication sans fil permettent plus de flexibilité, réduisent les coûts d'installation en évitant les chemins de câbles et les goulottes, et nécessitent une planification moins rigoureuse à l'installation. Un autre avantage des systèmes sans fil est qu'ils n'ont pas besoin d'avoir un accès direct à l'installation électrique pour maintenir ou configurer les produits, ce qui n'est pas toujours possible pour certains dispositifs tels que les capteurs extérieurs ou les compteurs de gaz.

Les solutions de transmissions RadioFréquences semblent donc très attractives. Cependant, un niveau de robustesse RadioFréquences suffisant est requis pour l'interconnections des équipements domotiques. Du plus, le protocole standard doit être suffisamment malléable afin de lui permettre d'évoluer vers de nouvelles applications, et suffisamment simple afin de permettre un développement facile et une meilleure démocratisation. Or, un certain nombre de challenges découlent de la nature même du support RF. Pour un même niveau de complexité en termes de design produit, une solution sans fil offre moins de capacité de transmission qu'une solution filaire à cause des limites physiques du canal de propagation radio. De plus, une liaison radio présente des caractéristiques beaucoup moins prévisibles.

BY-NC-ND

Le canal radio indoor est caractérisé par des atténuations entre les équipements, causées par les composants du bâtiment (murs, cloisons, étages, etc.) et les matériaux de construction qui affectent la propagation des ondes électromagnétiques de différentes manières. De plus, les systèmes sans fil doivent faire face à la propagation à trajet multiples causée, entre autres, par le déplacement des personnes à l'intérieur du bâtiment. Cela fait varier la qualité du canal dans le temps ce qui peut impacter les performances des standards sans fil. En outre, à l'heure actuelle, tous les fabricants n'utilisent pas la même technologie et aucune tendance vers un standard de facto n'a eu lieu jusque-là. Les standards présentent des caractéristiques et des paramètres différents, et des avantages et inconvénients spécifiques à chacun en termes de transmission de données physiques sur le canal radio indoor. C'est donc une tâche délicate que de déterminer les performances d'un protocole radio en particulier. En revanche, il y a beaucoup de discussions en cours concernant les performances individuelles des différents standards dans le contexte du Home & Building Automation car de plus en plus de technologies coexistent dans un même environnement, surtout avec la démocratisation de l'internet des objets (Internet of Things : IoT). A l'avenir les canaux radio auront tendance à saturer. Par conséquent, il serait très utile de procéder à une comparaison objective des performances des normes sans fil de l'état de l'art. Les résultats de ce genre d'étude peuvent être analysés dans le but d'identifier d'éventuelles optimisations et de formuler des lignes directives pour la conception de systèmes HBA optimisés et fiables[2].

Les interférences radio présentent un challenge particulièrement ardu pour les systèmes sans fil car les bandes de fréquences ISM (Industriel, Scientifique et Médical) utilisées sont toujours ouvertes aux autres utilisateurs. De plus, les produits sont de plus en plus installés dans des environnements multi-protocoles (standards et propriétaires) et multimédia (i.e. plusieurs supports de transmission). Les installations domotiques avoisinantes qui utilisent le même protocole représentent seulement une petite partie du problème. C'est particulièrement dans ce cadre que s'insère ces travaux de thèse. Le but principal de ces travaux est d'analyser et d'optimiser les performances d'un protocole RadioFréquences en particulier, appelé KNX-RF. Pour ce faire, des outils (simulations et tests) doivent être développés, ce qui a été le principal travail réalisé dans cette thèse. KNX-RF est un standard sub-GHz qui est utilisé pour les applications de Home & Building Automation, ainsi que dans le Smart Grid et les systèmes de sécurité. Pour contourner les interférences, des mécanismes de robustesse radio ont été implémentés dans ce standard. Dans cette thèse, une étude est faite pour analyser la robustesse radio et la fiabilité de KNX-RF [3]. Des scénarios réalistes d'interférences ont été

[2] S. Courrèges, S. Oudji, V. Meghdadi, C. Brauers and R. Kays,« Performance and Interoperability Evaluation of Radiofrequency Home Automation Protocols and Bluetooth Low Energy for Smart Grid and Smart Home Applications », IEEE International Conference on Consumer Electronics, Las Vegas, 8-11 Janvier 2016.

[3] S. Oudji, S. Courrèges, J.-N. Paillard and V. Meghdadi, « Radio Frequency Robustness Study of the KNX-RF-Multi Standard for Home and Building Applications », 11th Wireless Congress: Systems & Applications, Munich, 12-13 November 2014.

BY-NC-ND

simulés à l'aide de logiciels dédiés développés sur MATLAB / Simulink et OMNET++. Des essais expérimentaux ont également été réalisés afin de vérifier les résultats de simulation. Ce document donne ainsi un aperçu général de la robustesse radio de KNX-RF et une méthodologie d'évaluation à travers des mesures et des simulations.

Cette thèse est organisée comme suit. Dans le Chapitre I, le contexte de l'étude sera présenté et un court historique sur le domaine du Home & Building automation sera rappelé. Ensuite, les avantages des solutions sans fil pour les systèmes HBA seront explicités. Les dernières sections de ce premier chapitre seront dédiées aux exigences normatives et règlementaires européennes ainsi qu'aux principales caractéristiques qui régissent les performances et la fiabilité de des systèmes HBA.

Le choix d'une norme est une décision importante dans le développement des produits, de leur production et leur commercialisation. Le Chapitre II introduit les protocoles filaires et de manière plus détaillée les protocoles sans fil RadioFréquences qui sont utilisés en indoor dans le smart home / smart building. Les mécanismes de robustesse implémentés dans chacun de ces protocoles radio pour faire face aux interférences seront identifiés et explicités dans ce chapitre. Ceci permettra de faire une comparaison entre le standard KNX-RF qui nous intéresse et les autres standards communément utilisés sur le marché.

Dans le Chapitre III, la théorie qui décrit le canal RF et les problématiques d'interférence dans les systèmes radio sera présenté. Dans un premier temps, une description du canal de propagation radio sera faite car celui-ci joue un rôle primordial dans la définition et le dimensionnement des communications sans fil en indoor et peut subir des variations à petite et grande échelle qui sont causées par des interférences. Dans un deuxième temps, les phénomènes de non-linéarité seront explicités dans ce chapitre à travers des exemples classiques de signaux à un ton et à deux tons. En effet, les bruits, les harmoniques, la désensibilisation du récepteur, la modulation croisée et les intermodulations sont toutes des conséquences de la non-linéarité des composants du circuit RF et ont un impact direct sur la robustesse RadioFréquences des protocoles

Le Chapitre IV présente le modèle MATLAB/Simulink qui a été développé pour simuler la couche physique de KNX-RF en présence d'interférences sur la même fréquence et les fréquences adjacentes. Les simulations correspondent à des scénarios d'interférences problématiques pour les produits domotiques développés par l'entreprise Hager Controls. Il s'agit là d'étudier les interférences dans un petit écosystème sous forme de box domotique dans lequel des modules de profils et protocoles différents doivent coexister. Ce système étant compact, les modules radio sont placés côte à côte ce qui, parfois, cause des disfonctionnements. Des simulations ont donc été réalisées où les

---

S. Oudji, S. Courrèges, J.-N. Paillard and V. Meghdadi, « Etude de la Robustesse Radio Fréquences du Standard KNX RF-Multi Dédié à la Domotique », 19èmes Journées Nationales Micro-ondes (JNM), Bordeaux, 2-5 Juin 2015.

BY-NC-ND

résultats ont été analysés en termes de diminution de la portée du module sous test en cas d'interférences. Toutes les simulations ont été vérifiées par des tests en rayonnement conduit et en rayonné sur le terrain. Des ajustements ont été apportés au modèle pour obtenir une corrélation avec les simulations et pouvoir exploiter le modèle pour l'analyse d'autres scénarios d'interférences.

Pour compléter les simulations d'interférences réalisées au niveau de la couche physique de KNX-RF avec MATLAB/ Simulink, un autre outil a été développé avec un simulateur de réseaux de capteur sans fil à caractère évènementiel. Ce type de simulateur permet d'étudier le comportement au niveau système des entités du réseau (produits radio), en particulier au niveau de la couche MAC, afin d'évaluer les performances globales du protocole qu'ils utilisent pour communiquer. Dans le Chapitre V, le modèle OMNet++/MiXiM développé pour la simulation du protocole KNX-RF est présenté. Les modifications et les extensions que nous avons apportées aux protocoles de la couche MAC existants sur ce simulateur et qui ont servi de base pour le développement du modèle KNX-RF sont également détaillées. Le scénario d'interférence simulé est décrit et les résultats de simulation sont présentés. Un exemple de solution d'amélioration est ensuite proposé et validé par le modèle. Enfin, ce chapitre aborde les possibilités d'amélioration de KNX-RF, notamment au niveau des couches physiques, MAC et Application.

Le mémoire se termine par une conclusion sur ces travaux. Les perspectives de cette thèse sont présentées au travers d'une identification des possibilités d'améliorations du protocole KNX-RF en termes de sa robustesse radio et de ses futures applications potentielles.

BY-NC-ND

Chapitre I

Historique de la domotique et contexte des travaux

BY-NC-ND

Chapitre I. Historique du Home & Building Automation et contexte des travaux

I.1. Historique et état des lieux

Les premiers développements de la domotique sont apparus au milieu des années 1980 (Figure I-1). Ils sont la conséquence de la miniaturisation des systèmes électroniques et informatiques. La domotique permet la surveillance et le contrôle automatisé d'une maison et de ses équipements. Selon [2], «Une maison intelligente est une application de l'informatique ubiquitaire dans laquelle les équipements de la maison sont contrôlés par l'intelligence ambiante pour fournir des services sensibles au contexte et faciliter le contrôle de la maison à distance ». Selon [3], une maison intelligente est décrite comme «une résidence équipée de système informatique et de technologies de l'information qui anticipent et répondent aux besoins des occupants, et améliore leur confort, la commodité, la sécurité et le divertissement à travers la gestion des technologies au sein de la maison et la gestion des interactions avec le monde extérieur".

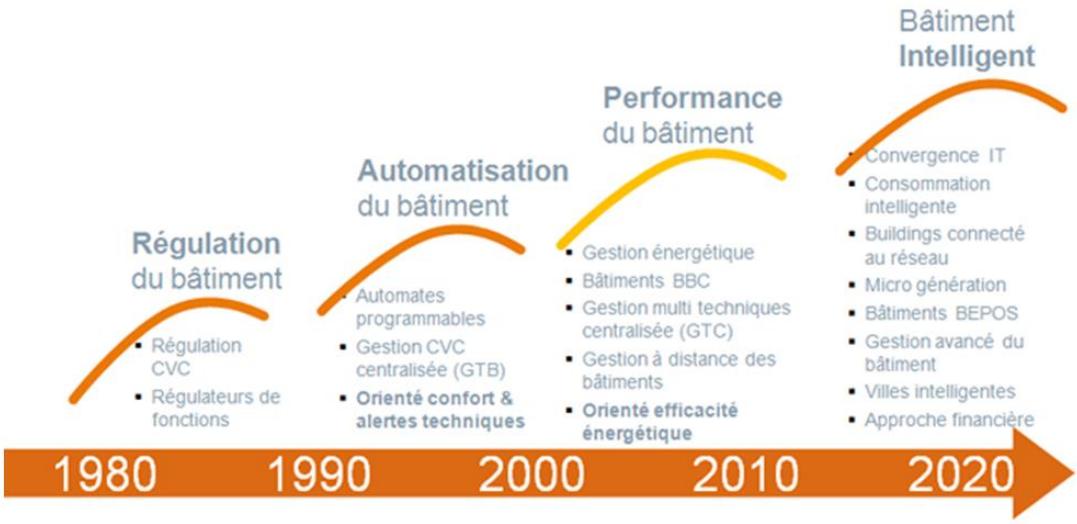


Figure I-1 : Evolution de la domotique dans le temps [4]

L'automatisation des bâtiments est actuellement un secteur en plein essor. Cependant, cet engouement n'a été perçu que ces quelques dernières années. Avant cela, le concept du « smart home / smart building » était bien établi, mais peu de maisons / bâtiments intelligents ont été réellement construits et vendus sur le marché ; ce qui contraste avec le développement fulgurant qu'on prévoyait au départ pour ce secteur. En 1999, Gann et al [5] ont suggéré quelques raisons à ce ralentissement, dont les principales sont :

- L'investissement initial requis par le client est élevé, ce qui limite le marché aux classes moyennes et supérieures ; par ailleurs les acheteurs potentiels doivent d'abord être convaincus des avantages qu'ils tireront de l'installation domotique.
- Avant la percée des systèmes sans fil RadioFréquences, la dépendance sur les logements anciens en Europe signifiait que les fabricants devaient trouver des solutions pour une "modernisation" des

BY-NC-ND

logements existants, ce qui revient plus cher que d'équiper une maison neuve au moment de sa construction [6].

- En raison de l'absence d'un protocole commun, l'industrie des maisons intelligentes en Europe avait tendance à se concentrer sur de simples systèmes de commutation marche-arrêt (push-button) pour des applications simples qui ne nécessitent aucune installation de réseau supplémentaire.
- Les fournisseurs se sont focalisés sur les aspects technologiques et se sont très peu souciés des besoins des utilisateurs qui veulent des systèmes qui les aideront à gérer les tâches quotidiennes, à faire des économies de main-d'œuvre, à faciliter l'utilisation des équipements, à contrôler à distance et faire des réductions d'énergie et de coûts. Jusque-là, il y a eu un véritable gap entre les besoins et exigences du consommateur et les produits disponibles sur le marché.
- Les fabricants ont peu œuvré pour évaluer la facilité d'utilisation de leurs produits. Ce n'est cependant pas une tâche simple à cause de la diversité de la population d'utilisateurs, la variation du contexte d'utilisation, la formation préalable nécessaire des personnes et le challenge qui est d'évaluer des produits qui n'existent pas encore.

Plus récemment, en 2015, la première étude européenne sur la maison connectée a été réalisée par l'organisme « Smart Home Research Group » qui regroupe trois institutions européennes leaders sur le Smart Home. Les données de cette étude proviennent d'une enquête conduite auprès d'un échantillon représentatif de 1 500 consommateurs résidant au Royaume-Uni, en Allemagne et en France [7]. L'étude révèle que la méconnaissance des produits est le principal élément entravant l'achat des produits liés à la domotique : jusqu'à 60% des consommateurs britanniques, 55% des allemands et 49% des français. Le prix demeure l'un des facteurs qui freinent les consommateurs dans leur intention d'achat de produits de la maison connectée. Enfin, jusqu'à 40% ne perçoivent pas encore le bénéfice des produits. L'étude a également montré que quel que soit le pays, pour un tiers des consommateurs, la première motivation à l'achat d'un produit domotique est le souhait d'automatiser la maison. La deuxième motivation est la sécurité, suivie par le souhait de faire une gestion énergétique efficace de la maison.

Une autre étude qui a été réalisée par le cabinet Français indépendant Xerfi, cette fois-ci plus spécifiquement au niveau de la France, révèle que le secteur connaît en ce moment un flagrant bouleversement du jeu concurrentiel [8] :

- Les fabricants d'automatismes et de matériels électriques (ABB, Hager, Delta Dore, Legrand, Somfy, Schneider Electric, etc.) cherchent à conserver leur place de leader historique de la domotique ;
- Les opérateurs de télécommunications (Bouygues Telecom, Orange, SFR) s'appuient sur une forte notoriété et la mise en place de partenariats pour proposer des solutions de domotique avec box «plug & play» ;

BY-NC-ND

- Les géants de l'électronique grand public et d'internet (Apple, Google et Microsoft) se positionnent progressivement comme agrégateurs et distributeurs d'objets connectés via de futures plates-formes dédiées. Ils disposent par ailleurs d'atouts technologiques, marketing et financiers qui les mettent en position de force pour conquérir le marché de la maison intelligente ;
- Les fabricants de produits électroménagers (LG, Sharp, Samsung, etc.) apportent de l'intelligence aux équipements de la maison (réfrigérateur, aspirateur, etc.) mais peinent encore à offrir des solutions intégrées et pratiques ;
- Les prestataires de services énergétiques (EDF, ENGIE, Veolia, etc.) et de sécurité (Europ Assistance) ont également un rôle clé à jouer en tant que prescripteurs de solutions de domotique pour économiser l'énergie et sécuriser les biens.

Toute cette concurrence et les nouveaux besoins des utilisateurs se matérialiseront par davantage d'expansion et de percée pour le secteur du Home & Building Automation, qui franchira probablement une prochaine étape de démocratisation dans les quelques années à venir. En effet, au-delà même du Home & Building Automation, le développement du secteur du Smart Grid conduira à moyen terme au développement de villes intelligentes, ou ce que l'on appelle « Smart Cities » qui consistera à gérer, de manière intelligente, un réseau local et un réseau de distribution d'énergie plus large. Les futures métropoles deviendront des « Smart Cities low-power », capable d'autogérer leurs consommations et leurs productions d'énergie en se basant notamment sur les systèmes du HBA déjà installés au niveau des bâtiments. En revanche, cela posera davantage de problème au niveau de **l'occupation radio et des interférences** à petite et grande échelle au niveau des bâtiments.

I.2. Les exigences normatives européenne pour les standards RadioFréquences

I.2.1. Introduction

Au cours des dernières années, les réseaux sans fil tels que WLAN (Wireless Local Area Network) et WPAN (Wireless Personal Area Network) sont devenus de plus en plus populaires dans les réseaux domotiques [9] (Figure I-2). L'utilisation des réseaux sans fil pour le Home & Building Automation est réglementée en Europe. Certaines bandes de fréquences sont disponibles en Europe [10] mais les règles sont différentes pour d'autres régions du monde comme l'Amérique et l'Asie. En ce qui concerne la région européenne, la gestion des fréquences est aussi organisée au niveau national et peut varier d'un pays à l'autre.

BY-NC-ND

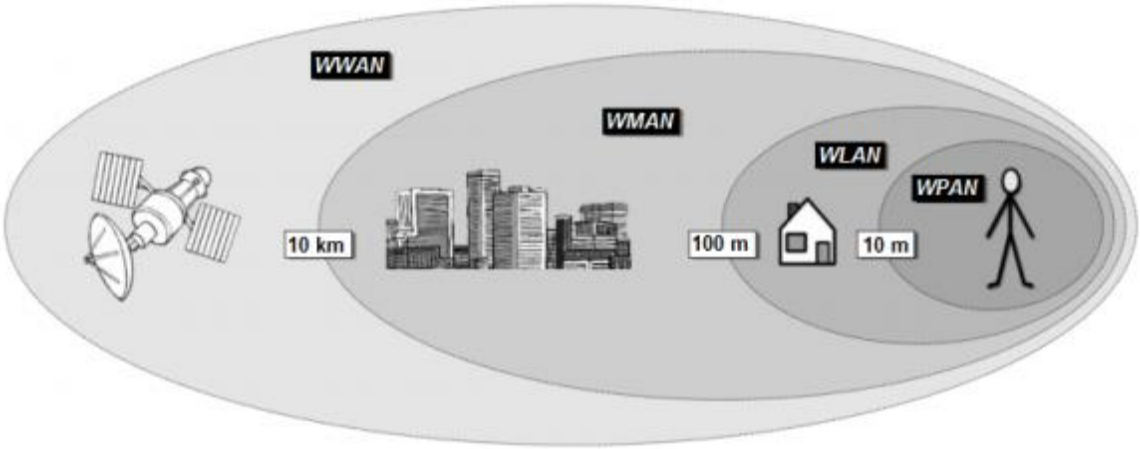


Figure I-2 : Les réseaux sans fil WPAN (personnels), WLAN (locaux), WMAN (métropolitains), WWAN (étendus) et leurs zones de couverture.

En Europe, les technologies HAN (Home Automation Networks) actuelles fonctionnent dans la bande ISM 2,4 GHz et dans les deux bandes de fréquences SRD situées à 433 MHz et 868 MHz. En outre, ces bandes de fréquences sont sous-divisées en petites catégories, et chaque catégorie est caractérisée par des règles individuelles en termes de puissance maximale et d'accès au spectre.

La bande ISM 2,4 GHz comprend une bande passante totale de 83,5 MHz commençant à 2,4 GHz. La bande SRD 868 MHz a quant à elle une largeur de bande de 7 MHz, alors que seulement 1,74 MHz sont alloués à la bande 433 MHz. En ce qui concerne les exigences normatives, les règles spécifiées dans la norme ETSI EN 300 328 sont valables pour la bande 2,4 GHz [11]. Les règles pour les bandes SRD sont spécifiées dans la norme ETSI EN 300 220-1 [12]. En outre, L'ARCEP (Autorité de Régulation des Communications Electroniques et des Postes) formule des exigences dans [13] et [14] pour l'utilisation de ces fréquences en France. Ces documents sont basés sur les normes ETSI, et par conséquent les exigences de base sont identiques.

En termes de puissance rayonnée, tous les systèmes sans fil qui fonctionnent dans la bande 2,4 GHz sont limités à une puissance radio maximale de 100 mW (+ 20 dBm). En plus de cela, d'autres règles sont applicables en fonction de comment le spectre est utilisé. La puissance rayonnée des systèmes qui utilisent la technique d'étalement de spectre par saut de fréquence (FHSS : Frequency Hopping Spread Spectrum) est limitée à 100 mW par 100 kHz de bande passante. Par ailleurs, la puissance rayonnée maximale pour les systèmes qui utilisent des technologies de transmission autres que le FHSS, comme l'étalement de spectre à séquence directe (DSSS : Direct Sequence Spread Spectrum), sont limités à 10 dBm/MHz. Les caractéristiques de FHSS et du DSSS sont introduites et décrites en détail dans le Chapitre II.

Les systèmes opérant dans les bandes SRD 868 MHz doivent respecter un duty-cycle en plus de la puissance maximale d'émission. Le duty-cycle est défini comme étant le rapport de la durée maximale pendant laquelle un dispositif peut émettre durant une heure, par rapport à une période d'une heure ; elle est exprimée en pourcentage. Les systèmes RadioFréquences n'ont pas besoin de respecter

BY-NC-ND

les limitations de duty-cycle d'une certaine bande de fréquences lorsqu'ils utilisent une combinaison du mécanisme d'écoute de canal avant transmission (Listen-Before-Talk : LBT) et d'agilité en fréquence adaptative (AFA : Adaptive Frequency Agility). Quoi qu'il en soit, il est évident que le mécanisme AFA nécessite plusieurs fréquences d'émission. Il convient en outre de noter que les systèmes qui fonctionnent sur un seul canal ont des largeurs de bandes de fréquences très petites, et pour cette raison, ils doivent respecter les limitations de duty-cycle.

Tableau I-1 : Les exigences réglementaires applicables aux bandes 433/868 MHz et 2,4 GHz en Europe [15].

Bande de fréquence [MHz]	**Largeur de bande**	**Espacement des canaux**	**Max. TX EIRP [mW]**	**Densité Spectrale de puissance**	**Duty Cycle et Mécanismes MAC**
433,05-434,04	<250 kHz	-	1,6 (1 mW ERP)	-	100%
	>250 kHz			-13 dBm / 10 kHz	
	-	-	16 (10 mW ERP)	-	10 %
434,04-434,79	<250 kHz	-	1,6 (1 mW ERP)	-	100%
	>250 kHz			-13 dBm / 10 kHz	
	-	-	16 (10 mW ERP)	-	10 %
		< 25 kHz			100%
863,00-865,00	-	-	41 (25 mW ERP)	-	0,1 % ou LBT + AFA
865,00-868,00	-	-	41 (25 mW ERP)	-	1 % ou LBT + AFA
868,00-868,60	-	-	41 (25 mW ERP)	-	1 % ou LBT + AFA
868,70-869,20	-	-	41 (25 mW ERP)	-	0,1 % ou LBT + AFA
869,40-869,65	-	25 kHz ou canal unique	820 (500 mW ERP)	-	10 % ou LBT + AFA
		-	41 (25 mW ERP)		0,1% ou LBT + AFA
869,70-870,00	-	-	41 (25 mW ERP)	-	1 % ou LBT + AFA
			8,2 (5 mW ERP)		100%
2400-2483,6	FHSS DSSS	-	100	100 mW / 100 kHz 10 mW / 1 MHz	< 10% ou LBT

BY-NC-ND

Le Tableau I-1 montre les exigences réglementaires applicables dans les bandes de fréquences ISM ouvertes en Europe. La bande de fréquences SRD 868 MHz est divisée en plusieurs sous-bandes, et le choix des sous-bandes est propre à chaque application. Par conséquent, le Tableau I-1 résume uniquement les informations sur les sous-bandes qui sont utilisées dans les applications du Home & Building Automation.

La plupart des systèmes existants fonctionnent dans la bande de fréquences comprise entre 868 MHz et 870 MHz, comme par exemple les systèmes basés sur le standard IEEE 802.15.4 et KNX-RF, qui seront présentés au Chapitre II. Les exigences en duty-cycle varient entre les différentes sous-bandes. Par exemple, la bande de fréquences comprise entre 869,7 MHz et 870 MHz n'a pas d'exigences de duty-cycle si la puissance rayonnée ne dépasse pas 5 mW. La puissance maximale rayonnée permise dans la plupart des sous-bandes est de 25 mW (+14 dBm). Par ailleurs, une puissance d'émission élevée de 500 mW peut être utilisée dans la bande de fréquences qui commence à 869,4 MHz. Néanmoins, celle-ci est une sous-bande très étroite. De plus, cela ne serait pas raisonnable d'utiliser une telle puissance d'émission élevée pour des produits à faible consommation d'énergie.

En ce qui concerne la bande de fréquences 433 MHz, la puissance rayonnée maximale ne doit pas dépasser 10 mW (+10 dBm). En outre, en fonction de la puissance et de l'espacement des canaux, certaines sous-bandes 433 MHz n'ont aucune exigence par rapport au duty-cycle ; les produits peuvent donc continuellement allouer le spectre. C'est pour cette raison que de nombreux systèmes propriétaires fonctionnent actuellement dans cette bande. Des exemples de tels systèmes sont les stations météorologiques, les sonnettes ou des applications audio sans fil comme les « Babyphones ». Ces systèmes n'ont pas un accès coordonné au canal radio et ils transmettent en continu avec la puissance d'émission maximale pouvant entraîner des interférences significatives. En raison de ce risque de congestion critique, les systèmes opérant sur cette bande de fréquences ne sont pas toujours conformes aux exigences des communications indoor dans le smart home / smart building.

I.3. Les principales caractéristiques d'un système HBA radio

L'utilisation des technologies sans fil offre certes plusieurs avantages mais les équipements doivent répondre à certaines exigences bien spécifiques pour que le système global soit facile d'usage, performant et fiable [16]. Par ailleurs, l'utilisateur s'attend aux mêmes degrés de fiabilité que dans les installations filaires conventionnelles. Par conséquent, le choix de la technologie la plus appropriée va de pair avec une bonne connaissance des exigences. Les critères qui peuvent être évalués sur le plan technique concernent principalement la communication elle-même : Quel est le degré de fiabilité ?, Quels sont les temps de réaction (latences)?, Combien de données peuvent être transférées ?, Quelle est la quantité d'énergie consommée ?, etc. La liste suivante donne un aperçu des caractéristiques les plus importantes dans ce domaine.

BY-NC-ND

I.3.1. La configuration

La première chose à laquelle l'utilisateur sera confronté est la configuration des produits domotiques. Qu'ils soient installés par un habitant ou par un installateur, la procédure de configuration doit être simple. Elle doit également nécessiter un effort limité dans la formation des personnes. Par ailleurs, le rajout de nouveaux produits à un système HBA déjà opérationnel ne devrait poser aucun problème.

I.3.2. Faible coût par produit / nombre élevé de produits

Le nombre de nœuds varie avec la taille des installations et leurs besoins particuliers : maisons, grands immeubles résidentiels contenant plusieurs appartements, bâtiments commerciaux, etc. Des centaines de nœuds peuvent être nécessaires pour assurer l'automatisation du bâtiment. Cependant, le marché exige des performances compétitives avec un faible coût de développement. De plus, les protocoles doivent être capables de s'adapter à un réseau contenant un grand nombre de produits sans perdre en fiabilité système en assurant la bonne livraison des trames de commande.

I.3.3. Durée de vie de batterie élevée [4]

En raison du grand nombre de produits sans fil qu'il peut y avoir dans une installation HBA, avoir à changer ou charger les batteries de chaque produit tous les mois n'est pas pratique. Pour cette raison, les contraintes énergétiques doivent être prises en compte lors de la conception du protocole. Le plus souvent, ce sont les capteurs qui sont soumis aux plus grandes contraintes énergétiques, cependant dans certaines applications comme par exemple le chauffage, les actionneurs peuvent également être limités dans la quantité d'énergie dont ils disposent pour communiquer.

I.3.4. La portée RadioFréquences

Un autre challenge réside dans le fait que les systèmes domotiques peuvent être dispersés sur de grandes surfaces, surtout dans les grands bâtiments. Puisque les émetteurs-récepteurs ne doivent pas consommer beaucoup d'énergie, ils ne peuvent pas toujours avoir une plage de puissance d'émission suffisante pour atteindre directement les actionneurs qui leur sont associés. En outre, un coupleur de média filaire / sans fil n'est pas toujours disponible dans le bâtiment pour des raisons de coût.

[4] S. Oudji, S. Courrèges, J.-N. Paillard and V. Meghdadi," Battery Lifetime Performances of Radiofrequency Systems Using the ISO Standard KNX-RF Multi and Bluetooth Low Energy for Home Automation Applications," IEEE International Conference on Consumer Electronics, Las Vegas, 8-11 Janvier 2016.

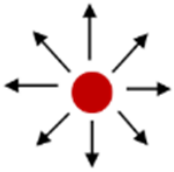
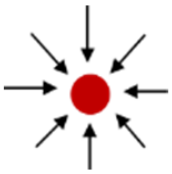
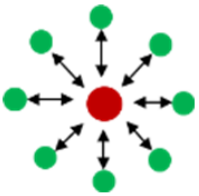
S. Oudji, S. Courrèges, J.-N. Paillard and V. Meghdadi," High Lifetime Performances Of a Full RadioFrequency Battery-Powered System Using the ISO Standard KNX Multi for Home and Building Applications: Heating Systems and Alarms," 12th Wireless Congress: Systems & Applications, Munich, 17-18 November 2015.

BY-NC-ND

I.3.5. La topologie

La topologie du réseau domotique utilisé joue aussi un rôle dans la définition de la portée du système et de sa flexibilité. Les types de nœuds se déclinent en émetteur, récepteurs et émetteur-récepteur. Selon la configuration du réseau, il existe plusieurs façons de faire transiter les données entre les différents nœuds, ce qui mène à différentes topologies de réseau (Tableau I-2).

Tableau I-2 : Topologie des réseaux de capteurs sans fil

	**Réseau Broadcast:** Emission aveugle d'un message en espérant qu'il soit reçu par un autre nœud.
	**Réseau Scanning:** Ecoute permanente de tous les signaux dans la bande de fréquences d'opération du réseau.
	**Réseau Etoile:** Communication dans les deux sens avec un nœud central. Les nœuds périphériques n'échangent pas de données entre eux.
	Réseau Point-à-Point: Connexion bidirectionnelle exclusive. Similaire au réseau étoile mais avec deux nœuds seulement.
	Réseau Maillé: Les messages peuvent transiter d'un nœud à l'autre du réseau en passant par plusieurs nœuds. Ce mode autorise plusieurs chemins et plusieurs sens de transit des données. L'étendue du réseau n'est pas limitée à la portée du nœud central.

I.3.6. Les taux de perte de trames

Parmi les considérations techniques, les contraintes de perte de paquets régissent l'équilibre entre la consommation d'énergie et la portée. En effet, la consommation d'énergie affecte directement le critère précité de durée de vie des batteries. La distance sous laquelle un certain taux maximum de perte de trames peut être garanti dépend essentiellement de la puissance d'émission. Celle-ci peut être augmentée (en respectant les limitations normatives) au prix de l'augmentation de la consommation d'énergie et par conséquent de la réduction de la durée de vie du produit.

BY-NC-ND

Le taux de perte de paquet (PER : Packet Error Rate) est le premier critère de fiabilité dans une liaison radio si celle-ci comporte des données importantes. Quelques pertes de trames par mois conduiront l'utilisateur à percevoir le système comme n'étant pas fiable, surtout si celles-ci comportent des données importantes. En revanche, quelques pertes de trames par an sembleront acceptables pour l'utilisateur comparé à la fiabilité usuelle des équipements dans une maison conventionnelle (filaire). Cela inclut les retransmissions de trames car ce qui compte au final c'est que la commande aboutisse au récepteur ciblé. Les applications où une perte de trame est rapidement remarquée par l'utilisateur doit avoir un faible PER ($\leq 10^{-3}$).

Les applications de sécurité ont des contraintes de fiabilité encore plus strictes à cause de l'importance et du caractère critique des informations transmises. Le PER dans ces applications est de l'ordre de 10^{-6}. Dans le domaine de l'éclairage, un variateur utilise des trames plus courtes que celles utilisées par un interrupteur, mais tous les deux ont les mêmes contraintes en termes de PER. Cela s'explique par le fait qu'un variateur transmet plusieurs trames consécutives pour ajuster l'intensité de la lumière, ce qui implique que les trames perdues peuvent être masquées par les trames reçues suivantes, compensant ainsi les pertes antérieures.

Concernant les applications du Metering (Smart Grid), les trames d'informations ou mise à jour arrivent de façon systématique et périodique sans que l'utilisateur n'intervienne. La perte de paquets est donc négligeable tant que le paquet est régulièrement reçu. Le PER est de l'ordre de $PER \leq 10^{-2}$.

Les systèmes HVAC (Central Heating Ventilation and Air-Conditioning) sont des systèmes à grande inertie avec des latences fortes, par conséquent les trames perdues ne sont pas immédiatement remarquées par l'utilisateur. Si l'on prend l'exemple d'une application de chauffage, le contrôle de température d'une pièce via un thermostat peut se faire soit manuellement soit automatiquement. Dans le cas où c'est automatique, les trames sont envoyées périodiquement vers les actionneurs associés (e.g. vanne de chauffage) pour maintenir la consigne de température. Une perte de trame dans ce scénario se traduira par un retard dans l'ajustement de température, ce qui ne sera pratiquement pas ressenti par l'utilisateur étant donné la lenteur inhérente du changement de température dans une pièce. Dans le cas où c'est manuel, la transmission de trames se fait de façon ponctuelle sur action de l'utilisateur. Le nombre de trames transmises est donc à la base négligeable, il en découle que le PER serait aussi négligeable.

I.3.7. La latence

Une autre contrainte importante est la latence. Dans le domaine de l'éclairage par exemple, l'appui sur un interrupteur allume instantanément la lumière ; par conséquent, avoir une latence perceptible dans un nouveau système domotique ne sera pas apprécié par l'utilisateur. En revanche, dans les applications HVAC, les équipements peuvent avoir une latence supérieure sans être perceptible par l'utilisateur. En outre, avoir une grande latence permet d'alimenter certains produits

BY-NC-ND

récepteurs par piles car cela leur permet de se mettre en veille pendant plusieurs millisecondes et se réveiller périodiquement pour scanner le canal radio.

I.3.8. Longueur de trame, inter-trame et débit binaire

L'inter-trame est le temps minimum entre deux paquets consécutifs. L'inter-trame moyen sera souvent beaucoup plus élevé en raison des périodes de non-fonctionnement, mais pour estimer l'utilisation des canaux, il est important de connaître la quantité de paquets dans un intervalle de temps d'utilisation en continu. Par exemple, les interrupteurs ne transmettent qu'une seule fois sous l'impulsion de l'utilisateur, alors que pour les variateurs l'utilisateur doit souvent faire plusieurs ajustements pour obtenir l'intensité de lumière qu'il souhaite.

La taille de la trame est une estimation du nombre brut de bits (payload, préambule et post-ambule compris) qui doivent être transmis pour réaliser une action donnée. Afin de transmettre une trame d'une taille donnée en respectant les contraintes de latence, un certain débit binaire est nécessaire. La plupart des applications du HBA n'ont pas besoin d'un débit binaire élevé car les trames sont relativement courtes et un petit débit binaire est suffisant pour répondre aux critères de latence. Cependant les applications multimédia, qui font également partie du HBA, ont des besoins très différents. Ils ont également tendance à utiliser d'autres types de réseaux. La surveillance vidéo est un bon exemple : d'une part, c'est une application de surveillance pour le HBA et les trames reçues peuvent être traitées comme dans les produits domotiques de type capteurs ; d'autre part, si la vidéo provenant d'une caméra de surveillance doit être transmise à un dispositif d'affichage vidéo, des débits plus grands seraient nécessaires. Dans une telle application, une combinaison de protocole filaire et sans-fil est une solution.

La taille des paquets, l'intervalle d'inter-trame et le débit des données ont également un impact direct sur le duty-cycle d'un produit actif, ce qui affecte le nombre de produits qui peuvent être utilisés simultanément, ainsi que la consommation d'énergie pendant la phase active. En outre, la consommation énergétique globale d'un produit dépend aussi fortement du nombre de fois que celui-ci est utilisé, ce qui peut varier même entre des produits parfaitement identiques.

I.4. Les interférences

I.4.1. Le cadre analytique

Avec la croissance rapide que connaissent les solutions sans fil dans le domaine du Home & Building Automation, la demande des utilisateurs finaux d'une bonne coexistence des technologies devient évidente. Pour que ces technologies soient fiables, il faut qu'elles coexistent. La coexistence des systèmes RadioFréquences dépend de plusieurs paramètres comme la puissance d'émission, la largeur de bande du signal, les mécanismes d'accès au média, le duty-cycle, etc., qui ont un impact plus ou moins important sur l'occurrence des interférences. Dans [17], la coexistence est définie

BY-NC-ND

comme étant « la capacité d'un système à effectuer une tâche en utilisant un média partagé, pendant que les autres systèmes à proximité réalisent leurs tâches respectives, en suivant des règles et des protocoles similaires ou différents ».

Pour analyser les interférences et donc la coexistence radio, il faut identifier, caractériser et classer les variables et les comportements les plus pertinents des technologies utilisées. La Figure I-3 illustre le cadre analytique et les relations entre les variables pertinentes à prendre en compte dans cette analyse. Celle-ci s'appuie sur les ressources disponibles utilisées par le système radio à la fois pour avoir une performance objective de la communication radio mais aussi pour coexister avec les autres technologies. Ces ressources peuvent être divisées en deux catégories : ressources physiques et ressources logiques [18].

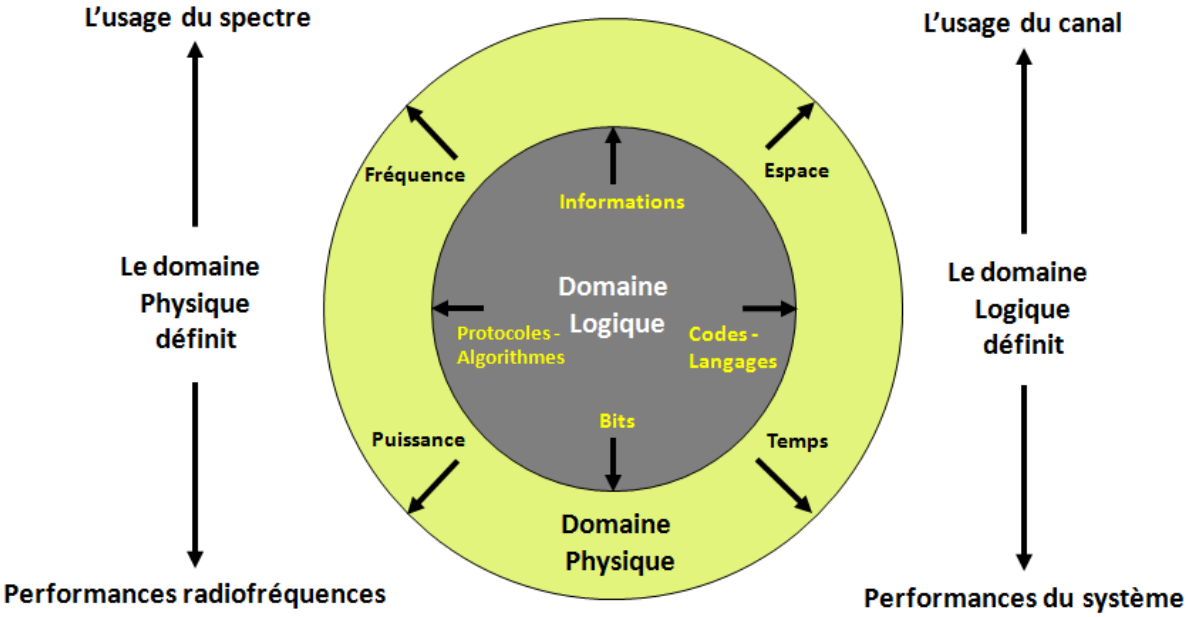


Figure I-3 : Cadre analytique regroupant les paramètres ayant une influence sur la coexistence radio

Le domaine Physique concerne la couche physique et comprend la transmission et la réception des trames, la puissance d'émission, les effets d'antenne, le bruit, la modulation du signal, l'encodage, les interférences, la sensibilité et les performances au niveau RadioFréquences. Le domaine Logique couvre, quant-à-lui, tous les comportements des couches OSI supérieures, comme l'encapsulation des données, les retransmissions, le routage, la planification radio, l'accès au média, les services et les performances, cette fois-ci, au niveau système. Ces performances peuvent inclure, par exemple, la capacité du canal (e.g. nombre d'utilisateurs maximum), la consommation d'énergie, la fiabilité du système, la qualité de service, les latences, le temps réel, etc.

Par ailleurs, il convient de noter que les interférences interviennent dans une combinaison des deux domaines Physique et Logique et qu'elles apparaissent lorsque les signaux se superposent dans le domaine temporel, fréquentiel et spatial.

BY-NC-ND

I.4.2. Le domaine fréquentiel

Dans le domaine fréquentiel, la notion d'interférence ne fait pas référence à deux signaux ou plus qui interfèrent dans l'air, mais plutôt à un récepteur qui est incapable de distinguer entre ces signaux parce qu'ils opèrent sur la même fréquence, ou plus largement, sur la même bande de fréquences causant un signal résiduel sur la fréquence d'opération principale de ce récepteur. En pratique, ce type d'interférences peut être sous-divisé en plusieurs catégories comme le montre la Figure I-4. Les formes les plus communes et ayant les impacts les plus tangibles sur la performance d'un système radio sont les interférences « co-canal » et les interférences causées par le canal adjacent.

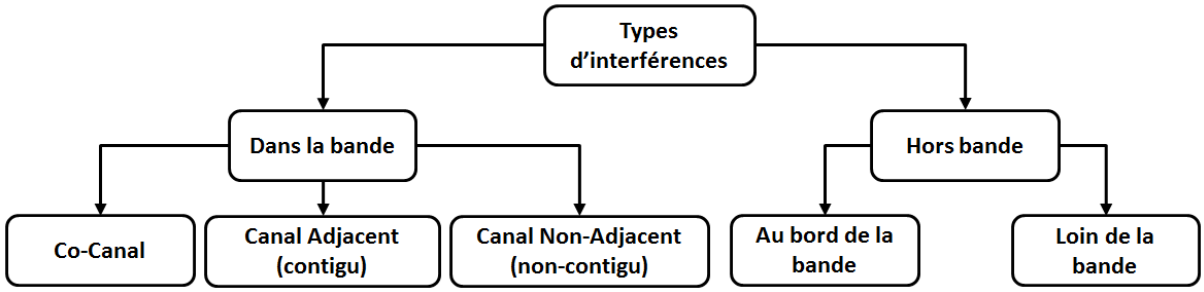


Figure I-4 : Les différents types d'interférences radio dans le domaine fréquentiel

Les interférences co-canal se produisent lorsque les systèmes opèrent sur la même fréquence. Sur le terrain, cela correspondrait par exemple à deux installations voisines qui utilisent le même protocole dans un bâtiment résidentiel. Alors que la plupart des protocoles sans fil spécifient des espaces d'adressage différents pour les installations qui sont voisines, seulement quelques-uns offrent également à l'installateur du système la possibilité de choisir des fréquences différentes afin de séparer complètement les réseaux.

Les interférences dues au canal adjacent se produisent, quant-à-elle, lorsque les systèmes opèrent sur la même bande de fréquences sans forcément opérer sur la même fréquence. En effet, au-delà même des protocoles sans fil dédiés à la domotique, une variété d'autres technologies sans fil (e.g. les points d'accès WLAN) sont en concurrence pour accéder au média RF en utilisant des stratégies de contrôle d'accès parfois différentes. Dans la bande de fréquences ouverte ISM, les point d'accès Wi-Fi créent des émissions RadioFréquences pendant leur fonctionnement qui peuvent être problèmatiques. Ces problèmes doivent, en particulier, être pris en considération dans les applications dédiées à la sécurité puisque celles-ci opèrent également dans les bandes de fréquences ouvertes. Dans ce genre d'application, les interférences peuvent être intentionnelles, ce qui consiste à écouter le signal et à le rejouer (brouillage). Enfin, les interférences causées par un canal non-adjacent arrivent quand l'interféreur utilise un canal non-contigu à celui du système principal, mais que son signal déborde sur le canal du système principal.

BY-NC-ND

I.4.3. Le domaine temporel

Le domaine temporel est déterminé par l'occupation du canal dans le temps, le duty-cycle et les aspects de temps réel des systèmes coexistants. La probabilité d'interférences du signal augmente avec l'utilisation du média dans le temps. Par exemple, un produit émetteur peut connaître des périodes dans la journée où son trafic est élevé et continu, par conséquent le produit récepteur qui lui est associé sera monopolisé. En effet, le temps requis par le produit récepteur pour recevoir chaque trame et la traiter a dans ce cas toute son importance car, pendant ce temps, il ne peut transmettre aucune trame et toutes les trames transmises par d'autres produits vers ce produit seront perdues (collisions de trames). En revanche, dans le cas d'un émetteur qui transmet ses trames de façon périodique avec un intervalle de temps bien distinct, il existe des trous temporels d'inactivité où le canal RadioFréquences peut être utilisé par d'autres produits faisant partie de ce même système ou d'autres systèmes voisins potentiellement perturbant, afin d'éviter les interférences des signaux.

I.4.4. Le domaine spatial et la puissance d'émission

Le domaine spatial est défini par la puissance d'émission, le déploiement géographique des produits et leur mobilité, les caractéristiques du terrain et les matériaux de construction (obstacles), le nombre de produits installés dans le même espace, la distance entre les systèmes (antennes) et le rapport "signal sur interférences plus bruit" (SINR) résultant [19]. Si le SINR est trop faible, un signal ne peut pas être correctement détecté par le récepteur.

I.4.5. D'autres paramètres ayant un impact sur la coexistence radio

D'autres paramètres sont utilisés dans les systèmes radio modernes pour discriminer entre des signaux pour atténuer ou contourner les interférences. Ces variables ont des caractéristiques et des comportements plus subtils que les variables traditionnelles que sont la fréquence, le temps et l'espace. Ces autres variables deviennent de plus en plus pertinentes et efficaces à mesure que la technologie et l'expérience associée se développent. Parmi ces variables :

- La diversité [20]
- La polarisation d'antenne [20]
- Les antennes MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) [21]
- Les techniques de CDMA (Code Division Multiples Access) [22]
- Le routage dynamique [23]
- Les algorithmes adaptatifs de gestion du réseau [24]-[25]
- La correction d'erreur adaptative [26]

D'autres techniques sont utilisées pour séparer les signaux radio: les sauts de fréquence, les techniques d'étalement de spectre, la compression d'impulsion, etc.

BY-NC-ND

I.4.6. Récapitulatif des paramètres et comportements régissant les interférences

Le Tableau I-3 montre un ensemble plus complet des variables qui peuvent être pertinentes pour analyser les interférences RadioFréquences dans les domaines Physique et Logique.

Tableau I-3 : Les variables et mécanismes ayant un impact sur les interférences et la coexistence RF

Le domaine Physique RF	Le domaine Logique
Les variables liées à la fréquence ▪ La fréquence ▪ La bande de fréquences ▪ Le duplexage par séparation fréquentielle (FDD : Frequency Division Duplexing) ▪ La bande passante d'émission ▪ Les émissions non intentionnelles ▪ La modulation des signaux ▪ La gestion des canaux ▪ La planification et la réutilisation des fréquences **Les variables liées à la puissance** ▪ Le budget de liaison ▪ Le contrôle de puissance ▪ Les caractéristiques des signaux démodulés (puissance crête et moyenne) ▪ crête-à-moyenne (PAR) ▪ La densité spectrale du signal émis ▪ La sensibilité du récepteur ▪ Les réponses parasites du récepteur (Spurious) ▪ La plage dynamique de puissance ▪ Les distorsions du signal ▪ Les intermodulations **Les variables liées au temps** ▪ Le duplexage par séparation temporelle (TDD : Time Division Duplexing) ▪ Le rapport cyclique de transmission (duty-cycle) ▪ La tolérance aux multi-trajets (Multipath) ▪ La gestion de l'intervalle de temps ▪ L'accès dynamique au média radio ▪ Les temps de réactions dynamique ▪ Les latences **Les variables liées à l'espace** ▪ Déploiement géographique des systèmes ▪ Les caractéristiques du terrain (obstacles) et les matériaux de construction ▪ La propagation ▪ Les antennes adaptatives ▪ La polarisation ▪ La mobilité ▪ La directivité de l'antenne ▪ La portée ▪ La zone de couverture du système	**Les variables liées à la gestion du système** ▪ La correction d'erreurs ▪ Les technologies de compression ▪ La structure des paquets ▪ Les effets des logiciels d'application ▪ Les retards ▪ La capacité du système (nombre d'utilisateurs) ▪ Durée de vie de la batterie ▪ La marge de fiabilité ▪ L'utilisation efficace du spectre ▪ L'extension du système ▪ Les tests et les vérifications du système ▪ La supervision des performances **Les variables liées au réseau** ▪ La sélection de la fréquence et l'agilité en fréquence ▪ Les protocoles de routage du réseau ▪ Le routage directionnel ▪ La priorité d'accès ▪ La qualité de service ▪ Les protocoles opérationnels de gestion d'interférences ▪ La détection et la gestion des collisions ▪ La tolérance aux interférences **Les variables liées aux fonctions cognitives** ▪ La sensibilité à la position géographique ▪ La sensibilité à l'environnement d'opération ▪ La détection spectrale coopérative ▪ La capacité à identifier le signal ▪ Le partage d'information / Coopération **Les variables liées à la standardisation** ▪ La capacité à mesurer la sensibilité, les harmoniques et réaliser les tests de certification ▪ La disponibilité et la qualité des informations communiquées par l'organisme gérant le standard ▪ Le déploiement géographique du standard ▪ Les mises à jour du standard ▪ Les limites et les restrictions d'utilisation ▪ Les priorités de l'utilisateur

BY-NC-ND

I.4.7. Approches pour contourner les interférences

Pour minimiser ces interférences, les applications sans fil doivent sélectionner une bande de fréquences dont les exigences correspondent le mieux à leurs caractéristiques et besoins en communication. La puissance d'émission et le duty-cycle maximums admissibles sont là des paramètres clés. En outre, les protocoles peuvent utiliser des techniques de modulation et de transmission robustes comme par exemple la répartition du signal sur une plus grande partie du spectre disponible de fréquences, ce qui réduit l'impact des interféreurs à bande étroite. Ces mesures doivent être complétées par l'implémentation de mécanismes protocolaires appropriés sur les couches supérieures en particulier au niveau de la couche MAC (Medium Acces Control). Cela comprend des techniques telles que les acquittements de trames ou les retransmissions automatique de trames (ARQ : Automatic Repeat Request), le changement de canal de fréquences adaptatif, le choix automatique des canaux les moins occupés définis par le cahier des charges pour augmenter la fiabilité du système.

Pour contrer les interférences intentionnelles, en particulier dans les applications aux exigences de sécurité critiques telles que la surveillance, le contrôle d'accès et les systèmes d'alarme, le protocole utilisé doit intégrer, entre autres, des solutions d'authentification, de cryptage, de vérification de l'intégrité des données et d'une protection contre la possibilité de capter le signal et le rejouer. Cependant, tout cela doit être réalisé en respectant les exigences de faibles coûts du produit.

I.5. Les intérêts pour l'entreprise

I.5.1. Introduction à la problématique

Cette thèse a été réalisée au sein de l'entreprise Hager Controls qui développe une large gamme de systèmes, de solutions et de services pour la distribution d'énergie, le confort et la sécurité dans les maisons et les bâtiments. L'entreprise offre une gamme complète de produits radio du HBA pour le contrôle de l'éclairage, des volets roulants, des stores et du chauffage. Les systèmes d'alarme anti-intrusions et les détecteurs d'incendie font également partie de l'expertise de Hager. Membre fondateur de Konnex Association et grand par sa force de proposition, Hager Controls fournit des systèmes d'installation basés sur le protocole KNX depuis plus de 15 ans. Elle développe pour ses clients une multitude de solutions de communications filaires et sans fil. Tous les systèmes sans fil RadioFréquences développés chez Hager sont basés sur le standard « KNX-RF » qui opère dans la bande de fréquences 868 MHz. Le choix de Hager Controls s'est donc porté sur un protocole Sub-GHz. Or, les fréquences Sub-GHz sont généralement les plus intéressantes en termes de portée et de consommation pour relier les produits et les capteurs sans fil entre eux avec des portées adaptées à la maison et au bâtiment pour les applications du HBA, de Metering et de sécurité, et ce, sans avoir besoin d'utiliser de répéteur (ou peu). Cependant, les fréquences normalisées divergent suivant les pays (868 MHz en Europe, 908-926 MHz en Amérique du Nord, 433 MHz dans le pacifique sud, etc.). La fréquence 2,4 GHz est, quant à elle, mondiale, ce qui représente un réel intérêt pour un industriel

BY-NC-ND

distribuant à l'international. Cependant, les portées sont plus limitées (e.g. Wi-Fi), des répéteurs peuvent être nécessaires même dans une maison ou un bâtiment classique (Figure I-5).

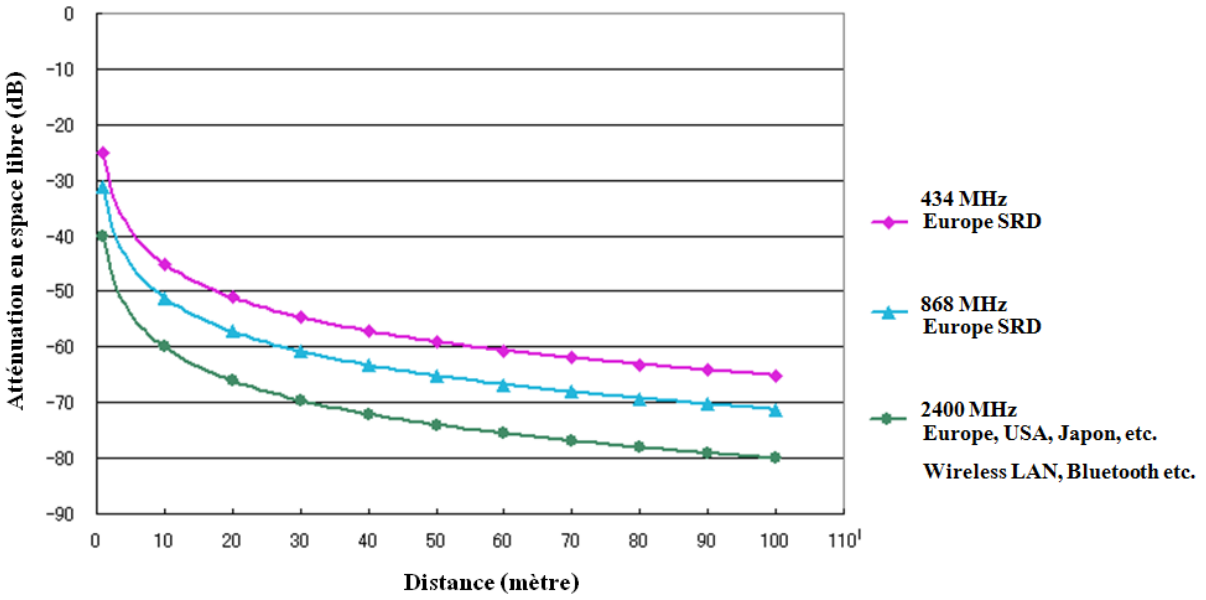


Figure I-5 : Atténuation en espace libre en fonction de la distance et de la fréquence

Par ailleurs, comme introduit précédemment, notre société est aujourd'hui entrée dans une aire de connexion globale basée sur les systèmes de communications filaires et sans-fil : internet, appareils interconnectés, gestion du confort et de la sécurité, cloud computing, véhicule électrique, etc. Dans le contexte actuel et à la vue des possibilités des technologies de communication modernes, le nombre de protocoles radio au sein d'un bâtiment ou dans une maison est important ; il est en croissance et peut générer des pertes de paquets, créant des disfonctionnements dans les installations domotiques. De telles défaillances ne sont pas acceptables pour les utilisateurs et donc pour les industriels.

I.5.2. Le problème d'interférence dans le contexte des boxs multi-protocolaires

Avec l'émergence de l'Internet des objets, ce sont plusieurs milliards d'objets qui sont potentiellement communicants. En ce qui concerne le domaine des Smart Home & Smart Building, la multitude de protocoles radio ouverts et propriétaires pour l'interconnexion des objets fait qu'aujourd'hui s'est créé tout un univers d'objets communicants. La prochaine génération de réseaux sans fil induira un grand besoin de faire interagir tous ces objets entre eux pour ainsi proposer des offres plus riches et des scénarios plus variés. C'est dans ce cadre que l'entreprise Hager Controls a développé une boxe multi-protocolaire qui permet, par le biais de modules adaptés, de communiquer avec des produits existants, mais aussi avec des produits futurs, sans devoir tout remettre en question, et sans limites pour l'utilisateur. La liberté de celui-ci est l'un des points cruciaux car l'utilisateur ne doit pas être « prisonnier » d'un protocole unique. Aussi, l'utilisateur doit pouvoir conserver son installation existante, et ne changer que les éléments dont il n'est pas (ou peu) satisfait. La box domotique devrait être capable de gérer plusieurs protocoles, s'adapter à toute situation, proposer de

BY-NC-ND

nouvelles fonctionnalités, et ce, sans contrainte pour l'utilisateur et à un coût raisonnable. Cependant, le développement de cette boxe domotique multi-protocolaires présente un réel problème d'interférence entre les différents modules placés côte à côte et fonctionnant pour certains dans les mêmes bandes de fréquences que KNX-RF. Il est par conséquent d'autant plus important d'étudier la robustesse radio de notre protocole dans ce contexte précis.

Dans le cadre de cette thèse, l'entreprise souhaitait évaluer le protocole KNX-RF afin d'apporter des solutions améliorant le fonctionnement des produits et surtout leur robustesse RadioFréquences par rapport aux interférences. Dans ces travaux, les principaux risques de robustesse pour Hager sont traités à travers plusieurs scénarios en utilisant les deux outils MATLAB / Simulink et OMNet++. Certains de ces risques, s'ils sont levés, seraient de vrais leviers pour développer de nouvelles applications, et permettrait d'agrandir davantage le business de Hager et d'accroître ses bénéfices en élargissant l'offre de produits tout en profitant des avancées technologiques.

I.6. Conclusion

Ce chapitre aborde l'évolution de la domotique jusqu'à son apogée actuelle avec le développement de l'internet des objets dans les bâtiments intelligents. Les exigences normatives qui régulent le déploiement des réseaux domotiques en fonction des bandes de fréquences utilisées sont également présentées dans ce chapitre, ainsi que les principales caractéristiques qui régissent les performances globales d'un système domotique. L'objet de ce mémoire portant sur l'étude des interférences, une introduction à ces phénomènes est réalisée à travers une classification des types d'interférences qui peuvent se produire dans les domaines espace, temps et fréquence et par le biais d'une identification des paramètres et des comportements qui régissent ces phénomènes. Enfin dans la dernière partie de ce chapitre, les intérêts de ces travaux pour l'entreprise sont exposés.

BY-NC-ND

Chapitre II

Etat de l’art des technologies utilisées dans les applications du Home & Building Automation

BY-NC-ND

Chapitre II. Etat de l'art des technologies utilisées dans les applications du Home & Building Automation

II.1. Introduction

Les standards du Home & Building Automation peuvent être divisés en plusieurs catégories basées sur différentes règles. Le classement des standards selon qu'ils sont filaires ou sans fil en est un exemple. Une autre classification, également des plus répandues, est de les classer selon qu'ils sont ouverts ou propriétaires.

Un protocole prioritaire n'est utilisé que par l'entreprise qui l'a développé (à quelques exceptions près) et celle-ci en détient tous les droits. En général, ces protocoles sont capables d'accomplir toutes les tâches de base nécessaires au fonctionnement d'un système HBA, mais ils ne proposent pas une grande polyvalence. L'utilisation de ces protocoles présente néanmoins quelques avantages. En effet, un protocole propriétaire permettrait d'accélérer le déploiement des produits sur le marché car les procédures de mise en œuvre et de test sont plus fluides. Il permettrait également de réduire les coûts en minimisant les ressources de traitements requises et en éliminant les coûts liés aux tests de conformité et l'octroi du logo.

Les normes ouvertes offrent, quant à elles, des avantages bien au-delà de tout système propriétaire [27]. Les normes ouvertes sont basées sur des protocoles ouverts et des spécifications accessibles à tout le monde, parfois sous réserve d'un paiement de frais de Licence. Habituellement, un protocole ouvert est géré par une association spéciale qui regroupe plusieurs entreprises. Celles-ci contribuent, entre autre, à l'amélioration du protocole en question. Il y a en effet beaucoup d'avantages dans cette approche :

- Plus de fabricants pour les dispositifs souhaités (chips radio, produits, etc.);
- La concurrence instaurée entre les entreprises fait baisser les prix des produits sur le marché ;
- La disponibilité de plusieurs couches physiques et design de cartes électroniques ;
- L'interopérabilité possible entre des produits développés par différentes entreprises ;
- Une communauté de support actives et la création d'un effet de levier vis-à-vis des fournisseurs ;
- La contribution de la recherche académique à la mise en œuvre de nouvelles fonctionnalités et le développement d'applications innovantes.

En réalité, certains protocoles sont plus ouverts que d'autres. Alors que tous les protocoles ouverts peuvent être utilisés par plusieurs fabricants, la technologie en elle-même peut être entièrement contrôlée par un seul fournisseur ou groupe de fournisseurs. L'utilisation de la technologie peut exiger

BY-NC-ND

une redevance à payer. Un protocole qui est développé ouvertement et qui peut être mis en œuvre sans contrôle de licence est considéré comme étant entièrement ouvert.

L'utilisation de protocoles ouverts est une solution viable pour un système HBA durable. Ceci est réalisable en prenant en considérations une conception initiale appropriée qui inclut non seulement l'utilisation du protocole ouvert, mais aussi la standardisation des outils de gestion de réseau et de configuration, et l'accès libre aux formations. Ces exigences sont détaillées dans [28].

Dans ce chapitre, une sélection des standards ouverts et propriétaires les plus connus dans le domaine du HBA seront présentés. Les protocoles filaires seront d'abord brièvement introduits. Les protocoles sans fil radio seront par la suite décrits de manière plus exhaustive. Les critères d'analyse comprennent les bandes de fréquences, les débits de données, les techniques de modulation, les procédures de routage, les topologies, l'interopérabilité, la normalisation et d'autres caractéristiques particulières avec un accent sur l'aptitude générale du protocole à supporter les applications du HBA. Dans toute cette analyse, l'accent sera également mis sur les mécanismes de robustesse implémentée dans chaque protocole pour contourner les interférences. Enfin, une table de comparaison donnera un aperçu général sur les protocoles étudiés.

II.2. Les protocoles HBA filaires

Il existe trois principaux protocoles domotiques filaires ouverts et interopérables : KNX [29], LonWorks [30] et BACnet [31]. Ces protocoles sont devenus des standards EN, ISO ou les deux. Ils n'ont pas la même origine et ont été développés dans des buts différents. BACnet, LonWorks et KNX ont tous atteint une importance considérable sur le marché mondial du HBA et sont souvent choisis par les clients et les installateurs pour leurs systèmes [32].

II.2.1. LonWorks

LonWorks (local operating network) est un standard international largement utilisé pour de nombreux types d'applications de contrôle, y compris l'automatisation des bâtiments qui est considérée comme son plus grand domaine d'application. Il a été créé par le fabricant Echelon en 1988, et en 1999, il a été approuvé comme une norme ANSI pour les réseaux de contrôle [33]. LonWorks est soutenu par LonMark® International, un consortium indépendant de fabricants qui favorisent l'intégration efficiente et efficace des systèmes de contrôle ouvert et multi-fournisseurs. C'est cette organisation qui élabore les normes et assure la certification des produits LonWorks.

LonTalk est le protocole unique pris en charge par les systèmes LonWorks. C'est un protocole qui utilise les 7 couches du modèle OSI. LonTalk supporte différents supports de communication et différentes topologies de câblage. Neuron Chip [34] est le composant principal de chaque produit LonWorks. C'est un dispositif à semi-conducteur spécifique conçu pour fournir de l'intelligence et de la connexion réseau à des produits de contrôlee faible coût. Il a été spécialement créé pour le système

BY-NC-ND

LonWorks et il contient dans son noyau trois processeurs : deux d'entre eux servent au fonctionnement du protocole LonTalk (NET, MAC) et le troisième est dédié aux applications (couche APP).

II.2.2. KNX

KNX est un standard de communication ouvert pour le contrôle de la maison et du bâtiment. Créé en 1999 par l'Association Konnex (maintenant KNX Association), il est issu de la combinaison de trois normes : European Home System (EHS), BatiBUS et European Installation Bus (EIB ou Instabus). Cette norme a été ratifiée par le CENELEC comme Standard Européen EN50090 en Décembre 2003. En 2006, une grande partie de la norme EN50090 a été approuvé pour être incluse dans le standard international ISO / IEC 14543, faisant de KNX un standard ouvert pour le contrôle de la maison et du bâtiment. KNX est utilisé pour contrôler l'éclairage, les ouvrants (stores, volets, accès, etc.), les systèmes de régulation thermique, les équipements dédiés au Metering, etc. Lorsqu'un produit envoie des données à un autre produit, il intègre d'abord l'information dans une trame de données, puis la transmet numériquement sur un bus. Différents supports de transmission filaire peuvent être utilisés: la paire torsadée (KNX.TP) [35], le courant porteur de ligne (KNX.PL) [36] et Ethernet (KNX.IP). La robustesse et la flexibilité sont les maîtres mots dans le standard KNX. Selon [37], KNX est le protocole filaire le plus utilisé en Europe pour le Home & Building Automation.

II.2.3. BACnet

Le protocole BACnet (Building Automation and Control Networking Protocol) est un standard international normalisé par l'ANSI et l'ISO16484-5. Il a été créé en 1987 à Cornell University, Ithaca, New York [38]. Il est soutenu et maintenu par l'organisme ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air- Conditioning Engineers). Ce standard a été spécifiquement développé pour adresser les besoins des applications du HBA. La conformité et l'interopérabilité dont certifiées par l'organisme BACnet Testing Laboratories (BTL). Par conséquent, l'interopérabilité des produits certifiés est garantie.

Le comité de BACnet a incorporé plusieurs protocoles de liaison LAN dans la norme BACnet. Les technologies LAN existantes sont choisies chaque fois que c'est possible. Dans les cas où celles-ci ne répondent pas aux exigences et aux besoins du client, des réseaux LAN spécifiques élaborés par le comité lui-même peuvent être utilisés : Ethernet TCP/IP, ARCnet, LonTalk (Echelon), MS/TP (Master-Slave / token-passing), PTP (point-to-point). Ces variantes de BACnet utilise des débits différents comme le montre le Tableau II-1. Par ailleurs, BACnet utilise seulement quatre des sept couches du modèles OSI [39]. Et même s'il a été conçu par des constructeurs et des utilisateurs du HVAC et que son application est principalement dans ce domaine, ce protocole permet également de gérer d'autres applications (éclairages, volets roulants, etc.).

BY-NC-ND

Tableau II-1 : Les différents débits disponibles dans le standard BACnet

BACnet LAN	Standard	Data Rate
Ethernet	ISO/IEC 8802-3	10 to 100 Mbps
ARCNET	ATA/ANSI 878.1	0.156 to 10 Mbps
MS/TP	ANSI/ASHRAE 135-1995	9.6 to 78.4 kbps
LonTalk	n/a	4.8 to 1250 kbps

Le protocole BACnet est plus évolué que les autres car il a été conçu comme étant un protocole d'agrégation et d'abstraction des autres protocoles. Il permet donc de gérer l'automatisme et remonter les informations vers des équipements de supervision. Ainsi BACnet se situe plus au niveau des couches de gestion du système. Suite au rapprochement des associations KNX et BACnet, KNX Association a publié un graphique ou elle positionne très clairement les solutions KNX et BACnet comme étant tout à fait complémentaires [40].

La principale différence entre BACnet et Lon ou KNX est qu'alors que le protocole BACnet est un standard ouvert, les outils de configuration et de gestion du réseau sont fournis individuellement par chaque fabricant. L'inconvénient de cette approche est que si des produits de plusieurs fabricants doivent être installés dans un même bâtiment, ils auront besoin de plusieurs outils différents et il sera nécessaire de coordonner leur interaction et configurer le réseau global. Il existe pour cela des outils de tests communs qui permettent aux installateurs de vérifier que chaque dispositif installé coexiste bien avec tous les autres.

II.2.4. Conclusions de la comparaison des protocoles filaires

Le Tableau II-2 contient les caractéristiques de chacun des protocoles précédemment introduits pour les transmissions via paire torsadée (TP). Une comparaison plus détaillée entre LonWorks and KNX peut être trouvée dans [41]. Une autre étude compare Lonworks and BACnet dans [27].

Pour comparer ces trois protocoles cette fois-ci au niveau « Système », un modèle hiérarchique est introduit dans la Figure II-1 qui structure l'automatisme des bâtiments en trois niveaux [32]. Au niveau « Terrain », les produits sont connectés entre eux, les données sont collectées (mesure, comptage, metering) et les commandes sont exécutées (commutation, réglage, positionnement). Ici la quantité de données est mesurée en bits et la latence en ms. Le niveau « Automatisation » traite les données préparées par le niveau Terrain. Il englobe les divers aspects de contrôle automatique, par exemple, les boucles de régulation thermique. A ce niveau, la quantité de données est mesurée en octets, la latence et la fréquence sont en ms à quelques secondes. Le niveau « Gestion » a accès à toutes les informations, les historiques et statistiques de l'installation (via une interface IHM par exemple). C'est aussi là que sont faites les tâches globales de configuration et de gestion du réseau.

BY-NC-ND

Ici, la quantité de données est mesurée en mégaoctets, la latence et la fréquence sont mesurées en jours [42].

Tableau II-2 : Les caractéristiques des trois protocoles filaires étudiés dédiés au HBA

Description	**LonWorks (TP/FT-10)** [33]	**KNX TP** [35]	**BACnet MS/TP** [43]
Topologie du bus	Linéaire, étoile, arbre ou mixte	Linéaire, étoile, arbre ou mixte	Linéaire, étoile, arbre ou mixte
Data rate	78125 bps	9600 bps	9600, 19200, 38400, 76800 bps
Alimentation	48V DC, insensible à la polarité	29V DC, sensible à la polarité	24V DC, sensible à la polarité
Nb maxi. de produits par segment	128	256 (KNX TP1-256) / 64 (KNX TP1-64)	128
Longueur maxi. du câble par segment	2200 m	1000 m	1220 m
Nb maxi. de produits dans une installation	32385	61455	Quasi-illimité : 4194302
Noyau du produit	Neuron chip programmé en langage Neuron C.	Pas de processeur ni de langage particulier.	Utilisait initialement le processeur 68HC05, utilise actuellement le MSP430 entre autre.
Standards	- ISO/IEC 14908 - Europe EN 14908, - U.S. ANSI/CEA-709/852 - China GB/Z 20177.1 and GB/T 20299.4	- ISO/IEC 14543-3 - U.S. ANSI/ASHRAE 135 - Canada CSA-ISO/IEC 14543-3 - Europe CENELEC EN 50090 and CEN EN 13321-1 - China standard GB/T 20965	- ISO 16484-5 global standard for U.S., Europe, and more than 30 other countries. - ANSI/ASHRAE 135-1995
Licence payante?	Pas de frais	Frais payés par le fabricant	Frais payés par le fabricant

Comme le montre la Figure II-1, il y a des différences entre les protocoles en termes des niveaux qu'ils couvrent et de quelle manière. Le protocole KNX et LonWorks sont construits à partir du niveau Terrain en montant vers le niveau Gestion, mais le protocole BACnet met plutôt l'accent sur la gestion globale du système. En effet, il a été conçu comme étant un protocole d'agrégation et d'abstraction des autres protocoles. En bref, comme ces trois protocoles ne sont pas définis sur les mêmes niveaux, il n'est pas facile de les comparer.

BY-NC-ND

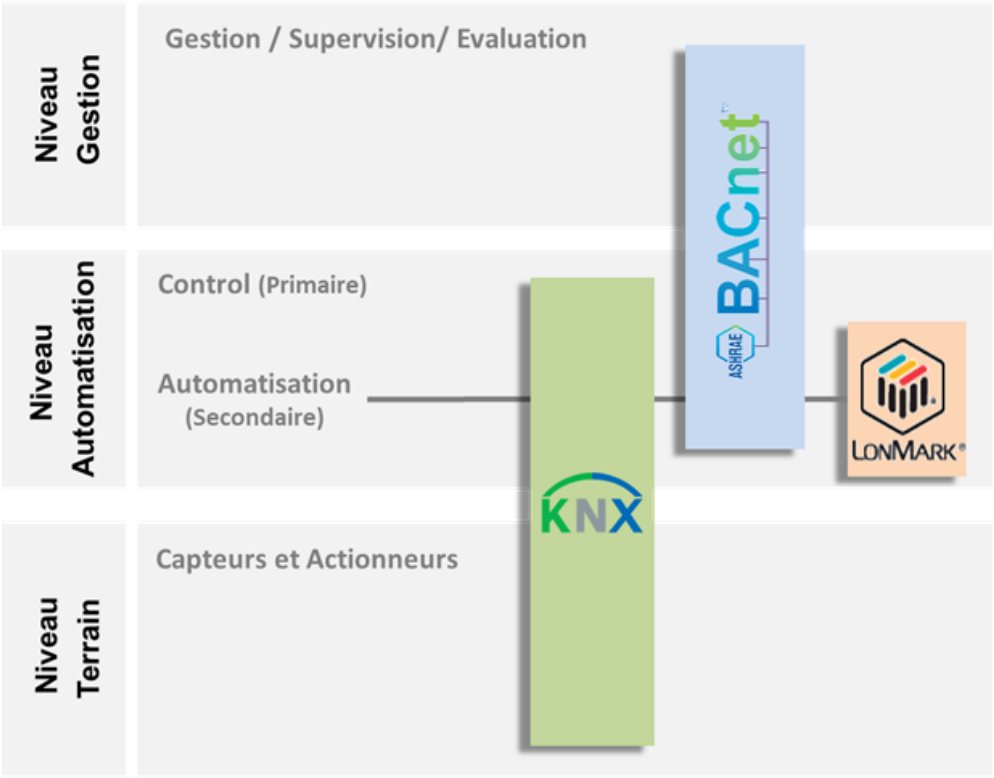


Figure II-1 : Hiérarchie des trois protocoles domotiques filaires au niveau application et système

II.3. Les protocoles sans fil RadioFréquences dédiés aux systèmes HBA

Les réseaux WLAN (Wireless Local Area Networks) basés sur la famille de standards IEEE 802.11 (e.g . Wi-Fi) sont de loin les standards RadioFréquences les plus présents et les plus populaires dans la maison et le bâtiment. Ils sont généralement utilisés pour la transmission de données multimédia et l'accès à Internet. Il serait donc logique de penser à utiliser ces standards dans les systèmes domotiques. Cependant, ces standards n'ont à la base pas été conçus pour les applications du Home & Building Automation, qui nécessitent, des protocoles simples, bas débit et basse consommation. C'est pour cette raison que plusieurs standards radio ouverts et propriétaires dédiés aux applications dans les réseaux de capteurs et la domotique au sens large ont vu le jour.

La Figure II-2 montre une sélection de standards qui sont actuellement les plus utilisés par les chercheurs et les fabricants de produits domotiques. Ils sont classifiés selon leurs techniques de modulation et leur manière d'utiliser le spectre fréquentiel. KNX-RF, EnOcean et Z-wave font partie de la catégorie de standards utilisant une couche physique à porteuse unique. KNX-RF Multi utilise certes plusieurs canaux, mais il n'utilise qu'un seul canal à la fois pour transmettre le signal, d'où sa classification dans la catégorie des technologies à porteuse unique. Bluetooth Low Energy et ZigBee font également partie de cette catégorie à la différence qu'ils utilisent, en plus, une technique d'étalement de spectre qui consiste à étaler le signal sur une bande beaucoup plus grande que ce dont le signal a besoin. Enfin, le standard IEEE 802.11g fait partie de la catégorie de standards multi-

BY-NC-ND

porteuses et il est basé sur l'OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing) [9]. Cette technique consiste à transmettre les données en parallèle sur un très grand nombre de sous-porteuses orthogonales les unes avec les autres. C'est comme si l'on combinait le signal à transmettre sur un grand nombre de systèmes de transmission (des émetteurs, par exemple) indépendants et à des fréquences différentes. Cette dernière catégorie ne sera pas traitée dans ce chapitre.

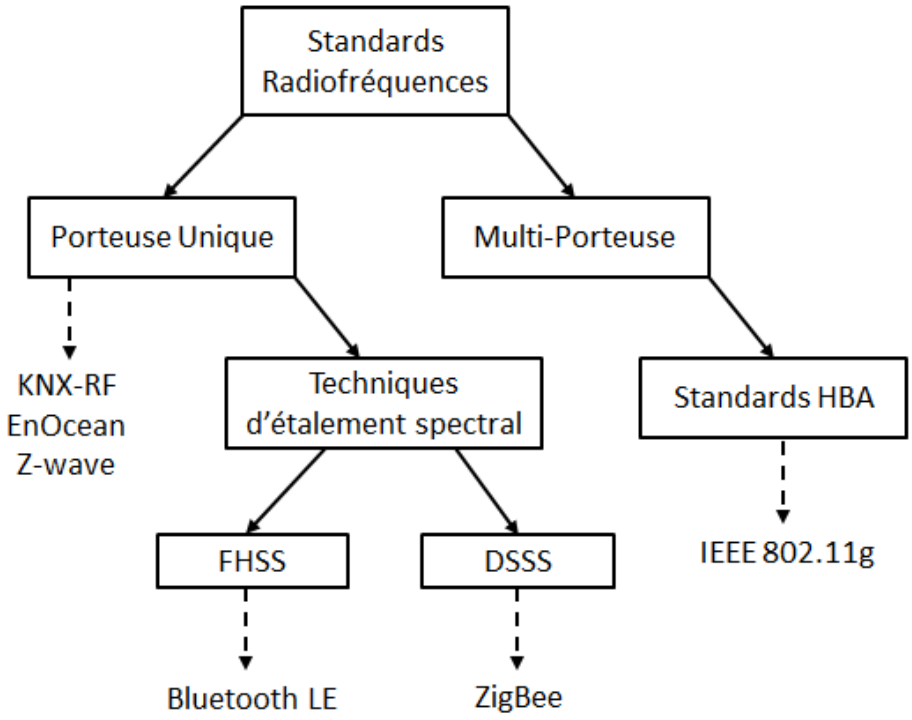


Figure II-2 : Classement des protocoles RF selon leurs techniques de modulation et d'accès au média

Pour faciliter l'interconnexion des systèmes RadioFréquences, l'organisme ISO [44] propose un découpage fonctionnel de l'ensemble du processus de communication où sont décrites les fonctionnalités nécessaires à la communication et l'organisation des fonctions. Ce découpage fonctionnel est décrit dans le modèle OSI avec une structuration en 7 couches. Le synoptique du modèle est représenté dans la Figure II-3. Pour les systèmes radio domotiques, principalement basés sur les réseaux de capteurs, un découpage en 7 couches est en réalité trop complet voire trop complexe. En effet, les protocoles radio domotiques sont généralement définis sur 4 couches seulement [45] : la couche Physique, la couche Liaison qui inclut les sous-couches LLC (Logical Link Control) et MAC (Medium Access Control), la couche Réseau, et enfin la couche Application.

BY-NC-ND

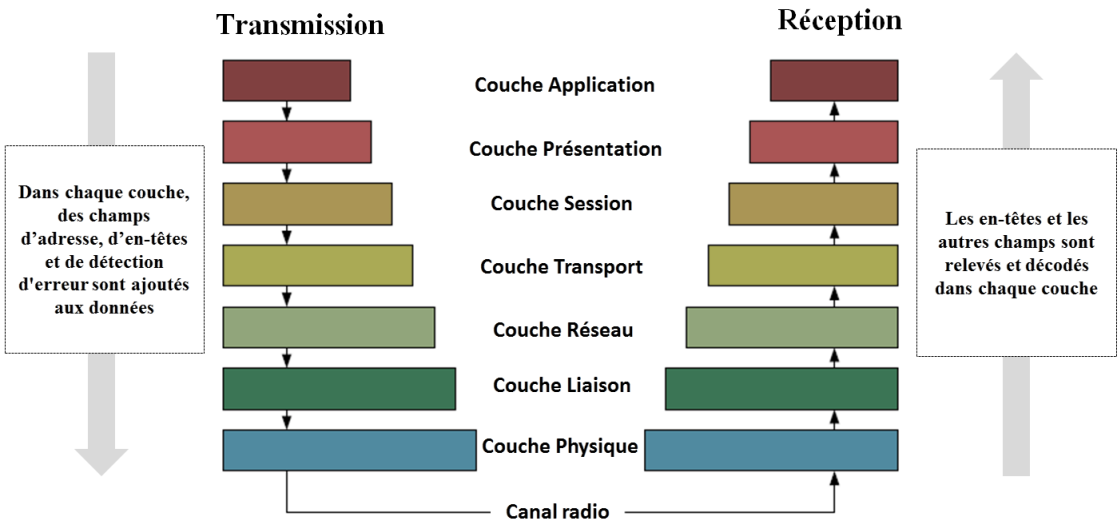


Figure II-3 : Modèle OSI (Emission / Réception)

La couche Application gère les programmes de l'utilisateur et lui apporte les services de base mis à disposition par le réseau. La couche réseau prend en charge l'acheminement des données en élaborant par exemple des protocoles de routage de paquets. Dans le cas où les nœuds se retrouvent dans un environnement radio contraignant (canal RF saturé), la couche MAC doit, entre autres, être en mesure de minimiser les collisions de trames avec les systèmes voisins. Enfin, la couche physique répond aux besoins de robustesse en adoptant des techniques de modulations, de détection / correction d'erreurs et de traitement du signal adapté au canal radio.

II.3.1. KNX-RF

II.3.1.1. Description

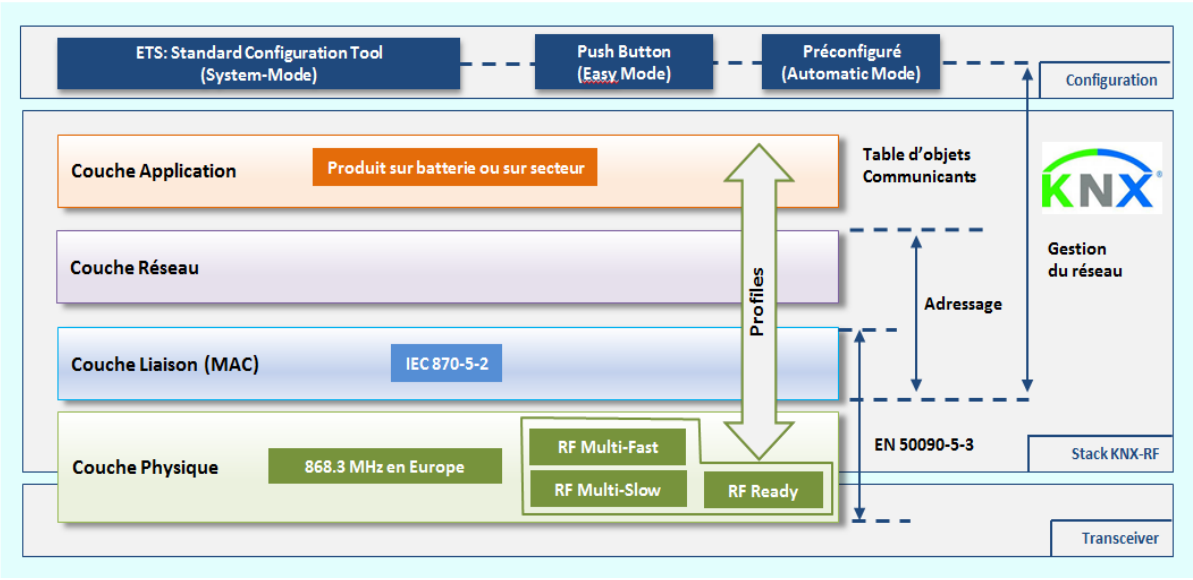


Figure II-4 : La stack du protocole KNX-RF

Bien qu'historiquement le standard KNX ne proposait que des solutions filaires, une version sans fil existe [46]. La toute première spécification du standard radio international ouvert KNX-RF (1.1)

BY-NC-ND

date de 2001. Cette première version n'a évolué qu'en 2010 et est alors appelée KNX-RF « Ready ». Elle a introduit la configuration « Push-Button » et opère selon un Duty-Cycle de 1% sur une fréquence unique de 868,3 MHz en utilisant une modulation FSK avec une déviation de +/- de 40 à 80 kHz (60 kHz typiquement), un encodage Manchester et un débit de chips de 32,768 kchip/s. Une démodulation non-cohérente peut être utilisée en réception [47]. C'est en 2011 que KNX-RF Ready a été étendue à une nouvelle norme appelée « Multi ». Le Tableau II-3 montre les différences entre ces deux versions. KNX-RF-Multi rajoute quelques mécanismes de robustesse radio et permet une communication bidirectionnelle. Un aperçu global de la stack KNX-RF composée de 4 couches OSI est illustré dans la Figure II-4.

Tableau II-3 : Les différences entre KNX Ready et KNX Multi [48]

Caractéristiques	**KNX-RF 1.1 et KNX Ready RC1180-KNX1**	**KNX Multi RC1180-KNX2**
Propriétés spéciales	Communication transparente	Répéteur / Retransmetteur
Composants	Emetteur et récepteurs	Emetteur, récepteurs et répéteurs
Nombre de canaux	1	3 Canaux Fast / 2 Canaux Slow
Nb max de numéros de série installés	1	64
(LBT) Listen Before Talk	Non	Oui
Acquittement	Non	Oui

La composition d'une trame KNX-RF est représentée sur la Figure II-5. Elle consiste en un préambule, un postambule et jusqu'à 4 blocs de données : un 1er bloc de 10 octets, 2 blocs de 18 octets et un dernier bloc de 10 octets. Chacun inclut un CRC de 2 octets pour détecter les erreurs.

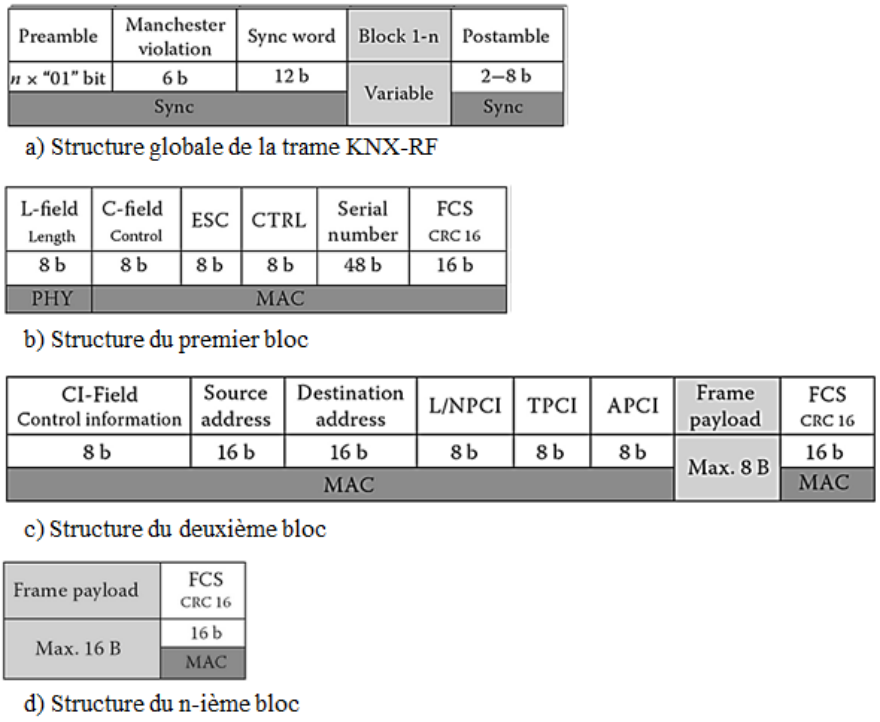


Figure II-5 : La composition d'une trame KNX-RF

BY-NC-ND

Comme noté dans le Tableau II-4, KNX-RF Multi opère sur 5 canaux RF différents et permet l'agilité en fréquences. Les cinq canaux sont divisés en deux catégories principales (Tableau II-4). La première est composée de 3 canaux radio « rapides » (Fast F1, F2, F3) d'un débit de chip de 32,768 kchip/s. La deuxième catégorie est composée de 2 canaux radio lents (Slow S1, S2) d'un débit inférieur de 16,384 kchip/s.

Concernant leurs usages, les canaux "Fast" sont destinés aux systèmes nécessitant un temps de réaction rapide (environ 42 ms pour l'actionnement typique d'une lampe) entre l'émetteur et l'actionneur (lampes ou volets). Quant aux canaux "Slow", ils sont destinés à des systèmes qui n'ont pas besoin d'un temps de réponse critique (commande de chauffage), ils comprennent les dispositifs qui mettent en œuvre un Mode de Réception Non-Permanent (MRNP) avec un temps de réaction d'environ 500 ms. Les dispositifs MRNP sont en veille lorsqu'ils ne sont pas en train de scanner les paquets KNX-RF afin de réduire la consommation en énergie. Ceci permet aux produits tels que les vannes de chauffage, les thermostats, les capteurs et les alarmes d'être alimentés par batterie et d'obtenir des durées de vie allant de 2 à 7 années avec les technologies de batterie communément utilisés dans le marché.

Tableau II-4 : Les caractéristiques physiques des différents canaux de KNX-RF [48]

Type de canal	Fréquence (MHz)	Déviation FSK (KHz)	Duty Cycle	Débit Chip (Chip/s)	Longueur du préambule (ms)
Ready	868,300	(48-80) Typ. 70	1%	32768	15
F1 : 1er canal Fast (canal de rappel)	868,300	(48-80) Typ. 66	1%	32768	15
F2 : 2ème canal Fast	868,950	(48-80) Typ. 66	0,1%	32768	15
F3 : 3ème canal Fast	869,850	(48-80) Typ. 66	100%	32768	15
S1 : 1er canal Slow (canal de rappel)	869,850	(20-65) Typ. 35	10%	16384	500
S2 : 2ème canal Slow	869,525	(20-65) Typ. 35	100%	16384	500

Par ailleurs, contrairement aux autres protocoles, KNX a l'avantage de proposer aux utilisateurs des méthodes de configuration centralisées et homogènes pour tous les produits (filaire et sans fil) et qui varient en fonction de la complexité de l'installation. KNX couvre en effet trois types de configuration [49]-[50] : Easy mode (E-mode), System Mode (S-Mode) et Automatic Mode (A-Mode).

S-Mode est le mode de configuration historique de KNX car il avait déjà été défini dans le standard EIB. C'est un mode de configuration privé préconisé par l'association KNX. Il permet de télécharger une application dans un produit, et de configurer celle-ci, par le biais du logiciel ETS (Engineering Tool Software) distribué par l'association. Cette procédure est très puissante et peut être

BY-NC-ND

utilisée dans des installations très complexes. S-Mode est conçu principalement pour des techniciens qualifiés ayant une expérience avec les réseaux KNX. C'est le mode qui offre le plus de fonctionnalités, les autres modes étant des versions simplifiées.

E-Mode ne nécessite, quant à lui, pas l'utilisation d'un logiciel sur PC. Ce mode peut être divisé en plusieurs sous-modes. Parmi ceux-là, le mode « Easy Controller » et le mode « Push Button ». Comme son nom l'indique, le mode Easy Controller nécessite un dispositif de contrôle dans le réseau KNX qui exécute le processus de configuration en fonction de règles définies. Le mode Push Button ne nécessite pas d'outil et de dispositif auxiliaire, la configuration se fait en appuyant et en choisissant les fonctionnalités désirées au niveau des produits mêmes.

A-Mode est le moins répandu car il est voué à disparaître. Il permet de faire fonctionner l'ensemble des produits préconfigurés, sans utiliser d'outil de programmation. Il n'existe actuellement aucun produit qui supporte ce mode sur le marché.

II.3.1.2. Les mécanismes de robustesse de KNX-RF

La dernière version "Multi" de la norme KNX-RF met en œuvre un certain nombre de mécanismes de robustesse qui minimisent les risques de perturbations radio. Cependant, une étude approfondie et claire sur la performance radio de ce standard n'a jamais été réalisée jusqu'à présent dans la littérature recherche. Les mécanismes et les paramètres ayant un impact direct sur la robustesse du standard KNX-RF-Multi ont été répertoriés et classés en fonction de leur position dans le modèle OSI dans le Tableau II-5. Dans le cadre de ces travaux, chaque mécanisme et paramètre a été explicité et son intérêt identifié.

Tableau II-5 : Les mécanismes de robustesse de KNX-RF-Multi et leurs fonctions

Mécanisme de robustesse	Position OSI
Modulation	PHY
Débit	PHY
Filtre extérieur	Hardware
Duty Cycle	MAC + Application
Fast-ACK	MAC
Listen Before Talk (LBT)	MAC
Retransmission et Agilité en fréquences adaptative	MAC + PHY
Retransmission des paquets	MAC
Inter-frame et Random Time	MAC
Durée de la communication	APP

BY-NC-ND

a) Modulation

La modulation est un moyen efficace pour réduire les taux d'erreurs binaires et le bruit après sa première fonction : transporter les données. Chaque type de modulation a sa propre valeur de la fonction d'erreur qui se comporte différemment en présence du bruit. Par exemple, la robustesse de la modulation FSK diminue lorsque l'on augmente l'ordre de modulation. En outre, la modulation FSK est un bon compromis, car elle permet un développement facile pour les développeurs RF dans les départements R&D des entreprises.

b) Débit

Un faible débit de données conduit à la réduction de la largeur de bande du signal. Des niveaux inférieurs de bruit sont donc reçus et le rapport signal sur bruit (SNR) est amélioré.

c) Rajout d'un filtre externe à la puce RF

Les filtres jouent un rôle important dans l'augmentation de l'immunité au bruit puisqu'ils limitent les propagations d'énergie du signal dans les canaux adjacents et protègent la bande de l'utilisateur des signaux parasites et du bruit. C'est pourquoi les filtres utilisés doivent avoir une bonne qualité de sélection.

d) Rapport cyclique (Duty Cycle)

Le Duty Cycle est défini comme étant le rapport, exprimé en pourcentage, du maximum temps où l'émetteur est en mode « ON » durant une heure, divisé par une heure. Un produit HBA est déclenché soit automatiquement soit manuellement, et en fonction du type du déclenchement le rapport cyclique est soit fixe soit aléatoire. Plus le Duty Cycle est élevé, plus la probabilité de perdre des paquets à cause des interférences augmente.

e) Acquittement (Fast-ACK)

Le principal risque dans un environnement KNX-RF-Multi est d'avoir deux produits (ou plus) qui émettent en même temps sur le même canal RadioFréquences. Comme il n'est pas possible d'éviter cela, le système doit détecter ces situations et faire des retransmissions pour atteindre la destination. Dans ce cas, un accusé de réception est nécessaire. Un acquittement ou ce que l'on appelle le « Fast-ACK » est autorisé par la norme ETSI EN300220 [12], à condition qu'il soit envoyé par la destination au cours des 5 premières millisecondes après la fin de la trame reçue. L'algorithme mis en place pour l'émission et la réception d'acquittement est illustré Figure II-6. Le Fast-ACK est optionnel, chaque fabricant choisit de l'utiliser ou pas.

BY-NC-ND

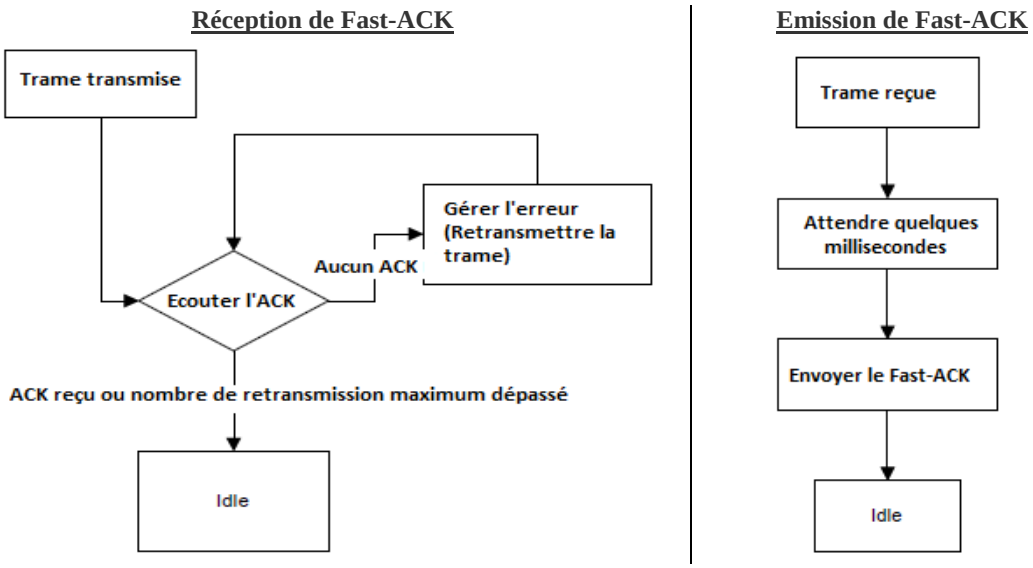


Figure II-6: Algorithmes d'acquittement KNX (Rx / Tx)

Pendant la phase de configuration, un émetteur doit savoir s'il est susceptible de recevoir des Fast-ACKs ou pas. Par conséquent, dans le cas d'une communication Multicast avec un Fast-ACK demandé, l'émetteur ne considère que les acquittements des produits avec lesquels il est appairé après la phase de configuration. Les appareils qui ne supportent pas le Fast-ACK sont considérés par défaut comme ayant reçu la trame. Pour indiquer au récepteur qu'un Fast-ACK doit être envoyé une fois la trame reçue, le bit 4 de la trame KNX reçue doit être mis à 1. De plus, pour avoir assez de temps pour analyser le contenu de la trame reçue, une extension de temps de 9 ms appelé « Postambule with End Of ACK (EOA) » est nécessaire. Ce postambule a une longueur totale de 20 octets, soit 9,76 ms avec 32 768 kchip/s en mode Fast. En mode Slow, le postambule dure 19,53 ms avec un débit de 16384 kchip/s.

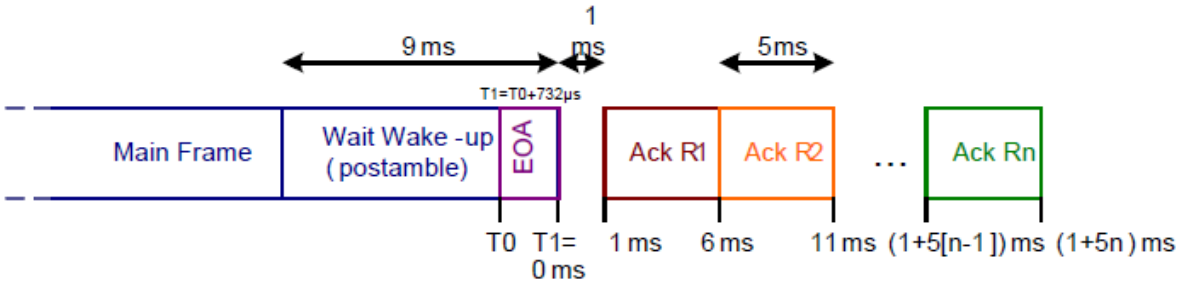


Figure II-7 : Fenêtres de réception des acquittements (Fast-ACK)

Le nombre de Fast-ACK attendu doit être compris entre 1 et 64 pour éviter d'avoir des latences trop importantes. Dix millisecondes après la réception complète de la trame (soit 1 ms après la fin du Postambule with EOA), le premier récepteur transmet un Fast-ACK dans une fenêtre de temps fixée à 5 ms (Figure II-7). Le Fast-ACK doit toujours être envoyé sur le même canal RF que la trame qu'il acquitte. Le Fast-ACK doit avoir une longueur totale de 7 octets, ce qui correspond 3,41 ms à 32786 kchips en mode Fast.

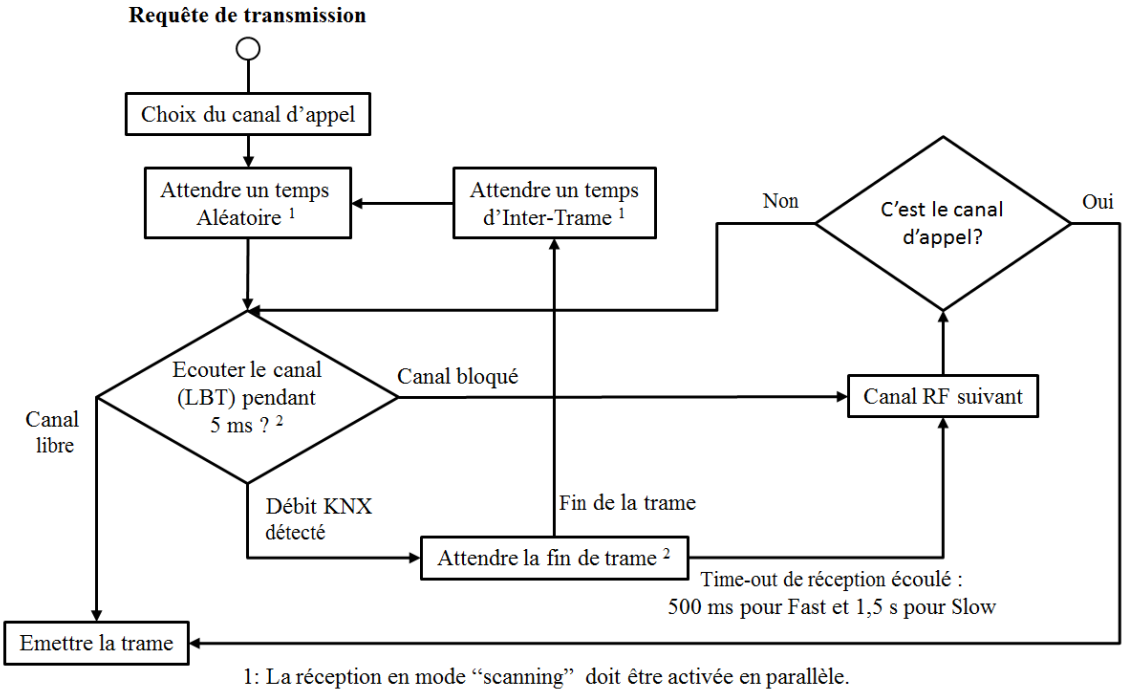
BY-NC-ND

Dans le cas d'une communication entre plusieurs appareils, si un ou plusieurs Fast-ACK ne sont pas reçus, l'émetteur retransmet de nouveau la trame pour essayer d'atteindre le ou les récepteurs, mais cette fois-ci sur le canal RF suivant. Le mécanisme d'acquittement des trames doit s'arrêter après trois tentatives successives immédiates sur les deux canaux radio suivants le canal d'appel, et le canal d'Appel (F1 pour le mode Fast et S1 pour le mode Slow). Une séquence typique dans le mode Fast serait F1, et tentatives sur F2, F3 puis F1. Pour le mode Slow le séquencement serait S1, et tentatives sur S2 puis S1.

f) Listen Before Talk (LBT)

Le LBT est une mesure prise par un émetteur pour s'assurer qu'un canal est libre avant de transmettre sa trame. L'algorithme associé au LBT est schématisé Figure II-8. Le changement dynamique d'un canal peut être déclenché de trois façons : soit en détectant que le canal est occupé après un Listen Before Talk (LBT), soit en détectant que la durée maximale allouée à l'occupation du canal est atteinte, soit en évaluant la qualité du bilan de liaison radio.

Le seuil du LBT est défini comme étant le niveau du signal reçu au-dessus duquel l'appareil peut déterminer que le canal n'est pas disponible pour l'utilisation. Si le signal reçu est inférieur à ce seuil, l'équipement peut alors savoir que le canal est libre. Le LBT est utilisé pour partager le spectre entre les transceivers SRD (Short Range Devices) qui ont une puissance et une bande passante similaire. Afin de profiter au maximum des canaux disponibles, le LBT doit être combiné à une option d'agilité de fréquence adaptative (Adaptive Frequency Agility).



1: La réception en mode "scanning" doit être activée en parallèle.
2: La réception sur le canal radio utilisé doit être activée en parallèle.

Figure II-8 : Algorithmes d'accès au média pour les canaux KNX-RF

BY-NC-ND

b) Inter-Trame et temps aléatoire d'accès au média

Le temps d'Inter-Trame est l'intervalle de temps au cours duquel un produit bidirectionnel doit attendre pour transmettre sur un canal libre. Si aucun préambule n'est détecté pendant l'Inter-Trame, le dispositif peut commencer à transmettre. Si une trame est reçue alors que la couche physique reçoit de la couche MAC une requête d'envoi, le temps d'Inter-Frame commence après que la trame soit entièrement reçue, c'est-à-dire après que le dernier CRC soit reçu. Idem pour l'envoi d'une trame : si la couche physique reçoit une requête d'envoi alors qu'elle est déjà en train de transmettre une trame, l'Inter-Frame commencera alors lorsque le dernier CRC serait transmis.

Pour éviter que plusieurs systèmes dans la même bande de fréquences subissent des collisions continues et systématiques, le temps de transmission de l'émetteur ne doit pas être strictement périodique ; d'où l'utilisation d'un temps aléatoire appelé Random Time. Ceci est particulièrement important étant donné que ces systèmes sont souvent contrôlés par des oscillateurs à quartz extrêmement stables, ce qui peut engendrer des collisions périodiques dans le système pendant des heures.

Les durées exactes de l'Inter-Trames, du temps aléatoire ainsi que la durée total d'accès au média sont présentées dans le Tableau II-6 pour les différents modes de KNX-RF.

Tableau II-6 : Les temps d'accès au média en émission et la durée du time-out en réception

Type de trame	Temps d'Inter-Trame	Temps aléatoire	Temps total d'accès au média
Ready	15 ms	[0, 15] ms	[15, 30] ms
Multi Fast	30 ms	[0, 20] ms	[30, 50] ms
Multi Slow	60 ms	[0, 40] ms	[60, 100] ms

c) Agilité en fréquence adaptative (Adaptive Frequency Agility : AFA)

AFA (Adaptive Frequency Agility) est défini comme étant la capacité d'un équipement à modifier dynamiquement le canal dans ses fréquences disponibles pour assurer un bon fonctionnement de la communication radio. Dans le cas d'une communication entre plusieurs appareils, si un ou plusieurs Fast-ACK ne sont pas reçus par l'émetteur, celui-ci renvoie de nouveau la trame pour essayer d'atteindre le ou les récepteurs, mais cette fois-ci sur le canal RF suivant. L'algorithme gérant les pertes de trames et l'agilité en fréquence est représenté Figure II-9.

BY-NC-ND

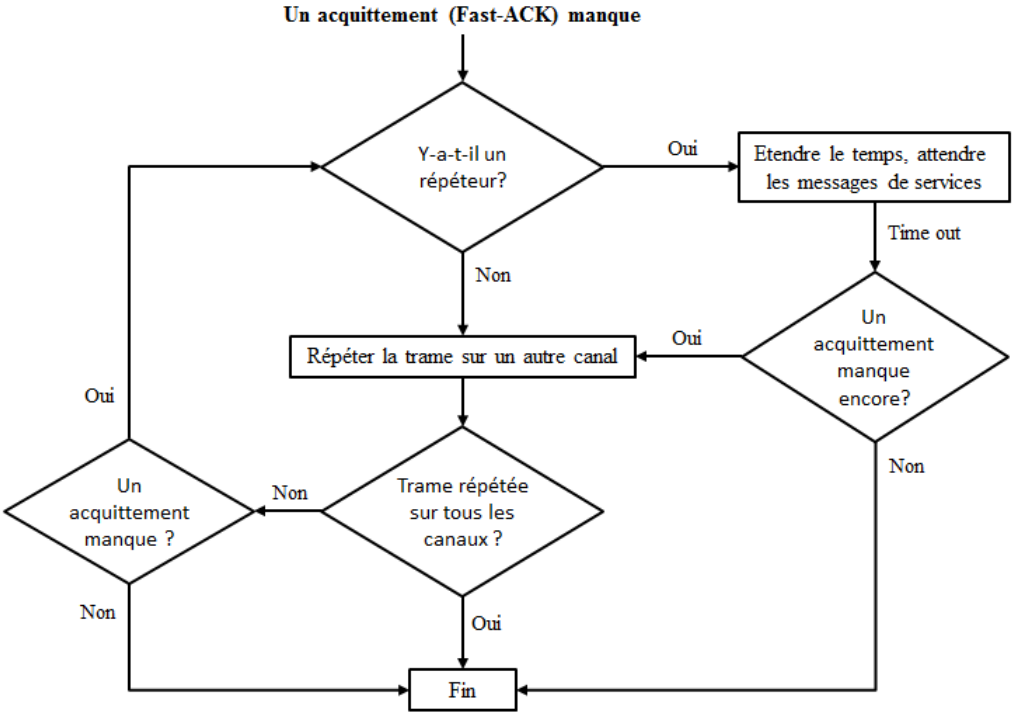


Figure II-9 : Algorithme de gestion de perte de trame dans KNX-RF

d) Durée de la communication

Dans le cas où l'on rajouterait des fonctions de sécurité KNX, les trames seraient plus longues ce qui prolongerait la durée de la communication et augmenterait la probabilité de collision des trames. L'amélioration de la robustesse est corrélée avec la consommation du système. En effet, le réveil de la partie radio dûes à son propre protocole, d'autres protocoles RF à la même fréquence ou dans les bandes adjacentes, par fausses détections augmente la consommation. Il est donc important d'améliorer cette caractéristique robustesse tout en répondant aux objectifs de basse consommation.

II.3.2. ZigBee

II.3.2.1. Description

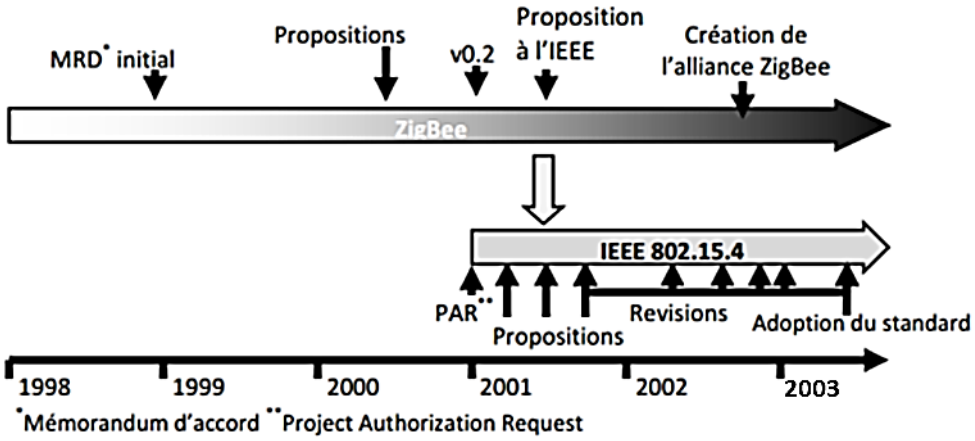


Figure II-10 : Historique des normes ZigBee et 802.15.4

BY-NC-ND

ZigBee [51] est un LP-WPAN (Low Power - Wireless Personal Area Network): un réseau sans-fil à courte portée et décrit comme à faible consommation d'énergie. Il a été construit en se basant sur la norme IEEE 802.15.4 et a été développé par l'Alliance ZigBee. Il est basé sur la couche PHY et couche MAC de la norme IEEE 802.15.4 [52]. La Figure II-10 présente l'historique des standards ZigBee et IEEE 802.15.4. La première réflexion date de 1999 et les premières propositions du standard ZigBee datent de l'an 2000. Une proposition a par la suite été faite à l'organisme IEEE en 2001 et, après plusieurs révisions, la version finale du standard IEEE 802.15.4 a été adoptée en mai 2003. De son côté le standard ZigBee a créé une alliance en 2002.

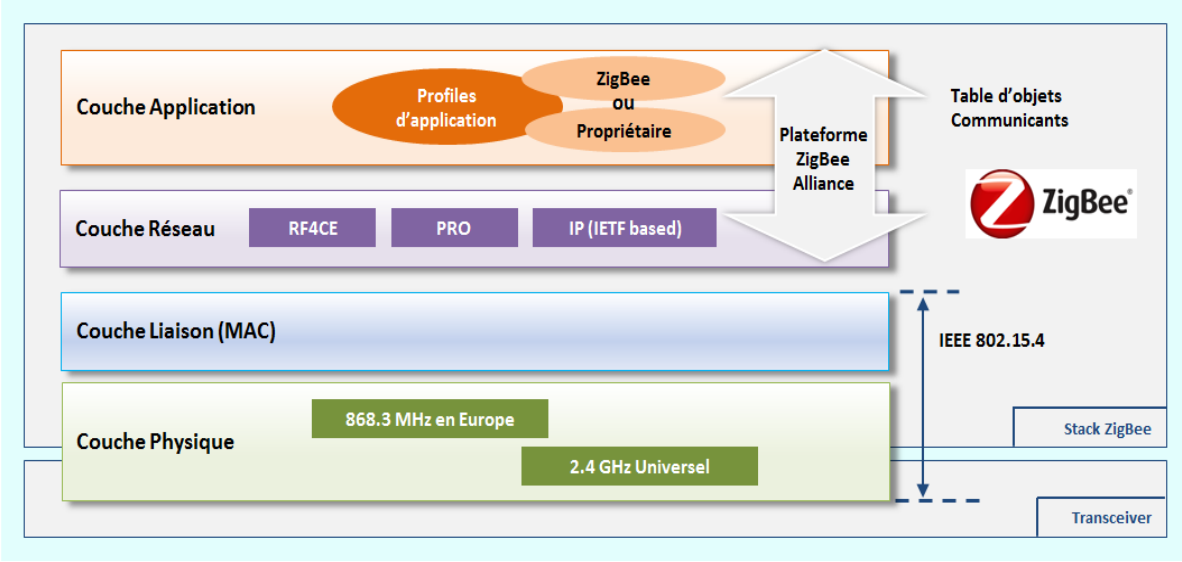


Figure II-11 : La stack du protocole ZigBee

Un aperçu global de la stack ZigBee est illustré dans la Figure II-11. La couche MAC implémente une technique d'étalement de spectre DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) et opère dans les bandes 868 MHz et 915 MHz modulés en BPSK et 2,4 GHz modulé en Offset-QPSK avec des débits respectifs de 20, 50 et 250 kbit/s. Le débit et le nombre de canaux disponibles étant plus important dans la bande 2,4 GHz, c'est elle qui est la plus utilisée. Quant à la composition de la trame ZigBee, elle est présentée dans la Figure II-12.

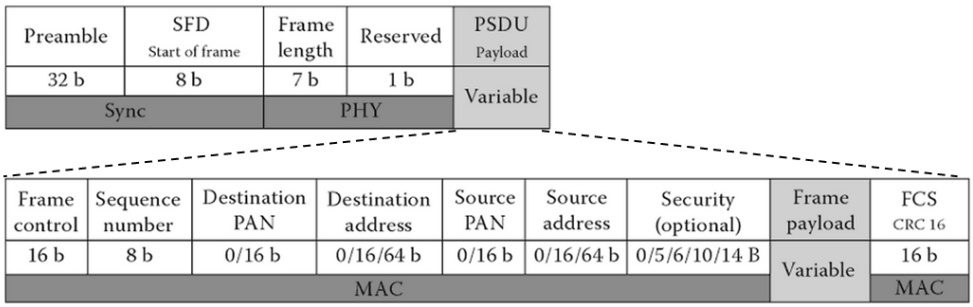


Figure II-12 : La structure générale d'une trame radio ZigBee

BY-NC-ND

Dans la technologie ZigBee, le spectre utilisé dans la bande 2,4 GHz est constitué de 16 canaux espacés de 5 MHz et chaque canal fait 2 MHz de largeur, mais l'espacement et l'emplacement des canaux pour ZigBee impliquent que seulement quatre canaux n'interférent pas avec le Wi-Fi (Figure II-13). En règle générale, les canaux 1, 6 et 11 sont les canaux de communication par défaut du Wi-Fi. Avec un débit de seulement 250 kbps en 2,4 GHz et l'impossibilité de faire des sauts de fréquence adaptatif AFH (Adaptative Frequency Hopping), ZigBee a des risques considérables de pertes paquets [53].

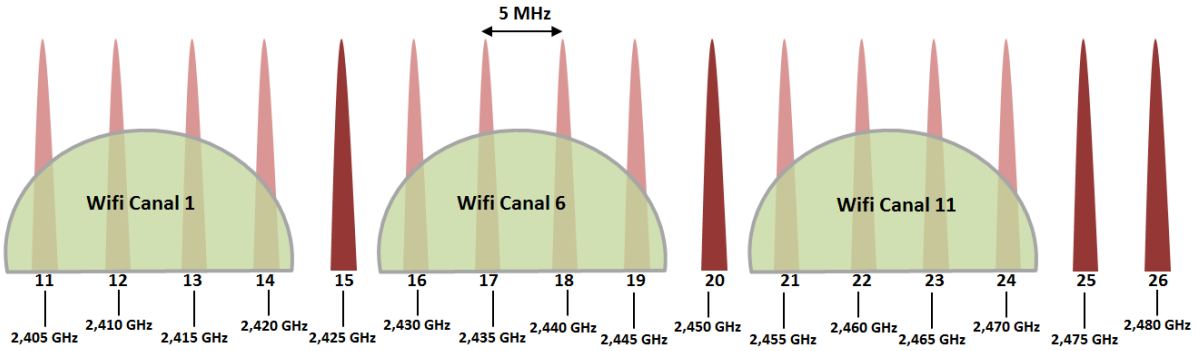


Figure II-13 : La répartition des canaux ZigBee sur la bande 2,4 GHz et leur coexistence avec le Wi-Fi

Les canaux ZigBee sont séparés de 5 MHz, gaspillant ainsi considérablement le spectre de fréquences disponible. En outre, ZigBee n'étant pas une technologie de saut de fréquence, il est donc toujours nécessaire de faire une planification minutieuse lors du déploiement afin de s'assurer qu'il n'y aura pas d'interférence avec d'autres systèmes.

Par ailleurs, ZigBee suit une topologie étoile ou maillée. Les exigences de basse consommation d'énergie dépendent du type de nœud, il faut donc prendre en compte les indications fondamentales imposées dans la spécification de ZigBee et la façon dont le nœud est alimenté (batterie ou secteur). Il existe trois types de nœuds dans un réseau ZigBee (Figure II-14):

- **Le coordinateur PAN (Personal Area Network) :** Le coordinateur constitue le « nœud maître » et le cœur même du réseau ZigBee. Il est responsable du démarrage du réseau et de la gestion d'un certain nombre de paramètres. Le coordinateur est généralement alimenté par le secteur car il génère et reçoit beaucoup de trafic radio et doit toujours assurer un fonctionnement continu de l'ensemble du réseau.
- **Le routeur :** Il est placé entre le coordinateur et le nœud terminal de telle sorte à ce qu'il transmette les paquets de données d'un réseau à un autre. Il permet d'étendre la couverture du réseau et le rend également plus flexible. Comme ils sont sujet à un trafic radio très actif, les routeurs sont aussi alimentés par le secteur.
- **Le nœud terminal (end-device) :** Il s'agit du nœud « esclave » du réseau, il collecte les données à intervalles réguliers ou sur demande. Ces nœuds sont, dans la plupart des cas, alimentés par batterie et passent la majorité de leur temps en mode « veille ». Un nœud

BY-NC-ND

terminal se réveille par un Timer ou un événement extérieur (interruption) pour recevoir les données d'une source externe (capteur par exemple) et l'envoie au nœud de collecte (routeur ou coordinateur). Les commandes transmises vers un nœud terminal en mode veille peuvent être mises en attente au niveau du routeur le plus proche pour ensuite être transmises quand le nœud sera réveillé.

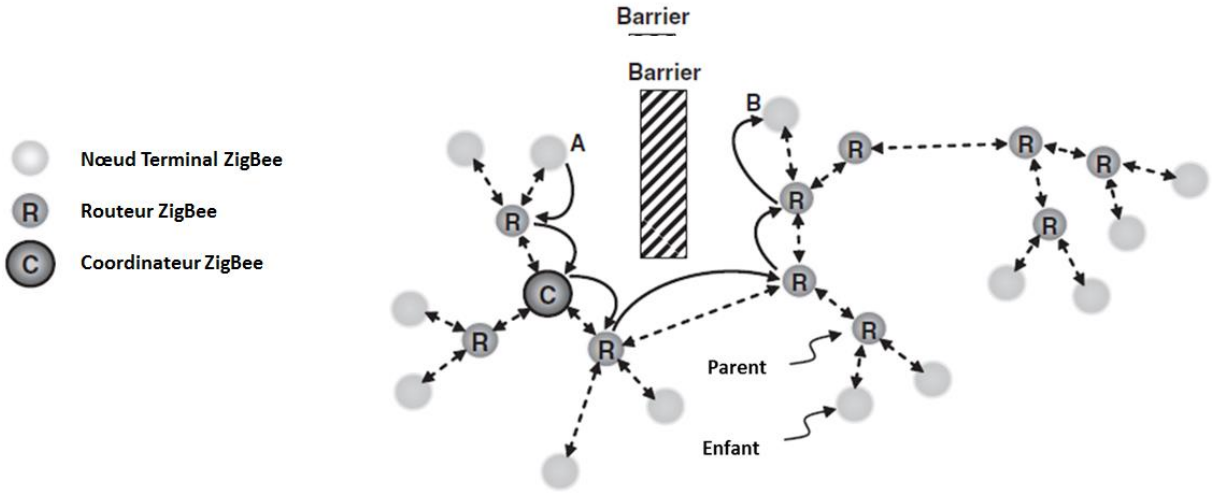


Figure II-14 : Les types de nœuds dans un réseau maillé ZigBee

En raison des normes de profils fragmentés de ZigBee : Smart Energy, Home Automation, Light Link, Santé et Building Automation, pour n'en citer que quelques-uns, plusieurs de ces profils ne sont pas compatibles les uns avec les autres. De plus certains fabricants choisissent de créer leur propre profil propriétaire. Cela signifie donc que même si un produit porte le logo ZigBee, il n'est pas garanti de fonctionner avec d'autres appareils portant aussi le logo. Pour remédier à ce problème, une nouvelle version 3.0 de ZigBee est sortie en 2016 [54]-[55], celle-ci a pour objectif de fournir une norme ZigBee unificatrice qui simplifierait le développement des produits tout en réduisant la fragmentation de l'industrie en rendant les produits interopérables quel que soit le fabricant.

II.3.2.2. Les mécanismes de robustesse de ZigBee

ZigBee utilise plusieurs mécanismes pour faire face aux interférences radio ou aux mauvaises conditions de transmission / réception pour ainsi assurer des communications radio fiables.

a) Modulation et étalement de spectre DSSS

ZigBee 2,4 GHz est basé sur la couche physique 2450 MHz du standard 802.15.4, qui utilise la modulation à quadrature de phase à décalage Offset-QPSK combiné à la technique d'étalement de spectre DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) [56] qui convertit chaque symbole de 4 bits en 32 Chips pour atteindre un débit de 250 kbit/s. En pratique, à l'émission, le signal utile subit d'abord une modulation primaire à bande étroite O-QPSK puis une modulation secondaire qui étale le spectre. Cet étalement est obtenu en multipliant le signal primaire modulé à un signal pseudo-aléatoire de rythme plus élevé défini par un code appelé PN (Pseudo Noise). En conséquence, le signal résultant occupe

BY-NC-ND

une bande de fréquences plus large (Figure II-15). A la réception le signal reçu subit la procédure inverse pour récupérer le signal à bande étroite avant de le filtrer.

Le but du DSSS est, d'une part, de rendre les signaux occupant une fréquence donnée plus résistants aux brouillages et aux interférences, et d'autre part, de permettre à plusieurs équipements de partager la même fréquence porteuse en utilisant des codes différents (CDMA : Code Division Multiple Access). Étant donné que le signal est étalé sur une plus grande largeur de bande, les interférences à bande étoile ne bloquent qu'un pourcentage plus faible du signal global utile, permettant ainsi au récepteur de récupérer le signal.

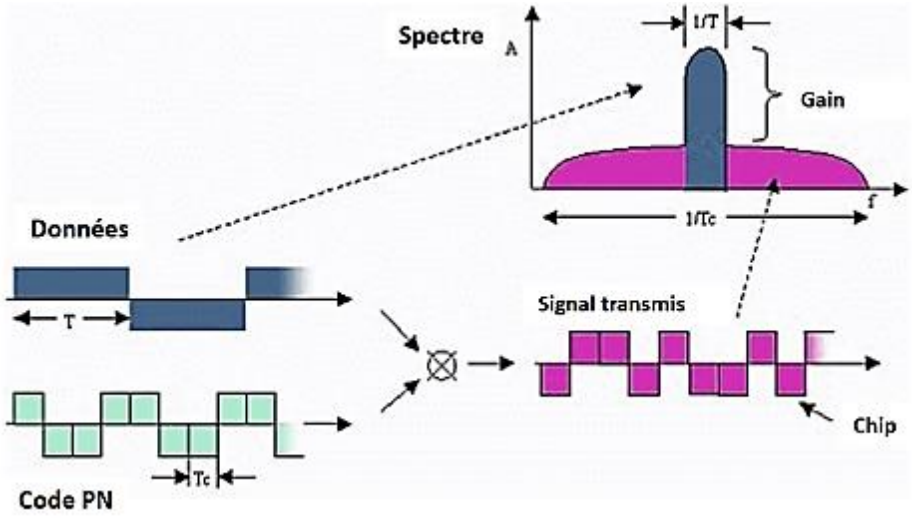


Figure II-15 : La technique d'étalement de spectre DSSS

b) Le CSMA-CA (slotté et non-slotté)

Quand le réseau Zigbee est mis en route par le coordinateur, celui-ci se charge de choisir le canal le moins perturbé, et cette fréquence est utilisée par la suite dans tous les échanges RadioFréquences du réseau. Une fois la fréquence choisie, ZigBee utilise la méthode du CSMA-CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) pour éviter les collisions de trames en s'appuyant sur la détection de porteuse.

Deux mode de CSMA/CA sont possibles dans ZigBee. Le premier est le mode non-balisé, en anglais non-Beacon Enabled ou unslotted mode, où il n'y aucune synchronisation entre les nœuds du réseau. Ceux-ci doivent donc se réveiller périodiquement ou scanner le canal radio en permanence pour savoir s'il y a des trames en attente. Ce mode est plus adapté aux applications où les nœuds n'ont pas de contrainte énergétique (alimentation par secteur). Dans ce mode, il suffit de détecter que le canal est libre une seule fois pour commencer la transmission. Son fonctionnement est par ailleurs basé sur trois paramètres essentiels : *NB*, *BE* et *CW*. *NB* (Number of Backoffs) est le nombre de fois où le dispositif a appliqué l'algorithme pour essayer de transmettre la trame courante, *BE* (*Backoff*

BY-NC-ND

Exponent) est l'exposant de *backoff* qui définit la longueur de l'intervalle dans lequel il faut tirer un *backoff*. *CW* (Contention Window) définit le nombre de périodes de *backoffs* consécutives à la fin desquelles le canal doit être détecté libre avant de commencer la transmission. Les différentes étapes du CSMA/CA non-slotté sont présentées dans la Figure II-16. L'algorithme commence par la phase d'initialisation en mettant *BE = macMinBE* et *NB = 0*. Puis, on tire aléatoirement un nombre entier de périodes de *backoff*. Après la consommation de ce *backoff*, la couche MAC demande à la couche PHY d'effectuer un CCA. Si la couche PHY détecte le canal libre, la couche MAC commence la transmission. Sinon, la couche MAC incrémente *NB* et *BE* (à condition que *BE* reste inférieur ou égale à *macMaxBE*). Si *NB* < *macMaxCSMABackoffs*, l'algorithme revient au tirage de *backoff*. Si *NB* = *macMaxCSMABackoffs*, l'algorithme renvoie un diagnostic d'échec d'accès. C'est alors à la couche MAC de demander une retransmission de la même trame tant que le nombre de tentatives est plus petit que *macMaxFrameRetries* (*macMaxFrameRetries* vaut 3 par d´défaut).

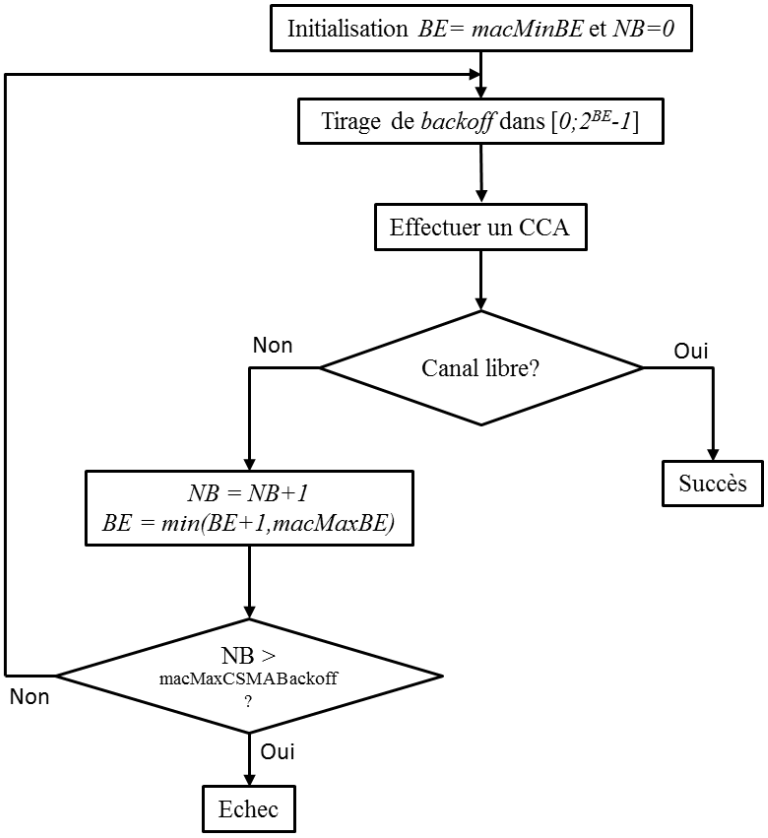


Figure II-16 Algorithme du CSMA-CA non-slotté

Le deuxième mode de CSMA-CA qu'utilise ZigBee est le mode balisé, en anglais Beacon Enabled ou Slotted mode, où une synchronisation est nécessaire entre les différents nœuds. Ceux-ci doivent suivre une procédure périodique d'envoi de petites trames appelées Beacons par le coordinateur vers les nœuds pour établir la synchronisation et fournir toutes les données nécessaires au bon fonctionnement du réseau, comme par exemple l'ID du réseau, le temps du prochain Beacon, les trames en attente au niveau du coordinateur, etc. Dans ce mode, deux détections successives de canal

BY-NC-ND

libre sont nécessaires pour commencer la transmission de la trame. Le fonctionnement d'un dispositif ZigBee avec CSMA-CA slotté peut être modélisé par une chaîne de Markov, comme illustré sur la Figure II-17 [57]. Chaque état du modèle représente l'écoulement d'une période de backoff. La chaîne est composée de **m** étages de backoff. Chaque étage est constitué de W**m** − 1 états de décrémentation de backoff. Un backoff est tiré aléatoirement dans une fenêtre [0, W**m** − 1]. Quand un backoff **b** ϵ [0, W**m** − 1] est tiré à l'étage **k** l'état est (**k**, **b**). Le backoff tiré est décrémenté progressivement et l'état change à (**k**, **b−1**), puis (**k**, **b−2**), ... jusqu'à (**k**,**1**). Une fois l'état (**k**,**1**) est atteint, ou bien qu'un backoff de 0 est tiré, la première vérification de canal CCA (Clear Channel Assesment), est effectuée, ce qui est représenté par l'état (**k**, **CCA₁**). En fonction de la disponibilité du canal, un état occupé est constaté avec une probabilité **α** et un état libre est constaté avec une probabilité **1 − α**. Si le canal est occupé, un nouveau backoff est tiré aléatoirement dans la fenêtre [**0**, W**m** − 1] et l'étage **k** est incrémenté à **k + 1**. Si le canal est libre, un second CCA est effectué (représenté par l'état (**k**, **CCA₂**)). Le canal est occupé avec une probabilité **β** et libre avec une probabilité **1 − β**. Si le canal est occupé suite au second CCA, un nouveau backoff est tiré dans l'étage **k + 1**. Si le canal est libre, la transmission peut alors commencer.

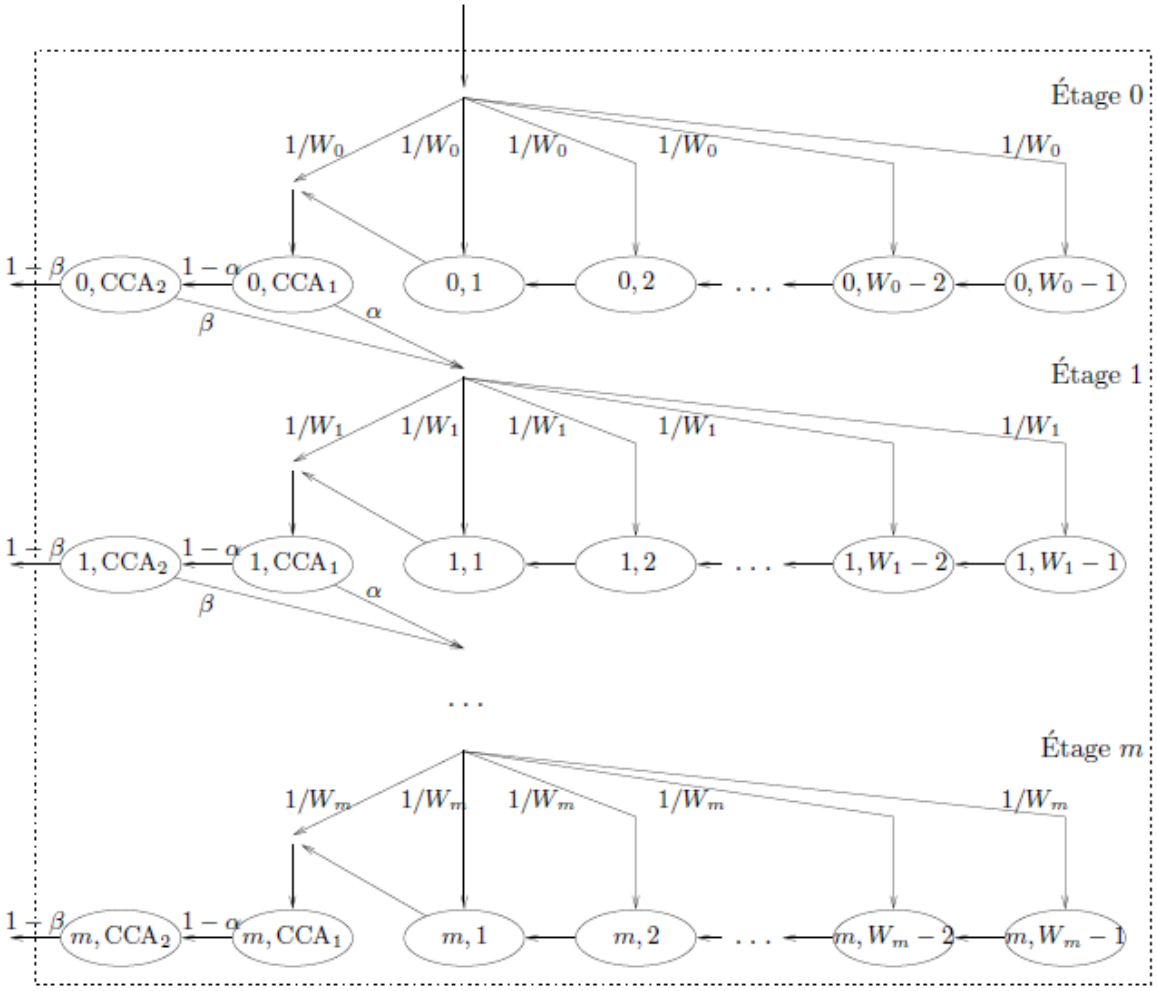


Figure II-17 : Diagramme de Markov décrivant l'algorithme du mécanisme CSMA-CA en ZigBee

BY-NC-ND

c) Request to Send / Clear to Send (RTS / CTS)

Le noeud ne transmet pas tout de suite la trame de données mais un message appelé « Request To Send » (RTS), une courte trame demandant la permission d'émettre, contenant des informations comme la source, le destinataire, la quantité de données et la durée d'occupation du canal. Si le destinataire répond par une trame « Clear To Send » (CTS, signifiant que la voie est libre pour émettre), le nœud commence alors immédiatement l'émission de la trame de données. Tous les nœuds avoisinants patientent pendant un temps calculé à partir du CTS (ou du RTS, mais tous les voisins ne reçoivent pas forcément le RTS de la station émettrice en raison des rayons de portée).

Cette technique permet de remédier en partie au problème du nœud caché, illustré Figure II-18. Elle est également utilisée dans les réseaux IEEE 802.11 pour la même raison [58]. En effet, les travaux dans [59] ont montré que l'absence du RTS/CTS dans le cas du scénario du nœud caché peut augmenter la probabilité de collisions de trames à 59%. Dans un scénario pareil, le mécanisme d'écoute de canal ne suffit plus car le nœud A et le nœud C peuvent transmettre en même temps sans s'écouter mutuellement (hors portée). En effet, si le nœud A commence à transmettre sa trame de données à B (car il pense que le canal libre), tandis que le nœud C émet également sa trame, que ce soit à B ou à un autre nœud dans le réseau, les trames collisionneront dans l'espace au niveau du nœud B. En revanche en utilisant la technique du CTS-RTS, lorsque A voudra transmettre sa trame de données à B et envoie un RTS et B répond par un CTS, le nœud C et tout autre nœud dans la zone de couverture de A et B sera notifié que le canal sera occupé pendant toute la durée spécifiée dans la courte trame de RTS/CTS envoyé. Bien sûr, il existe toujours une probabilité que les nœuds A et C envoient leurs RTS en même temps et qu'ils collisionnent au niveau de B, mais alors ni A ni C ne recevraient de CTS et ils sauraient, chacun de leur côté, qu'un autre nœud essaye d'émettre sa trame. Ce mécanisme diminue significativement les pertes de trames dûes aux collisions, en particulier quand il s'agit de trames longues.

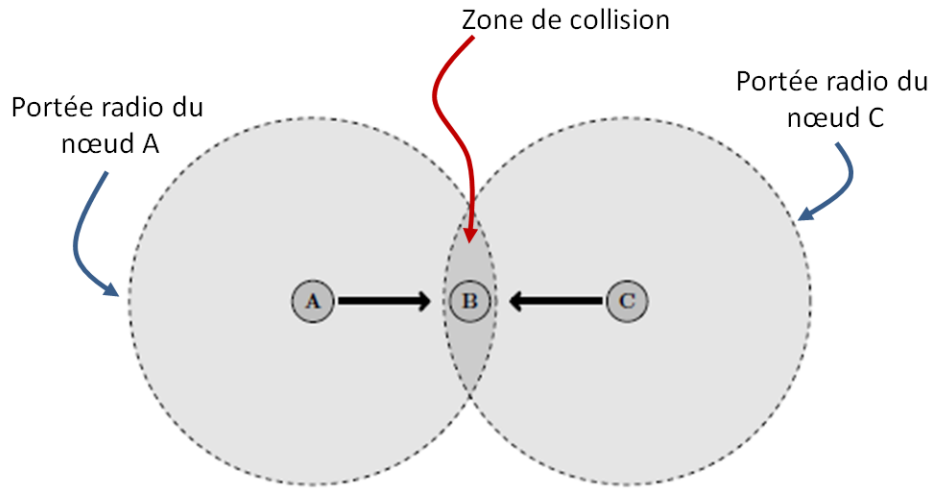


Figure II-18 : Illustration du problème du nœud caché

BY-NC-ND

d) Acquittement et retransmission

Un mécanisme acquittement de trame est également intégré dans le protocole Zigbee pour s'assurer que les messages atteignent leurs destinations ; quand un message est reçu, le dispositif de réception envoie un accusé de réception. Si l'émetteur ne reçoit pas d'accusé de réception dans un certain intervalle de temps, il peut renvoyer la trame à plusieurs reprises jusqu'à ce que le message soit reçu.

Dans une topologie de maillage, le réseau a une autre intelligence intégrée pour s'assurer que les messages atteignent leurs destinations grâce à la possibilité pour le signal de prendre un autre chemin le conduisant au nœud terminal si le chemin initial est interrompu à cause d'une panne de produit ou d'une perturbation.

En résumé dans la norme ZigBee, les mesures anti-interférences suivantes sont disponibles :

- La modulation O-QPSK et la technique d'étalement de spectre DSSS.
- Scans d'énergie - les 16 canaux de ZigBee sont tous analysés pour mesurer l'énergie dans chaque canal - indication qu'un autre produit / réseau utilise cette fréquence. Les résultats sont utilisés pour créer un réseau dans une fréquence où il y a peu ou pas de perturbations.
- Carrier Sense Multiple Access with collision avoidance (CSMA-CA) - avant chaque transmission, un dispositif écoute le canal pour voir s'il y a d'autres activités en cours. Si oui, il retarde la transmission jusqu'à ce que le canal soit libre. Si le canal est libre, une deuxième écoute de canal est effectuée. Si à ce moment-là le canal est libre la transmission passe « immédiatement ».
- Acquittement – L'acquittement est disponible sur les couches MAC et Application. Il peut être utilisé pour s'assurer que le destinataire a bien reçu le message.
- Répétition de trames- en combinaison avec les acquittements, les répétitions sont utilisées pour retransmettre des messages qui n'ont pas été reçus.
- Changement de canal – La fonctionnalité existe pour déplacer un réseau à un nouveau canal pour opérer dans un canal moins perturbé.

II.3.3. Bluetooth Low Energy (BLE)

II.3.3.1. Description

Le Bluetooth est un standard de communication sans fil, créé en 1999 par le Bluetooth SIG (Special Interest Group), permettant un échange de données à courte distance et utilisant la bande de fréquences ISM 2,4 GHz. Plusieurs versions du standard se sont succédées depuis sa création avant de donner naissance, en 2010, au Bluetooth version 4.0 intégrant Bluetooth Low Energy (BLE) ou

BY-NC-ND

commercialement sous « Bluetooth Smart » [60]. C'est la version la plus récente de la technologie Bluetooth. Elle inclut une fonctionnalité de faible énergie et permet d'optimiser les durées de vie des produits fonctionnant sur piles. Le BLE ne consomme qu'une fraction de l'énergie de la technologie Bluetooth classique et représente le socle de la nouvelle vague de terminaux Bluetooth Smart utilisé pour l'IoT qui ont fait leur apparition sur le marché. Ces nouveaux produits sont destinés à des marchés comme la santé, le sport et le fitness, la sécurité, le divertissement à domicile, mais aussi au marché du Home & Building Automation.

Par ailleurs, l'organisation Bluetooth SIG a récemment annoncé que le BLE connaitra une nouvelle évolution vers ce qu'ils ont appellé « Bluetooth Smart Mesh », une norme qui sera dédiée à l'internet des objets et qui permettra d'avoir un réseau en topologie maillé au lieu de la topologie étoile actuellement adapté par les réseaux BLE [61].

La Figure II-19 représente un schéma de la stack du protocole BLE. Au niveau de la couche Physique, à la différence du Bluetooth classique qui utilise 79 canaux séparés de 1 MHz, le Bluetooth LE fonctionne dans la bande utilise seulement 40 canaux espacés de 2 MHz. Les canaux sont numérotés de 0 à 39 à partir de la fréquence 2402 MHz. BLE a un débit de 1 Mbps et utilise une modulation GFSK avec un indice de modulation dans la plage comprise entre 0,45 et 0,55, ce qui permet la consommation de puissance de crête réduite. La sensibilité du récepteur définie dans BLE est le niveau du signal à la réception pour lequel un taux d'erreur binaire (TEB) de 10^{-3} est atteint. Les mandats de spécification BLE annoncent une sensibilité meilleure ou égale à -70 dBm. La portée est généralement d'une dizaine de mètres.

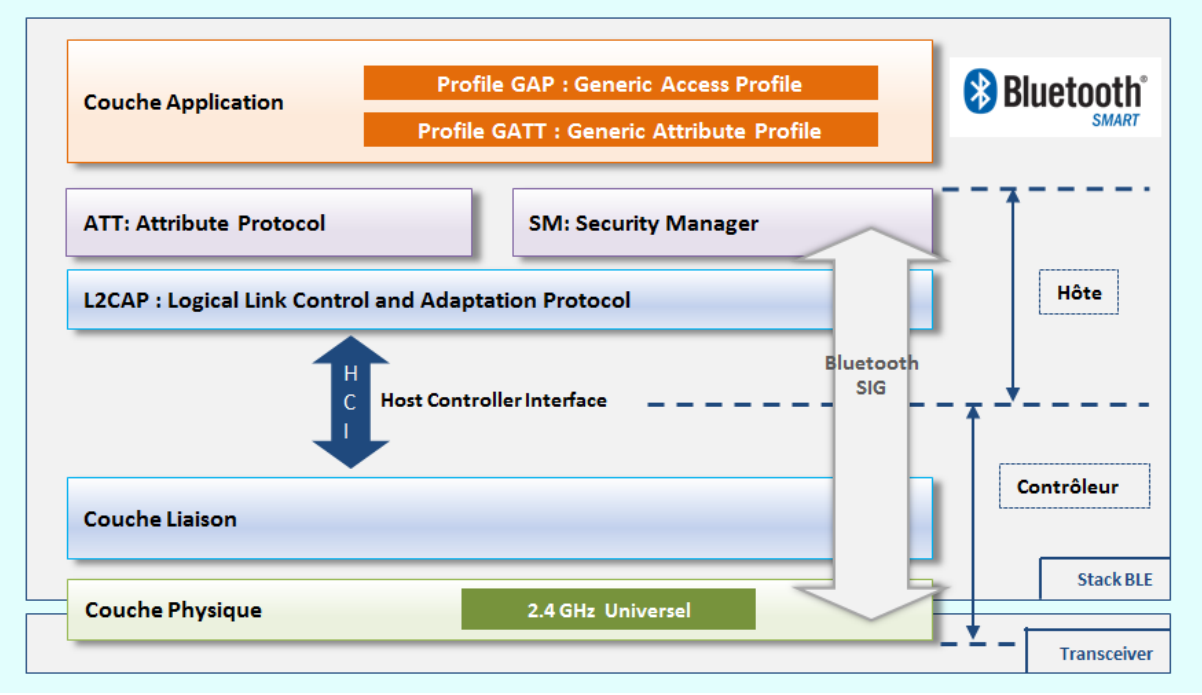


Figure II-19 : La stack du protocole Bluetooth Low Energy

BY-NC-ND

Au niveau du spectre radio, trois parmi les 40 canaux du BLE sont appelés « Advertising Channels » ; ils permettent la découverte de périphérique et l'établissement d'une éventuelle connexion. Les fréquences centrales qui ont été attribués à ces canaux minimisent les chevauchements avec les canaux 1, 6 et 11 de la norme IEEE 802.11 couramment utilisée dans plusieurs pays (Figure II-20).

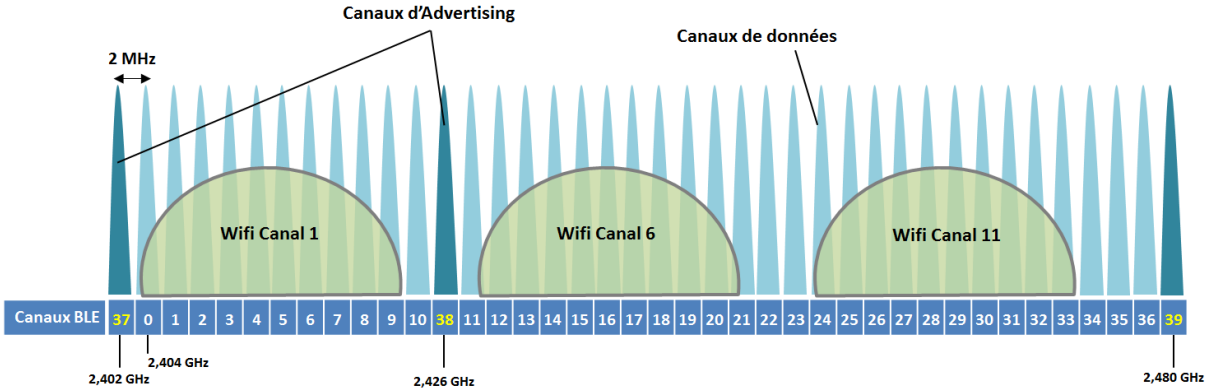


Figure II-20 : La répartition des canaux BLE sur la bande 2,4 GHz et leur coexistence avec le Wi-Fi

Après que le périphérique soit découvert et connecté, les 37 canaux restants sont utilisés pour une communication bidirectionnelle entre les périphériques connectés et donc pour la transmission de données.

Comme le Bluetooth classique, le Bluetooth LE utilise le saut de fréquence, mais celui-ci est adaptatif. Ce mécanisme est utilisé au-dessus des canaux de données pour faire face à des problèmes de propagation sans fil (interférences, fading, multipath, etc…). Ce mécanisme sélectionne l'un des 37 canaux disponibles pour la transmission de données pendant un intervalle de temps donné.

La couche liaison dans un dispositif BLE se compose de six états possibles (Figure II-21) : Stand-by, Advertiser, Scanner, Initiator, Master et Slave.

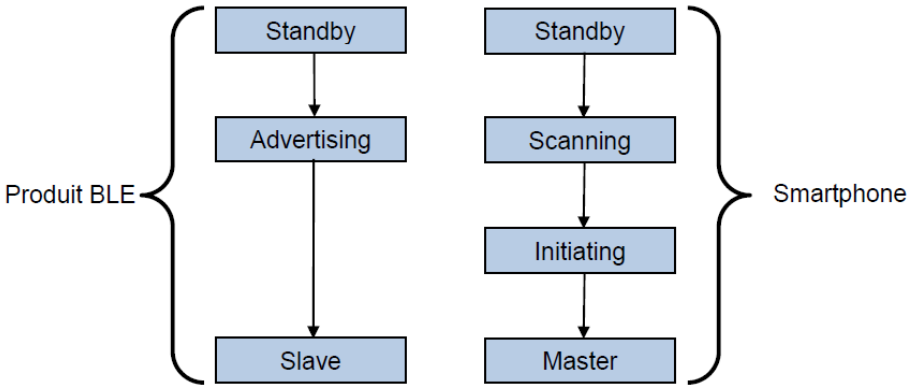


Figure II-21 : Les différents profils d'un périphérique BLE

BY-NC-ND

En mode Advertiser, le dispositif BLE transmet périodiquement des informations d'Advertisement sous forme de paquets par le biais des canaux appelés « Advertising Channels » ; il peut également répondre en transmettant plus d'informations sur demande d'autres appareils.

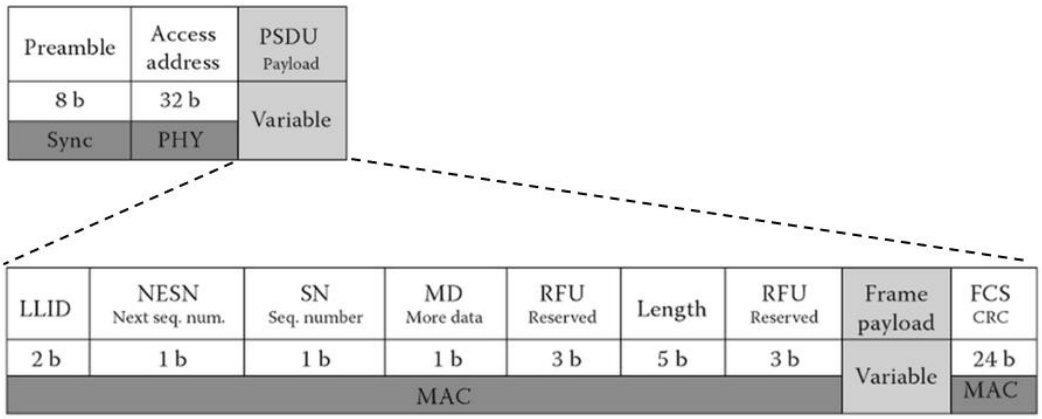


Figure II-22 : La structure globale d'une trame Bluetooth Low Energy

La transmission des paquets, dont la composition est présentée Figure II-22, se fait à travers des canaux appelés « Advertising Channels » dans des intervalles de temps appelés « Advertising Event » comme illustré sur le schéma Figure II-23. Dans un « Advertising Event », l'Advertiser utilise séquentiellement chacun des 3 Advertising Channels pour la transmission de paquets. Le temps minimum entre deux « Advertising Event » est appelé « Advertising Interval » dont la valeur est entre 20 ms et 10,24 s. La période appellé « Advertising Delay » correspond au retard généré par la couche liaison, il a une durée de temps pseudo-aléatoire qui varie entre 0 ms et 10 ms. Il est ajouté à l'Advertising Interval avant L'Advertising Event suivant, et ce, afin d'éviter le chevauchement entre plusieurs périphériques.

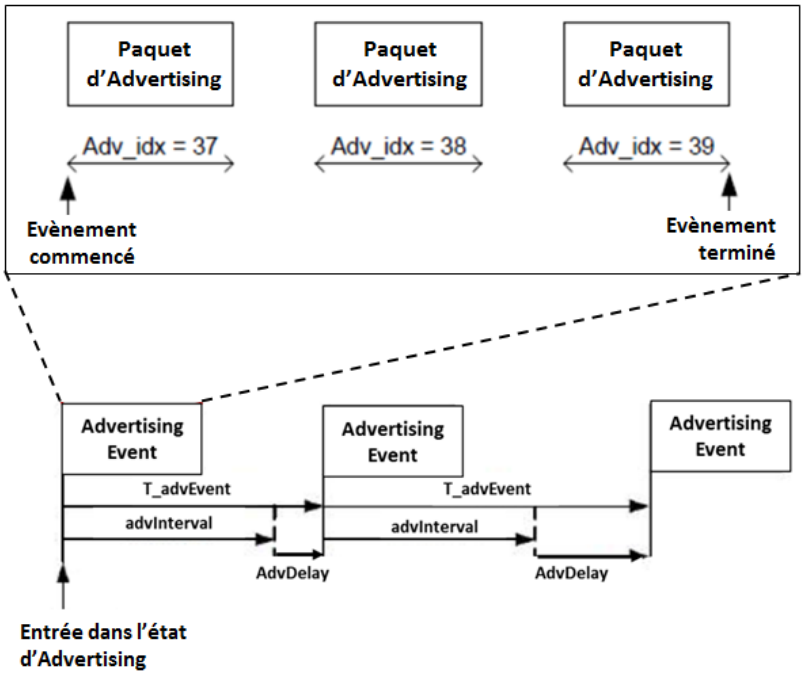


Figure II-23 : Les différentes opérations réalisées pendant une séquence d'Advertising

BY-NC-ND

Les produits qui ne font que balayer les fréquences et recevoir les données via les « Advertising Channels » sont appelés « scanners ». Ils sont à l'écoute des données d'Advertisement transmises par d'autres dispositifs et peuvent demander des données supplémentaires si le mode « Scan Actif » est activé (Figure II-24). Un appareil fonctionnant en Scanner-Only fonctionne en mode passif, il ne fait qu'écouter les paquets d'Advertisement.

Pour établir une connexion, le premier produit doit être en mode « Advertiser » (et permettre une connexion) et le deuxième produit doit être en mode « Initiator ». Le mode « Initiator » est similaire au mode « Scanner », mais avec l'intention d'établir une connexion. L'Initiator scanne le paquet d'Advertisement et envoie ensuite une requête de connexion appelé « Connection Request » (Figure II-25).

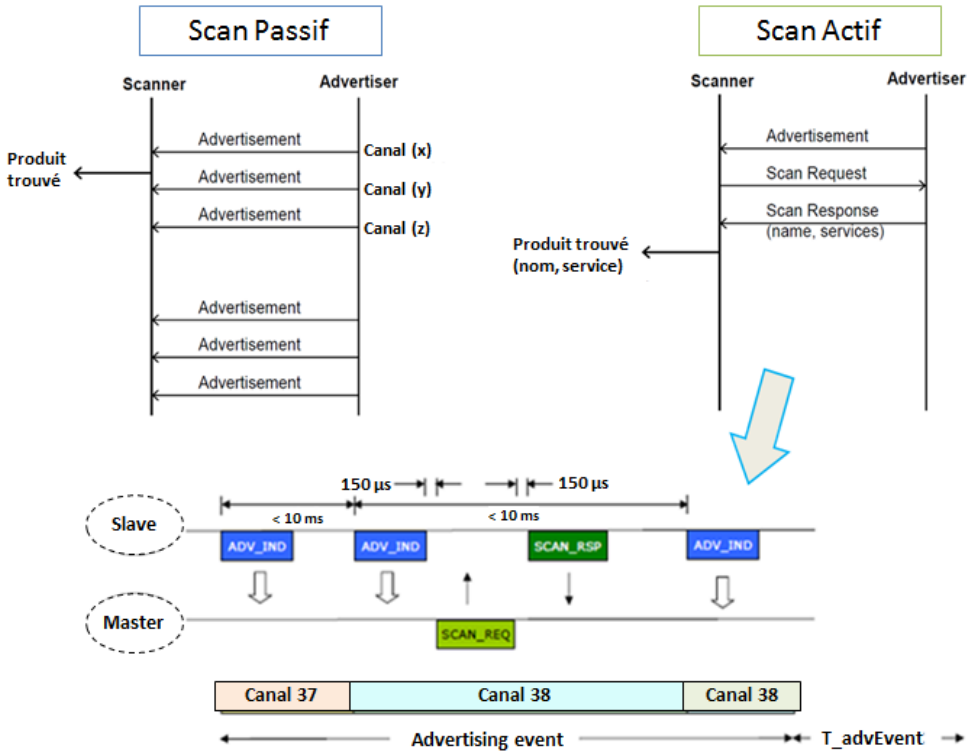


Figure II-24 : Le scan actif et le scan passif en Bluetooth LE

Une fois la connexion établie, l'Initiator assume le rôle de « Master » et l'Advertiser devient un « Slave ». Le Master peut être connecté à plusieurs Slaves, alors que chaque Slave ne peut être connecté qu'à un seul Master. Ainsi, le réseau constitué par un Master et les Slaves, qui est appelé un (Pico-Net), suit une topologie en étoile. A la différence du Bluetooth classique où le nombre de produits esclaves maximum est limité à sept, le BLE lui peut en avoir plus. La limitation du nombre d'esclaves n'étant pas définie dans la spécification du Bluetooth LE, celle-ci est donc considérée donc comme infinie. Par conséquent, ce sont les fabricants de smartphones, de tablettes et autres qui définissent cette limitation.

BY-NC-ND

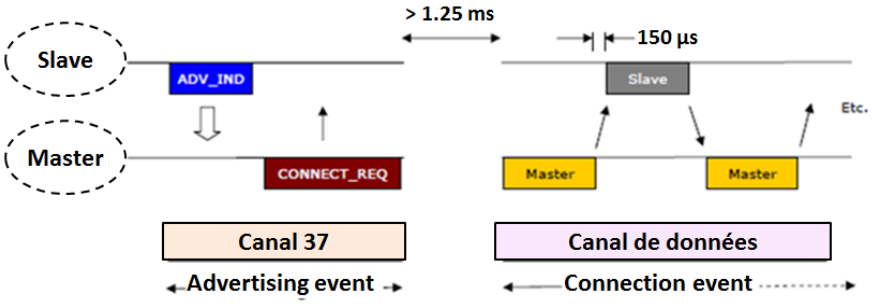


Figure II-25 : Etablissement de la connexion et les échange de données entre le Master et le Slave

Les Slaves sont en veille la majorité du temps et se réveillent de façon périodique pour émettre leurs données. Cette approche asymétrique de Bluetooth LE permet à ce type de produits d'être alimenté par piles et d'avoir un faible coût. Le Master, quant-à-lui, est alimenté par secteur ou batteries rechargeables, cela peut être un Smartphone ou une tablette. Ces produits ont beaucoup plus de puissance de calcul et peuvent donc prendre en charge un certain nombre de connexions simultanées avec différents Slaves.

Toutes les communications entre les deux appareils connectés se produisent dans des événements appelés « Connexion Events ». Le Master détermine les instants où les Slaves doivent écouter, et coordonne ainsi l'accès au support en utilisant un Time Division Multiple Access (TDMA). Il fournit également aux Slaves les informations nécessaires à l'algorithme de saut de fréquence (y compris le plan des canaux de données à utiliser) et la supervision des connexions. En outre, les données envoyées par le Master vers le Slave spécifient deux paramètres importants : l'intervalle de connexion « Connection Interval » et la latence des Slaves « Slave Latency ». L'intervalle de connexion détermine le temps écoulé entre les débuts des séquences d'échanges de paquets de données « Connexion Events ». Ces événements ont lieu périodiquement et peuvent se produire même quand le Master et le Slave n'ont aucune donnée à transmettre. La latence, d'autre part, est le nombre d'intervalles de connexion « Connection Intervals » qu'un Slave peut ignorer sans perdre la connexion. Il donne au Slave la possibilité d'optimiser et de conserver sa consommation d'énergie. Une fois la connexion établie, le dispositif Master peut demander une mise à jour des paramètres de communication pour mieux répondre aux demandes des dispositifs Slaves.

II.3.3.2. Les mécanismes de robustesse de BLE (mécanismes de basculement entre profil)

a) L'étalement de spectre par saut de fréquence FHSS

L'étalement de spectre par saut de fréquence (FHSS : Frequency Hopping Spread Spectrum) est une méthode de transmission qui exploitent plusieurs canaux (sous-porteuses) répartis dans une bande de fréquences selon une séquence pseudo-aléatoire connue de l'émetteur et du récepteur.

BY-NC-ND

Le FHSS offre certains avantages par rapport à l'utilisation d'une fréquence unique comme la résistance aux interférences, la difficulté d'intercepter le signal et la possibilité de partager la bande de fréquences avec d'autres systèmes.

Dans la version du Bluetooth classique, la bande radio de 2,4 GHz est divisée en 79 canaux de 1MHz chacun et un nouveau canal est choisi toutes les 625 µs ce qui correspond à 1600 sauts par seconde. Le Bluetooth Low Energy quant à lui, fait également un saut de fréquence toutes les 625 µs mais sur 40 canaux de 2 MHz de largeur de bande. Chaque paire de nœuds BLE communicants possède son propre schéma de sauts de fréquence qui est déterminée lors de la connexion initiale et choisie de manière à éviter des conflits de connexion. Le saut de fréquence minimise les problèmes d'interférences du BLE avec d'autres protocoles radio fonctionnant dans la même bande ou d'autres sources d'interférences telle que le Wi-Fi. La bande passante étroite et la fonctionnalité de saut de fréquence fournissent également une bonne performance contre les multi-trajets dans les environnements où il y a beaucoup d'obstacles. La Figure II-26 illustre l'idée derrière les sauts de fréquence.

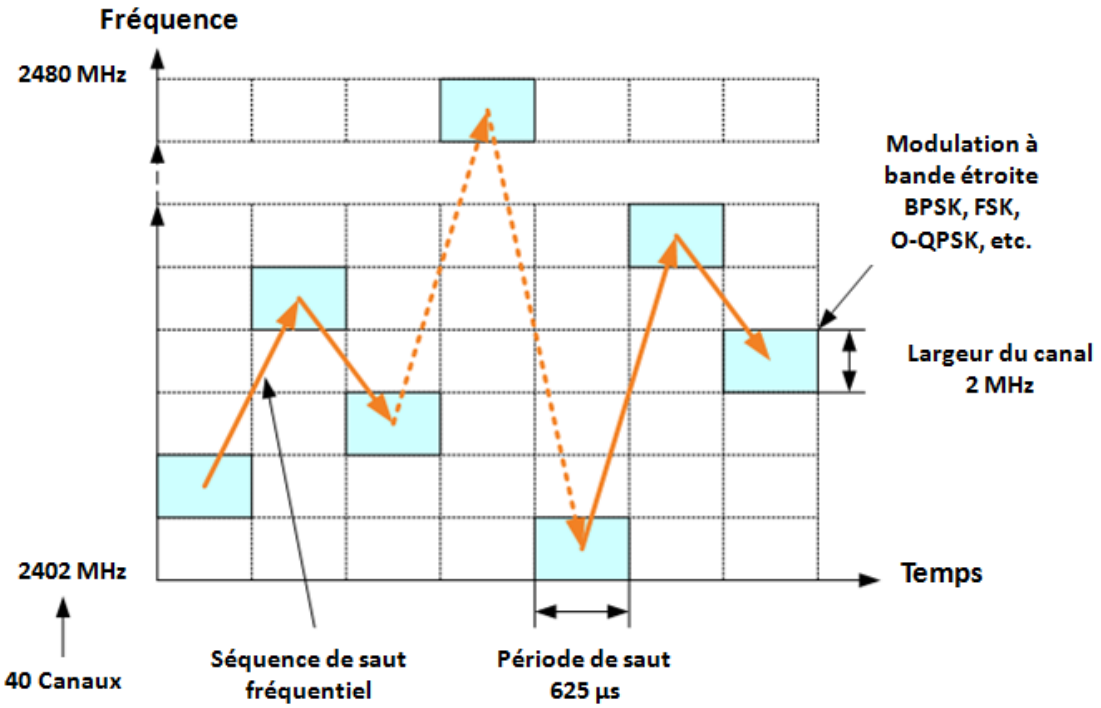


Figure II-26 : La technique d'étalement de spectre FHSS en Bluetooth LE

b) Les sauts de fréquence adaptatifs / Adaptive Frequency Hopping (AFH)

Le Bluetooth classique aussi bien que le Bluetooth Low Energy appliquent la fonction de saut de fréquence adaptatif AFH pour détecter les canaux potentiellement sujets aux interférences, par exemple dans le cas où il y aurait un réseau local sans fil LAN 802.11 b, g, n qui opère à proximité. Si des interférences arrivent sur un canal, celui-ci est automatiquement mis dans une liste noire. Afin de

BY-NC-ND

gérer les interférences temporaires, un mécanisme mis en place réessaye les canaux de la liste noire. S'il s'avère que la perturbation a cessé, le canal peut être réutilisé. Il est également possible de choisir à l'avance les canaux qui ne seront pas utilisés (planification de fréquences) afin d'éviter les interférences avec d'autres systèmes sans fil déjà existant dans le même environnement que le BLE.

c) La correction d'erreur (FEC)

Le Bluetooth classique supporte à la fois les corrections d'erreurs directes (FEC : Forward Error Correction) et les retransmissions de paquets. Deux codes FEC différents sont utilisés dans le Bluetooth, le premier à un taux de codage de 1/3 et le deuxième a un taux de codage de 2/3. Le code 1/3 est toujours utilisé pour l'en-tête du paquet. Pour les données d'applications, le code 2/3 est utilisé si demandé par l'application. Ces codes sont des codes de Hamming raccourcis qui peuvent automatiquement corriger un seul bit erroné et détecter jusqu'à 2 bits erronés.

Après qu'une erreur soit détectée, une demande de répétition automatique de paquet ARQ (Automatic Repeat Request) est appliquée. Chaque charge utile de paquet contient un contrôle de redondance cyclique CRC de 24 bits pour détecter les erreurs. Chaque paquet transmis contient un bit indiquant que la trame a été reçue ou pas par le destinataire (ACK / NAK). La retransmission est faite si les paquets sont perdus ou non-acquittés. Cette procédure permet de fiabiliser la transmission de données. Par ailleurs, l'utilisation de codes correcteurs d'erreurs permet de diminuer le nombre de trames retransmises et donc d'augmenter le rendement du système en termes de trames effectivement reçues.

Comme dans le Bluetooth classique, deux formes de paquets avec et sans FEC peuvent être utilisées, il est ainsi possible de configurer le lien pour choisir des paquets avec FEC. Sachant que le nombre de retransmissions est également affecté par la taille des paquets utilisés, dans certains environnements et applications, il peut être plus efficace pour forcer le système à n'utiliser que de petits paquets.

BY-NC-ND

II.3.4. EnOcean

II.3.4.1. Description

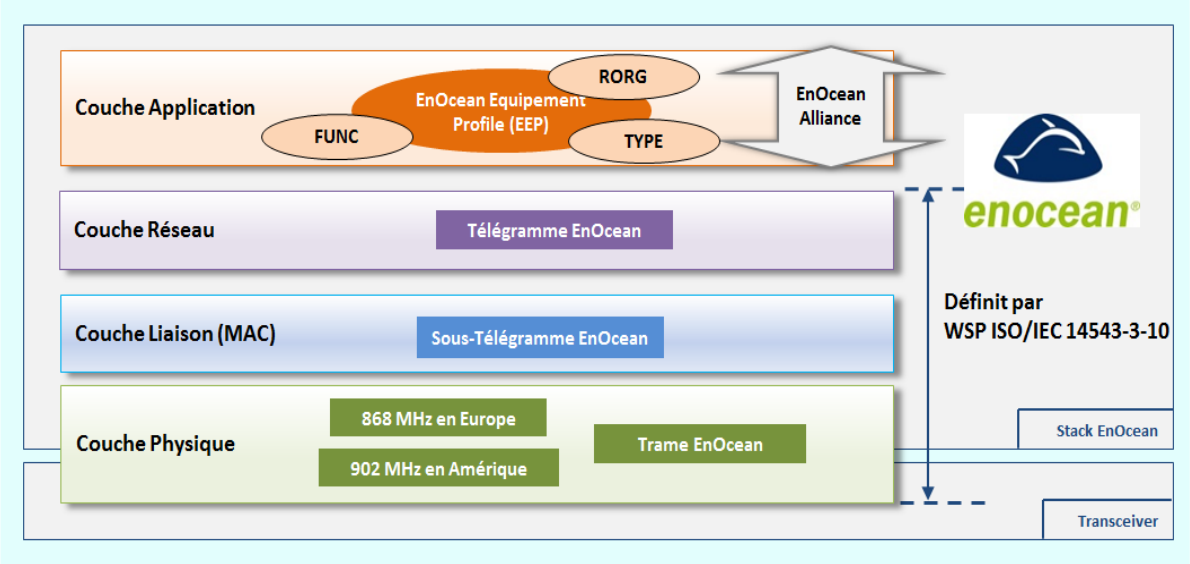


Figure II-27 : La stack du protocole EnOcean

EnOcean [62] est un standard RadioFréquences ouvert normalisé ISO / IEC 14543-3-10, également connu sous le nom de Wireless Short Protocol (WSP), protocole optimisé pour la récupération d'énergie (Energy Harvesting) dédié aux applications du HBA. EnOcean était à la base fondé par Siemens AG en 2001, et en 2008, un grand nombre de compagnies se sont regroupées afin de former la EnOcean Alliance (San Ramon, Californie, USA). Ils ont établi le standard et continuent de le faire évoluer. La stack de EnOcean est représentée Figure II-27. Ce protocole utilise plusieurs bandes de fréquences : 315 MHz, 868,3 MHz, 902 MHz et 928,35 MHz ; la fréquence 868,3 MHz est celle utilisée pour le marché européen et les données sont transmises en utilisant la modulation 2-ASK. Le débit est de 125 kbit/s et la bande passante du canal nominal est de 280 kHz avec des émissions de trames de l'ordre de 1 ms. La composition d'un exemple de trame EnOcean est représentée dans la Figure II-28. Celle-ci contient une payload de 0 à 14 octets et une longueur totale maximum de 27 octets. Ce qui implique une durée de trame de 1,7 ms. Mais en EnOcean, il existe plusieurs types de trames avec des headers différents et des payloads qui varient en longueur (4, 8, 9 ou 14 octets).

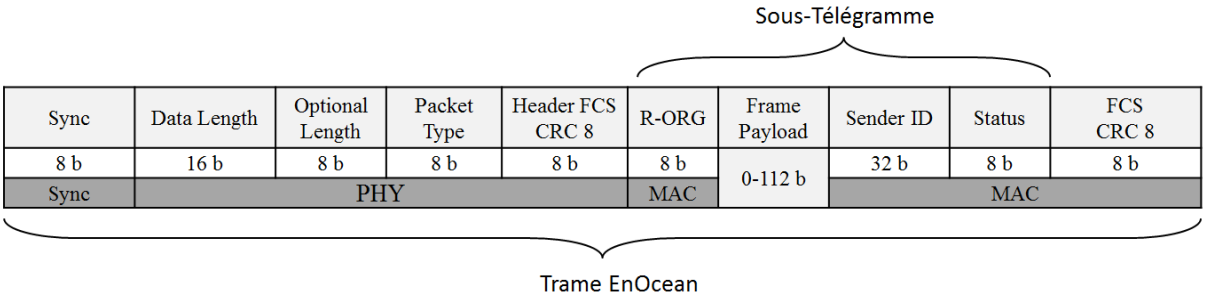


Figure II-28 : Exemple d'une trame EnOcean avec une payload allant jusqu'à 14 octets

BY-NC-ND

EnOcean combine des convertisseurs micro énergie avec des composantes électroniques ultra faibles puissances [63]. En effet, un léger mouvement mécanique (piézo-électrique) et d'autres ressources potentielles dans l'environnement, telle que la lumière intérieure, le changement de température (thermo-électrique) ou du courant inductif, sont transformés en énergie électrique qui est ensuite transformée en énergie électromagnétique. Ceci permet ainsi la communication entre des capteurs radio sans pile, des commutateurs, des contrôleurs et des passerelles. En réalité, le développement de capteurs et de commutateurs radio sans pile est le principal argument de vente de EnOcean car ce sont les seuls dispositifs qui peuvent être des émetteurs purs nécessitant une basse consommation d'énergie. Les autres produits supportent le protocole EnOcean mais sont alimentés par secteur, cela signifie qu'il n'est pas possible d'avoir un système global EnOcean entièrement basé sur de l'Energy Harvesting. Par ailleurs, EnOcean peut supporter une topologie étoile ou une topologie maillé ; le choix de la topologie dépend notamment de l'alimentation des produits présents dans le réseau : sur secteur, sur pile, ou autoalimenté. Afin de consommer le moins d'énergie possible, plusieurs concessions ont été faites. Les liens sont unidirectionnels par défaut, il n'y a donc habituellement pas d'acquittement de trames et les produits n'implémentent aucune interface d'affichage.

Le profil utilisé est défini par l'EEP (EnOcean Equipement Profil) dans la couche Application, il indique le type de données transmises et le comportement du produit [64]. Un profil EEP comprend trois éléments qui définissent le profil et les caractéristiques techniques du produit :

- **RORG :** Indique le type de message radio (exemple : quelle est la quantité de données ? le message est-il sécurisé ?).
- **FUNC :** Détermine la fonction de base du produit, exemples : détecteur, capteur, sonde, interrupteur, etc.
- **TYPE :** Définit les caractéristiques précises propres à l'appareil, comme par exemple l'intervalle de valeurs possibles pour un capteur de température.

L'EEP qu'un produit peut supporter dépend du fabricant. Le choix du profil se fait pendant la phase d'apprentissage entre le capteur et l'actionneur à travers un processus appelé « Teach-in ».

Selon le niveau de la couche OSI, EnOcean utilise trois types de paquets différents : Trame, Sous-télégramme et Télégramme.

BY-NC-ND

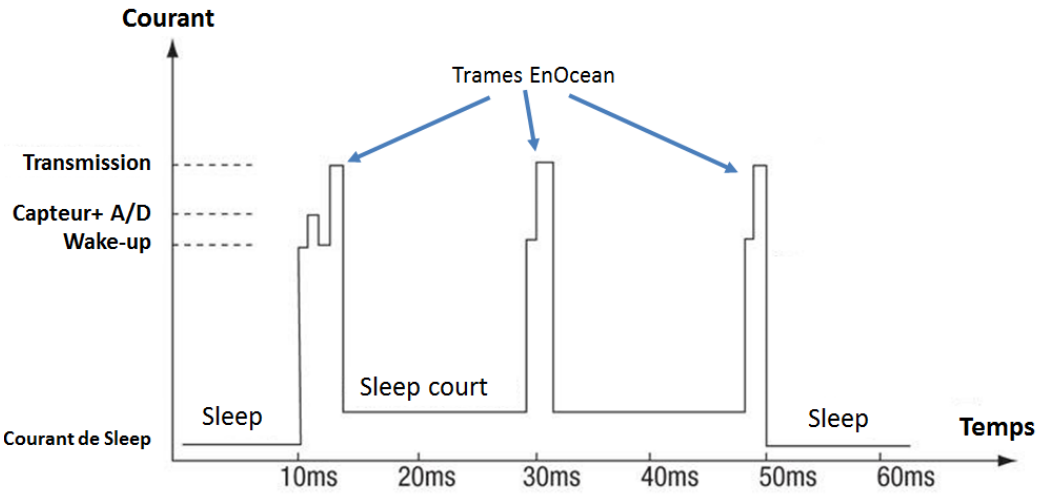


Figure II-29 : Illustration du télégramme EnOcean composé de 3 sous-télégrammes espacés d'un temps de veille

- **La trame :** C'est le format associé à la couche Physique. La composition de cette trame est détaillée dans la Figure II-28. A ce niveau, la trame comprend les headers contenant les informations sur le contrôle et la synchronisation, destinées au récepteur.
- **Le sous-télégramme :** C'est le format associé à la couche Liaison et c'est le résultat du processus de décodage de la trame qui omet les champs physiques de contrôle et de synchronisation. La procédure inverse d'encodage est appliquée pour obtenir une trame d'un sous-télégramme. Sachant que EnOcean est un protocole radio unidirectionnel (pas d'acquittement), trois sous-télégrammes identiques (Figure II-29) sont transmis pendant un intervalle de temps limité afin d'augmenter la probabilité que la trame soit reçue. Afin de vérifier qu'un sous-télégramme est arrivé intact, un CRC de 1 octet est calculé avant la transmission et attaché au sous-télégramme. Si une erreur est détectée, le sous-télégramme est ignoré.
- **Le télégramme :** C'est le format associé à la couche Réseau. Un télégramme complet est constitué de 3 sous-télégrammes (Figure II-29).

II.3.4.2. Les mécanismes de robustesse de EnOcean

a) Le timing du « sous-télégramme » EnOcean

Comme mentionné précédemment, un télégramme complet se compose d'un maximum de trois sous-télégrammes. Le timing du sous-télégramme vise à éviter les collisions entre les différents émetteurs. Chaque sous-télégramme est transmis dans un intervalle de temps différent. Le protocole EnOcean définit des temps d'échéance pour l'émission et la réception. Il s'agit de l'intervalle de temps dans lequel les trois sous-télégrammes doivent être transmis / reçus : La transmission du début du premier sous-télégramme jusqu'à la transmission de la fin du dernier sous-télégramme ne doit pas dépasser le temps d'échéance TX qui a une valeur paramétrable maximum de 40 ms. Coté récepteur, le temps entre la réception de la fin du premier sous-télégramme et la fin du dernier sous-télégramme

BY-NC-ND

ne doit pas dépasser le temps d'échéance RX d'une valeur paramétrable maximum de 100 ms, et ce même lorsque des répéteurs sont impliqués. Pour éviter les collisions, chaque produit envoie ses trames à un moment ***t*** différent. Pour planifier la transmission d'un sous-télégramme, le temps d'échéance TX est divisé en 4 plages (Figure II-30); chaque plage est divisée en 10 intervalles de temps de 1 ms chacun. La numérotation des tranches de temps commence par 0 et se termine par 39.

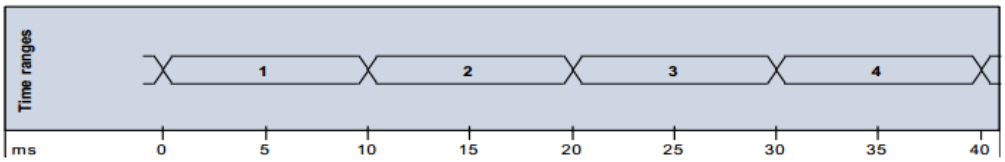


Figure II-30 : Composition de la période d'échéance TX de EnOcean

Ces 4 plages sont utilisées pour envoyer les 3 sous-télégrammes. Un paramétrage détermine dans quelle plage un sous-télégramme doit être envoyé. Pour éviter les collisions lors de l'utilisation de répéteurs, ceux-ci sont paramétrés pour avoir des timings d'envois différents de l'émetteur initial. Le Tableau II-7 détails les timings qui peuvent être choisis pour chaque sous-télégramme.

Tableau II-7 : Timing des trois sous-télégrammes EnOcean visant à réduire les collisions de trames

Type d'émetteur	1er sous-télégramme	2ème sous-télégramme	3ème sous-télégramme
Emetteur initial	0	1…9	20…39
1er répéteur	10…19	20…29	20…29
2ème répéteur	0…9	20…29	20…29

b) Grand débit et courtes trames

EnOcean utilise un débit de 125 kbit/s, ce qui permet de transmettre des trames extrêmement courts (~1 ms typiquement). A titre de comparaison, Zigbee par exemple nécessite 15 millisecondes pour réaliser un cycle de transmission-acquittement de trame. Par conséquent, toute erreur causée par des collisions de trames EnOcean reste extrêmement faible. Statistiquement parlant, la fiabilité de transmission est toujours mieux que 99,99% pour 100 capteurs sans fil chacun transmettant simultanément leurs trames une fois par minute.

c) Listen Before Talk (non supporté par les produits EnOcean d'Energy Harvesting)

C'est une caractéristique optionnelle pour les produits émetteurs, ayant pour objectif d'éviter les collisions avec d'autres émetteurs. Si le canal s'avère occupé, la transmission est suspendue pendant un temps aléatoire qui varie uniformément sur un intervalle de temps (par exemple : 5 secondes, 60 secondes ou 15 minutes. Cette intervalle est paramétrable et dépend du cas d'usage. Après ce délai, l'émetteur réécoute le canal et si le canal est de nouveau libre la trame est transmise immédiatement. Dans le cas où le retard aléatoire calculé conduirait à une violation de l'échéance TX, une transmission

BY-NC-ND

forcée du sous-télégramme est faite malgré que le canal soit occupé. Il est recommandé d'utiliser le LBT, mais celui-ci ne peut pas garantir qu'aucune collision ne surviendra. En outre, certains produits émetteurs ne peuvent pas supporter cette fonctionnalité comme les produits autoalimentés.

d) Smart-ACK (non supporté par les produits EnOcean d'Energy Harvesting)

Le Smart-ACK permet une communication bidirectionnelle. La communication est gérée par un contrôleur qui répond aux télégrammes qu'il reçoit par des acquittements. Dans une communication entre deux dispositifs EnOcean, au moins un produit doit être alimenté par secteur.

II.3.5. Z-wave

II.3.5.1. Description

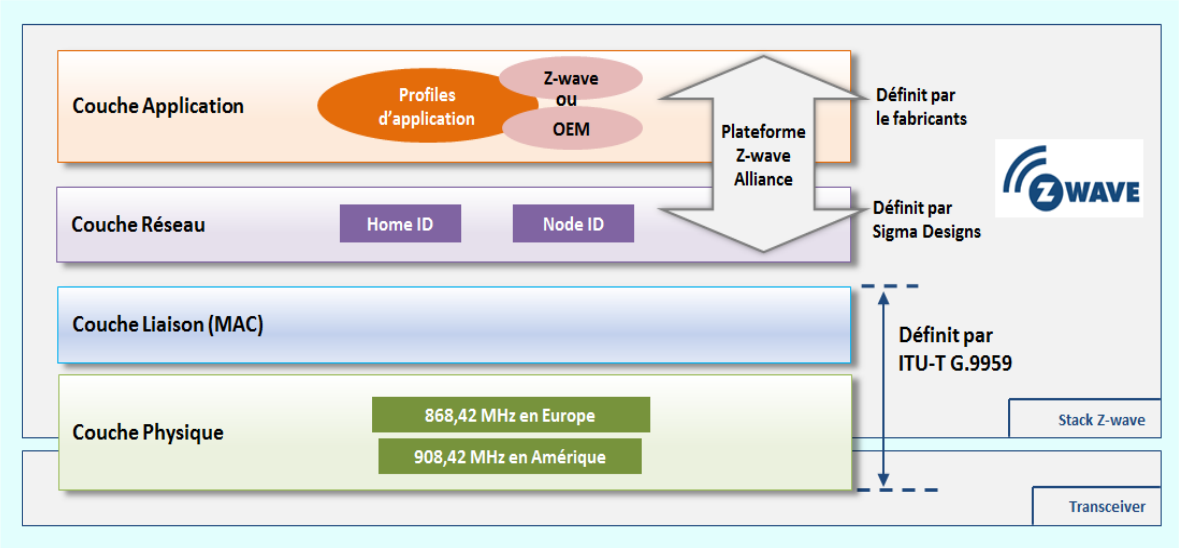


Figure II-31 : La stack du protocole Z-wave

A la différence des protocoles dédiés aux applications du Home & Building Automation précédemment évoqués, Z-wave est un protocol international propriétaire [65]. Il a été développé à la base spécifiquement pour les commandes à distance dans les bâtiments résidentiels et l'éclairage dans les bâtiments commerciaux. Il a été élaboré par une start-up danoise appelée Zen-Sys à la fin des années 1990, et a été racheté par la société Sigma Designs en 2008. Z-wave est basée sur une électronique basse consommation et fonctionne sur la fréquence 868,42 MHz en Europe, 908,42 MHz aux Etats-Unis et dans les Amériques (hors Brésil), 919,82 MHz en Chine et 921,42 MHz en Australie. Z-wave peut aussi opérer sur la fréquence 2,4 GHz uniquement en utilisant une puce radio série 400.

Un aperçu général de la stack Z-wave est illustré dans la Figure II-31. Les couches basses PHY et MAC sont définies par le standard international ITU-T G.9959. Z-wave utilise une combinaison de modulation et d'encodage de données qui varie en fonction du débit : une modulation FSK combinée à un encodage Manchester pour un débit de 9 kbit/s, une modulation FSK combinée à un encodage NRZ

BY-NC-ND

(Non-Return-to-Zero) pour un débit de 40 kbit/s, ou encore une modulation GFSK d'un coefficient BT=0,6 (produit du temps fois la largeur de bande du filtre Gaussien) et un encodage NRZ donnant un débit de 100 kbit/s. La déviation en fréquence pour les deux premiers débits est de 40 kHz +/- 20% et de 58 kHz +/-20% pour le troisième débit. Pour la détection d'erreur, en fonction du débit, Z-wave utilise soit un checksum de 8 bits, soit un CRC de 16 bits. La composition d'une trame Z-wave en mode unicast et multicast est représenté dans la Figure II-32.

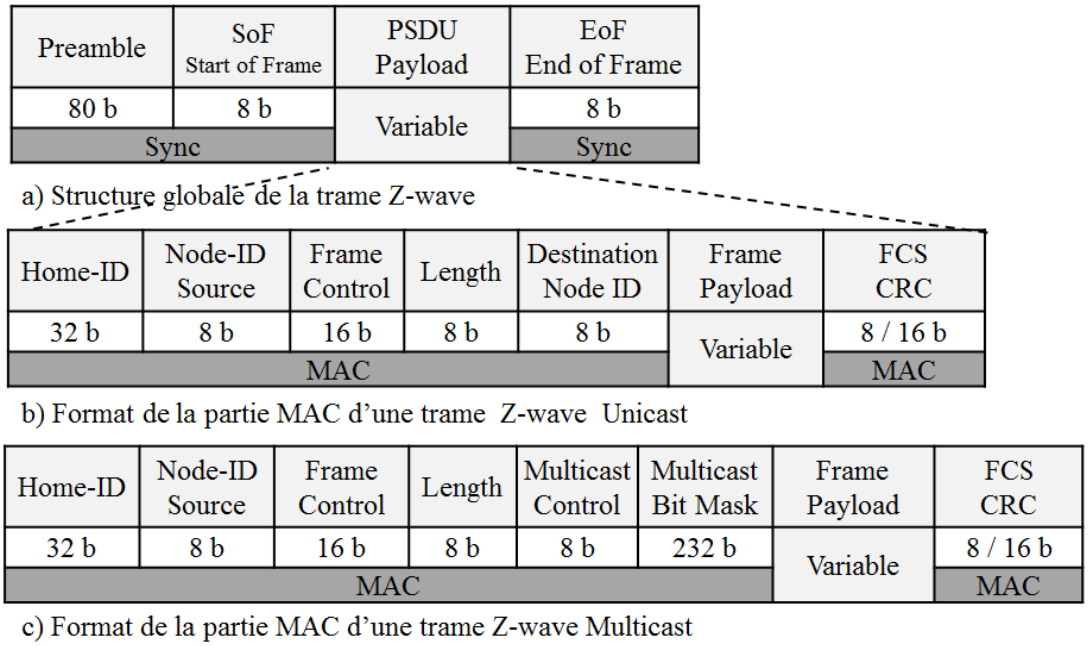


Figure II-32 : La structure globale d'une trame Z-wave (unicast / multicast)

La couche réseau est la propriété de Sigma Designs et est protégée par plusieurs brevets. Comme ZigBee, le protocole Z-wave suit une topologie de réseau maillé, il est constitué de nœuds maîtres, encore appelés « contrôleurs », qui contrôlent le routage, et de nœuds terminaux « esclaves », qui peuvent aussi fonctionner comme routeurs pour retransmettre les données. Une différence entre ZigBee et Z-Wave est au niveau de l'espace d'adressage. ZigBee supporte 16 ou 64 bits d'adressage réseau, alors que Z-Wave ne supporte que 8 bits. Par conséquent, dans un réseau Z-wave, il peut y avoir jusqu'à 256 nœuds (232 en pratique), contre 65536 noeuds dans le cas de ZigBee à 16 bits d'adressage. Sur un réseau Z-Wave, il n'y a qu'un seul contrôleur primaire (e.g. box). C'est lui qui va gérer l'inclusion (ajout) des autres composants dans le réseau. Néanmoins, plusieurs contrôleurs secondaires peuvent être rajoutés. C'est le cas par exemple des télécommandes. En outre, chaque contrôleur Z-Wave possède un "Home ID", qui est un numéro unique, codé sur 4 octets (32 bits), attribué au matériel lors de sa fabrication. Lorsqu'un nouveau produit Z-Wave de type esclave (e.g. capteurs détecteurs, contact, etc.) est rajouté dans le réseau, le contrôleur dont il dépend lui attribue son Home ID ainsi qu'un autre numéro appelé "Node ID", codé sur 1 octet, qui identifie le module dans le réseau. Z-Wave utilise chaque nœud dans le réseau comme un routeur intelligent.

BY-NC-ND

La couche application peut être définie par le fabricant, mais doit être compatible avec le protocole pour être interopérable avec les autres produits certifiés Z-wave. En effet, l'interopérabilité des produits portant le logo Z-wave est garanti par l'alliance.

Par ailleurs, l'Alliance Z-Wave a annoncé qu'une nouvelle version de Z-wave va apparaitre, appelée « Z-Wave Plus » qui offrira de nombreuses améliorations et fonctions [66], notamment une augmentation de portée, un débit plus élevé et une consommation réduite, tout en restant rétro-compatible avec les produits Z-wave classiques.

II.3.5.2. Les mécanismes de robustesse de Z-wave

Comme dans KNX-RF, les signaux Z-wave sont à bande étroite, et aucune méthode d'étalement de spectre telle que DSSS ou FHSS n'est utilisée pour contrer les interférences. Z-wave utilise aussi le mécanisme d'écoute de canal avant transmission (Listen-Before-Talk). Si le canal n'est pas libre, le produit utilise un algorithme de backoff aléatoire entre les tentatives de transmission. Aussi, une trame transmise sur le canal radio doit être acquittée. Si aucun acquittement n'est reçu, la trame est retransmise 3 fois. Si le produit n'a toujours pas reçu d'acquittement, la transmission est abandonnée.

II.3.6. SigFox

II.3.6.1. Description

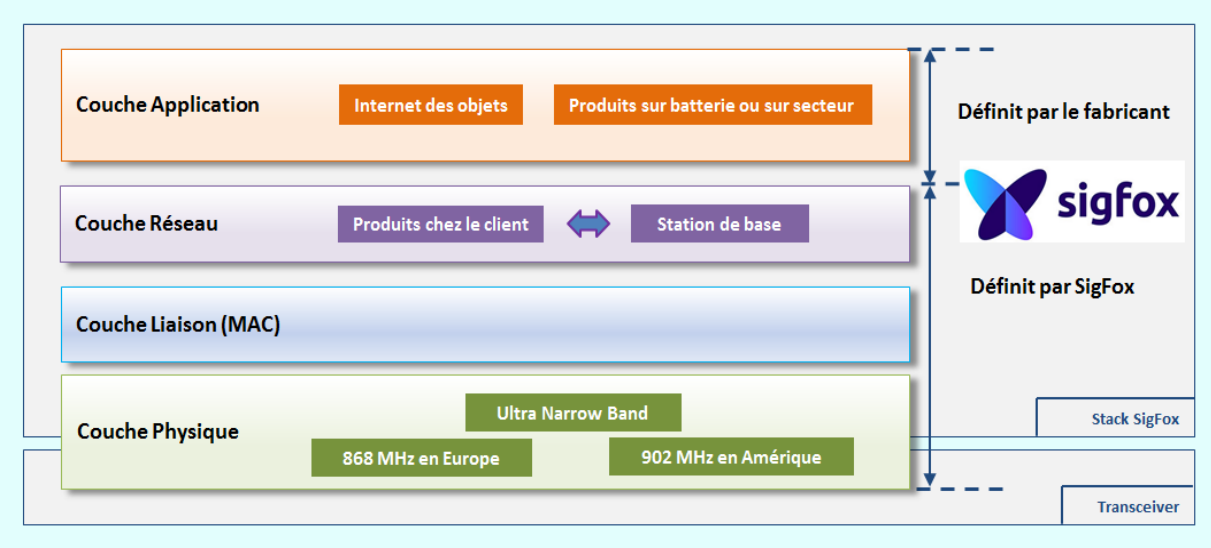


Figure II-33 : Représentation de la stack du protocole SigFox

SigFox [67] [68] est la première technologie LPWAN (Low Power Wide Area Network) faible consommation, faible débit dédiée à l'internet des objets. SigFox est en effet le tout premier opérateur de services IoT, il a été fondé en 2009 et a connu depuis lors une croissance très rapide. Pour réguler et spécifier l'architecture et les interfaces de ce nouveau type de réseaux LPWAN, l'organisation ETSI a proposé un standard appelé LTN (Low Throughput Network) qui régule, au-delà de SigFox, d'autres protocoles de l'IoT comme LoRa, Weightless, On-Ramp RPMA, etc.

BY-NC-ND

Les premières versions du protocole SigFox ne supportaient qu'une liaison montante unidirectionnelle, c'est-à-dire du produit vers la station de base. Les versions sorties à partir de la deuxième moitié de 2014 prennent désormais en charge la communication bidirectionnelle. Celle-ci est toujours initiée par le produit SigFox. En outre, le bilan de liaison en liaison descendante est plus faible que celui en liaison montante, ceci s'explique par la sensibilité plus faible du produit par rapport à celle de la station de base.

Le réseau SigFox fonctionne sur les fréquences ISM sub-GHz : 868 MHz en Europe et 902 MHz aux États-Unis. En Europe, la fréquence centrale est de 868,13 MHz en liaison montante et de 869,525 MHz en liaison descendante. La couche physique de SigFox est basée sur la technique Ultra Narrow Band (UNB). En effet, ce protocole a été conçu pour la transmission de petits messages et n'est pas adapté aux applications de multimédia et de broadcast permanent, qui nécessitent une bande large. De plus, la technique UNB permet d'avoir une très forte sensibilité de réception car moins de bruit se rajoute à la bande. Par ailleurs, SigFox utilise en liaison montante une modulation DBPSK (Differential BPSK) avec un débit de 100 bit/s sur des canaux de 100 Hz et, en liaison descendante, une modulation GFSK (BT = 1, Δf = +/- 800 Hz) avec un débit de 600 bit/s sur des canaux de 500 Hz. Par ailleurs, la complexité dans une communication SigFox est d'être capable de recevoir le signal de 100 Hz malgré les déviations en fréquence à l'émission. La solution réside dans la radio définit par logiciel implémenté dans la station de base qui permet au récepteur de scanner toutes les fréquences dans la bande 192 kHz en une seule fois. Ainsi, toute variation en fréquence à l'émission ne pose pas de problème si elle reste stable.

Avec un bilan de liaison aux alentours de 155 dB en liaison montante, SigFox permet des communications à très longue portées, beaucoup plus élevées que le GSM. L'opérateur annonce en effet une zone de couverture qui s'étend sur 30 à 50 km dans les zones rurales, et sur 3 à 10 km dans les zones urbaines.

Le réseau de SigFox est conçu autour d'une structure hiérarchique (Figure II-34):

- Les modules UNB communiquent avec des stations de base, ou des cellules, couvrant de vastes zones de plusieurs centaines de kilomètres carrés.
- Les stations de base routent les messages vers les serveurs SigFox.
- Les serveurs vérifient l'intégrité des données et acheminent les messages vers le système d'information chez le client final (serveurs tiers) et sont accessibles en utilisant l'API (Application Program Interface) de SigFox.

BY-NC-ND

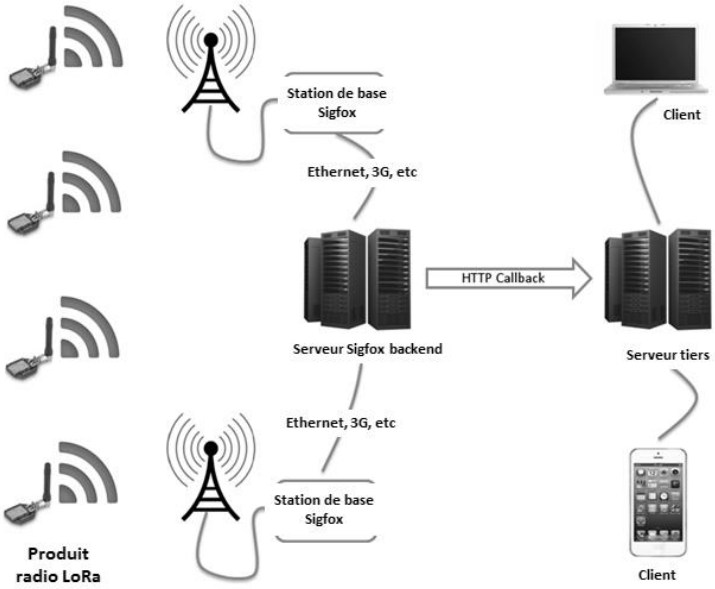


Figure II-34 : Architecture du réseau SigFox

Pour établir une communication, il n'y a pas besoin de synchronisation préalable entre le produit SigFox et la station de base. Le produit émet simplement dans la bande de fréquences disponible plus ou moins son propre décalage en fréquence. Le signal est détecté par les stations de base les plus proches, décodé et transmis au réseau backend (cloud SigFox). Chaque trame est authentifiée à l'aide d'un mécanisme d'intégrité et une clé spécifique unique au produit. Cela sert à éviter que le signal émis ne soit enregistré et rejoué plus tard pour commander ou déverrouiller le récepteur.

Chaque trame transmise en liaison montant peut contenir entre 0 et 12 octets de données utiles, ce qui est amplement suffisant pour les produits qui transmettent une alarme, une localisation, un état d'environnement (température), une mesure de consommation d'énergie, etc. En outre, 12 octets fixes supplémentaires sont utilisés pour le préambule, l'ID du produit et d'autres types de données. La trame SigFox complète en liaison montante (illustrée Figure II-35) fait donc entre 12 et 24 octets plus quelques bits supplémentaires utilisés pour les paramètres d'authentification.

Preamble	Frame Sync	Dev ID	Frame Payload	Msg Auth Code	FCS CRC 16
19 b	29 b	32 b	0 – 96 b	16 – 40 b	16 b
Sync		PHY		MAC	

a) Structure de la trame Sigfox en liaison montante

Preamble	Frame Sync	ECC	Frame Payload	Msg Auth Code	FCS CRC 8
91 b	13 b	32 b	0 – 64 b	16 b	8 b
Sync		PHY		MAC	

b) Structure de la trame Sigfox en liaison descendante

Figure II-35 : La composition d'une trame SigFox en liaison montante et en liaison descendante

BY-NC-ND

Comme mentionné précédemment, il existe deux modes en SigFox : unidirectionnel et bidirectionnel. Le mode unidirectionnel se fait en montant du produit vers la station de base et il est uniquement dédié à la collecte de données (ex : température, son, mouvement). Chaque transmission entre le produit SigFox et la station de base consiste en trois de ces trames (c'est-à-dire 1 trame + 2 répétitions) et l'intertrame est d'environ 2 secondes. Par conséquence, un message SigFox, qui correspond à l'ensemble de ces trois trames, dure environ 6 secondes. En outre, les trames sont envoyées sur trois différentes fréquences pseudo-aléatoires (Figure II-36). Les sauts de fréquence se font sur une bande de 192 kHz appelé « macro-canal » qui contient à son tour six « micro-canaux » parmi lesquels est choisie la fréquence d'émission pseudo-aléatoire. La fréquence minimale des sauts de fréquence est égale à la fréquence centrale moins 96 kHz, et la fréquence maximale est égale à la fréquence centrale plus 96 kHz.

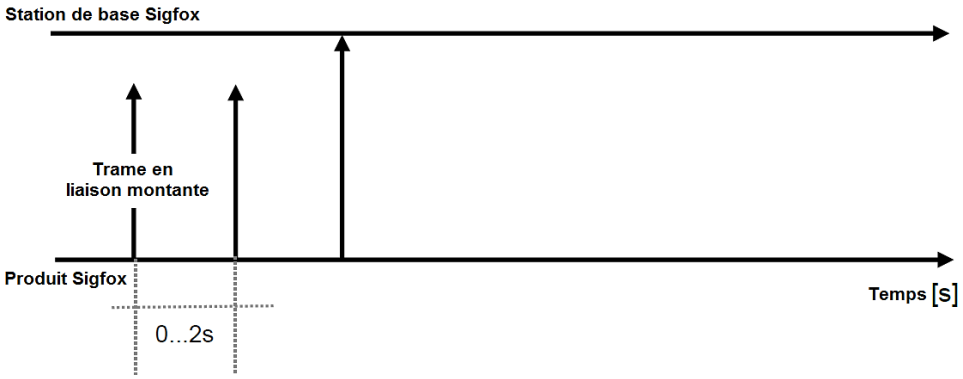


Figure II-36 : Communication SigFox en mode unidirectionnel

Concernant le mode bidirectionnel, il est quant à lui utilisé dans les applications qui nécessitent de récupérer des données du réseau de façon ponctuelle. Pour cela, le produit SigFox doit demander les données au serveur ; il doit donc être programmé pour recevoir des données à des instants définis dans sa logique. Cette demande de communication bidirectionnelle cible les clients qui souhaitent de temps en temps pousser un paramètre de configuration vers leurs objets. Cette fonctionnalité est implémentée comme un "polling", où l'objet reste maître et peut demander au système d'information s'il y a des données à télécharger. Exemple : un thermostat envoie la température toutes les 30 minutes. Suite à l'envoi, il reste à l'écoute pendant quelques secondes, afin d'être capable de recevoir une instruction pour augmenter ou baisser la température. Ce fonctionnement permet d'éviter de rester connecté en permanence et permet donc une communication bidirectionnelle en restant basse consommation. En revanche le nombre maximum de trames qui peuvent être transmises en liaison descendante est limité à 4 par jour. Par ailleurs, comme dans le mode unidirectionnel, la trame est transmise une fois et répétée 2 fois (3 trames au total) en liaison montante sur différentes fréquences. La station de base corrige ensuite sa fréquence d'émission en fonction de la fréquence mesurée du signal reçu de la liaison montante. Dans le mode bidirectionnel, l'intertrame n'est plus de 2 secondes mais entre 500 ms à 525 ms. Après la transmission du message complet (3 trames SigFox), le produit

BY-NC-ND

émetteur se met en mode attente pendant quelques secondes jusqu'à la fin de fenêtre de transmission (20 s) avant de se mettre en mode réception pendant 25 secondes pour recevoir la trame de données issue de la station de base. Au bout d'un laps de temps compris entre 1,4 s et 4 s, un message appelé trame OOB (out of band) qui fait 8 octets de données utiles et qui correspond en fait à un acquittement de la dernière trame reçue de la station de base est transmis par le produit SigFox. Cette trame OOB contient des informations sur le RSSI, les niveaux de température et de tension. Les échanges en bidirectionnel sont illustrés Figure II-37.

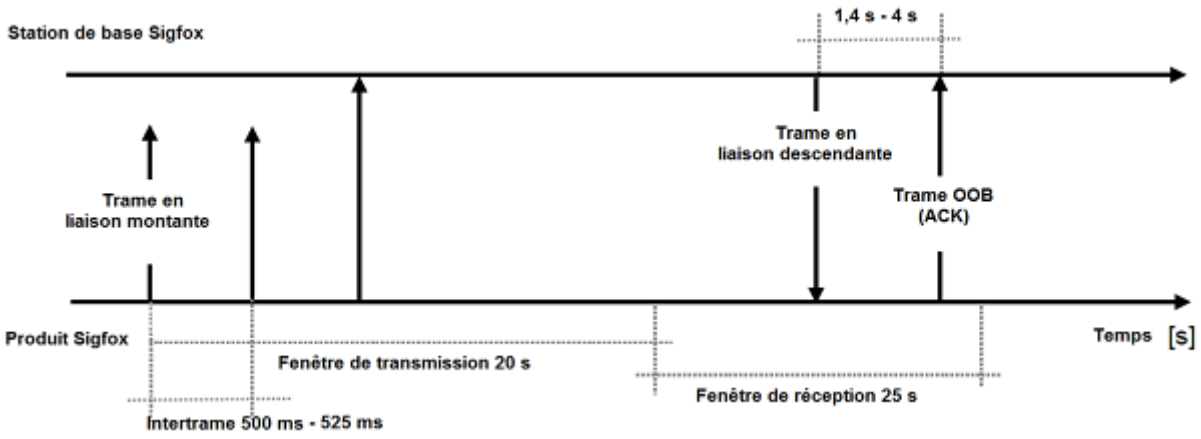


Figure II-37 : Communication en mode bidirectionnel

L'opérateur SigFox propose différentes offres sur le marché en fonction du nombre de message transmis par jour :

- Platinum : 101 à 140 messages en liaison montante + 4 messages en liaison descendante.
- Gold : 51 à 100 messages en liaison montante + 2 messages en liaison descendante.
- Silver : 3 à 50 messages en liaison montante + 1 messages en liaison descendante.
- One : 1 à 2 messages en liaison montante + pas de liaison descendante.

On note donc que le nombre maximum de trames qui peuvent être envoyés sur une journée toutes offres confondues est limité à 140. Cette limitation est fixée ainsi pour répondre aux exigences de régulation en Europe (ETSI 300-220) qui fixe un duty cyle de 1% pour les communications dans la bande 868 MHz. Sachant qu'un message SigFox peut durer jusqu'à ~6 secondes, cela permettrait donc de transmettre un nombre maximum de 6 messages par heure.

II.3.6.2. Les mécanismes de robustesse de SigFox

Concernant la robustesse du protocole SigFox, celui-ci n'emploie pas de mécanisme d'accès au média tel le LBT. Or, si l'on considère que des milliers de dispositifs SigFox vont peut-être opérer dans le même environnement que d'autres types de protocoles utilisant la même fréquence ou des fréquences adjacentes, ces derniers peuvent être perturbés. Par ailleurs, le faible débit de données SigFox augmente le délai de transmission de la trame à quelques secondes ; à la différence des autres

BY-NC-ND

technologies qui n'ont besoin, typiquement, que de quelques millisecondes. Par ailleurs, de telles longueurs de trames rendent SigFox vulnérable à l'imprécision de fréquence, qui peut être plus grande que la largeur de bande du signal SigFox UNB.

Dans SigFox, quelques propriétés et fonctions permettent de réduire les collisions de trames en liaison montante :

a) Moyens de réception massive et à grande échelle

Le réseau SigFox doit supporter une grande densité d'objets connectés. Le challenge principal est d'éviter les collisions de trames. Quand l'information est diffusée par un produit, chaque station de base sur son périmètre peut l'écouter. Avoir des stations de base multiples réduit ainsi les risques de collision et de perte de trame. En effet, deux messages qui collisionnent au niveau d'une station peuvent être reçus par deux autres stations différentes.

b) Répétition de trame et Random-FDMA

Dans un message SigFox, chaque trame est transmise sur 3 fréquences radio différentes pseudo-aléatoires en utilisant la technique du Random-FDMA (Random-Frequency Division Multiple Access). Cela permet de réduire les probabilités de collision car la station de base reste à l'écoute sur tout le spectre de 192 KHz et protége SigFox contre d'autres communications en cours d'exécution en parallèle sur la même bande.

c) Acquittement de la trame en liaison descendante du mode bidirectionnel

Dans une communication bidirectionnelle, la trame transmise en liaison descendante par la station de base peut être perçu du point de vue fonctionnel comme un acquittement pour la trame initialement transmise par le produit SigFox. Cette trame, qui est en réalité une trame de donnée, est à son tour acquitté par une trame OOB. Un acquittement est donc bien implémenté dans SigFox mais seulement en mode bidirectionnel où les trames en liaison descendante sont limitées à 4 trames par jours.

BY-NC-ND

II.3.7. LoRa

II.3.7.1. Description

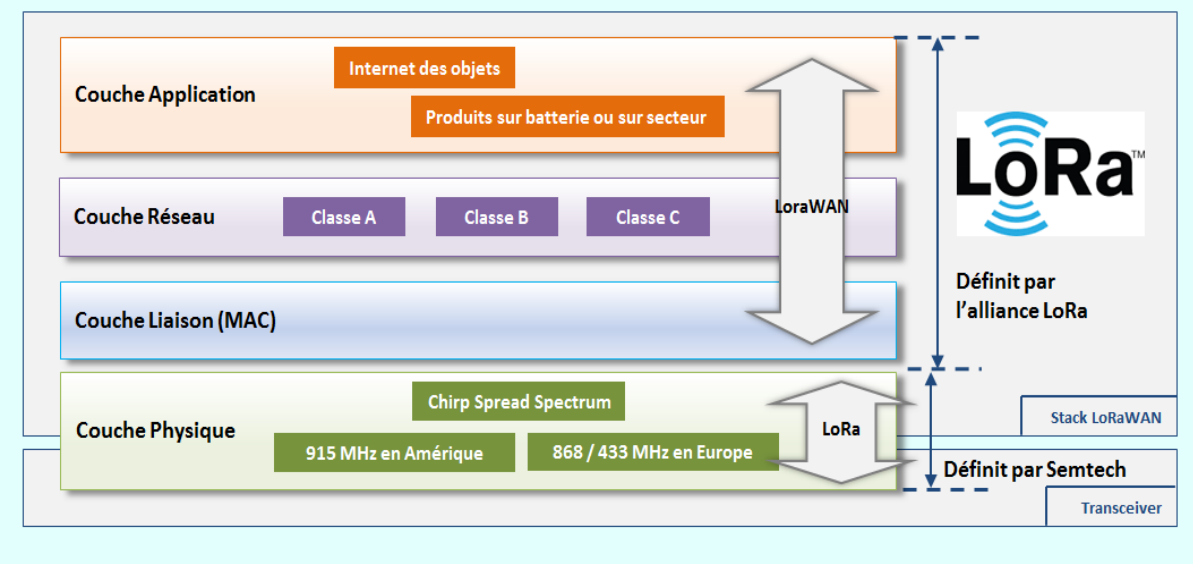


Figure II-38 : La stack du protocole LoRa

Conçue en France par Cycleo, une startup grenobloise créée en 2009, et rachetée en 2012 par le fondeur américain SemTech, la technologie radio à longue portée LoRa (Long Range) est entrée dans une phase concrète de déploiement. Comme pour SigFox, les annonces d'équipements et de modules pour des applications IoT compatibles LoRa se sont multipliées ces derniers mois. Les promoteurs de la technologie LoRa s'associent au sein du consortium LoRa Alliance. Parmi les fondateurs figurent les américains Cisco, IBM, SemTech et Microchip, mais aussi les français Actility, Eolane, Kerlink et Sagemcom. L'objectif de cette alliance est de standardiser et d'assurer l'interopérabilité des équipements. L'approche de la technologie LoRa [69] est basée sur l'étalement de spectre avec une sensibilité très forte pour assurer la longue portée et une bonne pénétration du signal en indoor. Par ailleurs, le nom LoRa ne désigne en réalité que la couche physique de cette technologie LPWAN. Cette couche est développée par SemTech et elle n'est pas ouverte ; ce qui signifie que seuls des transceivers de SemTech (ou de ses associés ayant obtenu une licence) peuvent être utilisés pour le déploiement de cette technologie. Cela représente un grand inconvénient pour LoRa car l'évolution de celui-ci pourrait être moins rapide du fait que seul SemTech y contribue. Ce schéma s'est d'ailleurs déjà produit avec le protocole Z-wave qui a à l'heure actuelle une progression qui stagne par rapport au ZigBee.

Les autres couches OSI plus hautes, qui régissent l'architecture du système et du réseau, sont désignées par le nom LoRaWAN. Ce dernier est un standard ouvert, dont l'interopérabilité est assurée, d'une part, par un processus de certification standard menée par des laboratoires indépendants, et d'autre part, par des spécifications claires, rétro-compatibles, s'appuyant sur une roadmap gérée au sein d'une alliance.

BY-NC-ND

La majorité des technologies sans fil utilisent des modulations simples comme la FSK car cela permet d'optimiser la consommation des produits. LoRa utilise en revanche une modulation à étalement de spectre Chirp Spread Spectrum (CSS) qui maintient les mêmes caractéristiques de faible puissance que la modulation FSK mais offre des performances optimisées en terme de portée, en augmentant significativement la robustesse du signal et la sensibilité du récepteur. En effet, le signal reçu peut être démodulé même quand il est 20 dB en dessous du bruit (SNR négatif). Le CSS était déjà utilisé dans les applications militaires pendant des décennies en raison des très longues distances qu'il permet d'atteindre et de sa robustesse aux interférences, mais LoRa est la première technologie à le mettre en œuvre à faible coût pour un usage commercial. La technologie LoRa opère sur la bande 863-870 MHz en Europe et sur la bande 902-928 MHz aux Etats Unis. Les communications radio sont réparties sur différents canaux de fréquence et de débits différents. En Europe, LoRa peut utiliser jusqu'à 16 canaux, mais seuls 8 sont aujourd'hui définis dans la spécification ; les canaux restants sont réservés à des utilisations futures. Parmi les huit canaux, six sont à des débits de données allant de 0,25 kbps à 5 kbps, un canal unique à ''haut débit'' de 11 kbps, et un canal unique à modulation FSK à 50 kbps (Tableau II-8). La modulation CSS permet en effet de varier la bande passante utilisé grâce à un facteur d'étalement de spectre, qui, plus il est faible, plus le débit est grand. La sélection du débit de données est un compromis entre la portée et la durée de trame. Les techniques du CSS et du débit adaptatif (Adaptive Data Rate) permettent la réception simultanée de plusieurs trames LoRa sur le même canal. Par ailleurs, les canaux utilisés sont attribués librement par l'opérateur du réseau. Cependant, les trois canaux 868,1 MHz, 868,3 MHz et 868,5 MHz sont par défaut implémentés dans chaque produit terminal LoRa utilisant la bande 868 MHz. En effet, ces canaux constituent le plus petit ensemble de canaux commun à toutes les gateways LoRa qu'elles doivent toujours écouter.

Tableau II-8 : Les canaux utilisés en LoRa

Modulation	**Largeur de bande (kHz)**	**Canal (MHz)**	**Facteur d'étalement (FE) / Débit**	**Nombre de canaux**	**Sous Bande 868 MHz**
UNB	250	868,3	FE7 / 11 kbps	1	G1
FSK	250	868,3	50 kbps	1	G1
UNB	125	868,1 868,3 868,5	FE12-FE7 / 0,25-5 kbps	3	G1
UNB	125	869,85 869,05	FE12-FE7 / 0,25-5 kbps	2	G2
UNB	125	869,535	FE12-FE7 / 0,25-5 kbps	1	G3

La composition d'une trame LoRa est présentée Figure II-39. La puissance de sortie maximale permise par l'ETSI 300-220 est de 25 mW ERP (+ 14 dBm). Les directives ETSI spécifient

BY-NC-ND

l'utilisation soit d'une limitation d'un duty cycle, soit d'un mécanisme d'écoute de canal LBT combiné à un saut de fréquence adaptatif AFA pour la bande 868 MHz. LoRa adopte la limitation en duty cycle qui est de 1% pour certains canaux et de 0,1% pour d'autres.

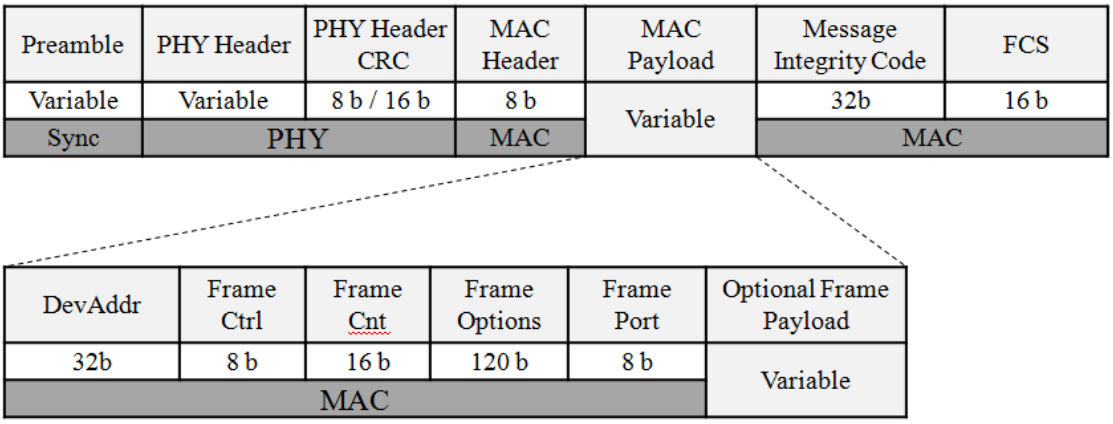


Figure II-39 : La structure globale d'une trame LoRa

Par ailleurs, le réseau LoRa est disposé en topologie étoile d'étoiles (star-of-stars). Un réseau typique est illustré Figure II-40, il est constitué de divers éléments :

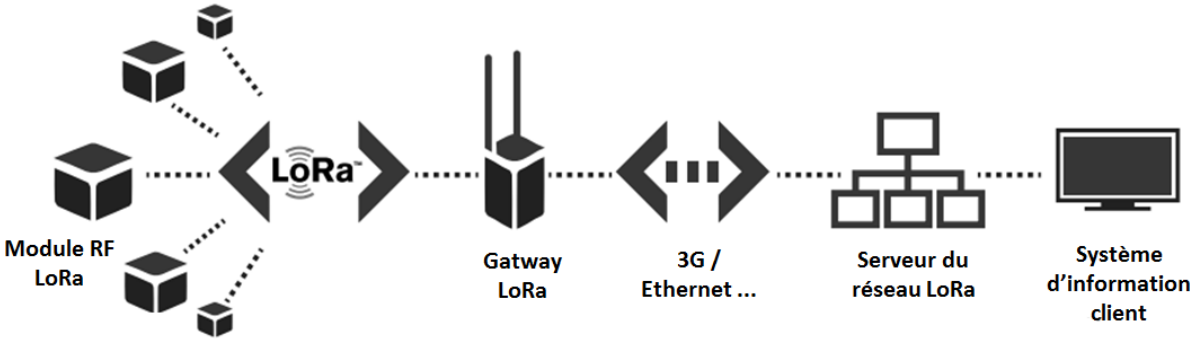


Figure II-40 : L'architecture du réseau LoRa

- Les produits terminaux : des modules radio LoRa avec un ou plusieurs capteurs implémentés. Ces modules peuvent de manière innée être géolocalisés en indoor et en outdoor sans nécessiter de GPS embarqué dans les objets. En effet, cela est possible grâce à un mécanisme de triangularisation appelé LBS (Localisation Based Services) over LoRa ; la solution permet de localiser les émetteurs radio LoRa en s'affranchissant du GPS dont la consommation électrique nuit à l'autonomie des capteurs.

- Les gateways (aussi connus sous les noms de concentrateurs ou de stations de base) : ce sont des passerelles LoRa qui reçoivent les données issues des modules puis les transfèrent sur un serveur LoRa. Cette partie du réseau LoRa peut être de type Ethernet ou tout autre moyen de télécommunication filaire ou sans fil.

- Le serveur du réseau LoRa : il gère les flux de données arrivant des gateways. Il élimine les paquets dupliqués et adapte le débit des données.

BY-NC-ND

- Système d'information distant (PC, smartphone, etc): une interface qui permet au client de collecter les données des modules radio pour les analyser et/ou de les contrôler à distance.

LoRa est bidirectionnel, ce qui permet aux produits d'émettre des informations (voie montante) mais aussi d'en recevoir (voie descendante). En outre, il permet d'avoir trois catégories différentes de produits selon les besoins de l'application, réparties en trois classes A, B et C qui sont présentées dans le Tableau II-9.

Tableau II-9 : Les différentes classes de produits en LoRa

Nom de la classe	Description	Application
A (« Baseline »)	Le module écoute après chaque émission (1 uplink est suivi de deux downlink potentiels).	Produits alimentés par piles, sans contrainte de latence.
B (« Beacon »)	Le module écoute à une fréquence régulière paramétrable.	Produits alimentés par piles ayant une contrainte de latence de quelques secondes.
C (« Continous»)	Le module écoute en permanence.	Produits ayant une forte contrainte de latence (moins d'une seconde), alimenté par secteur.

Enfin, à la différence de SigFox, il n'y a besoin de souscrire à un abonnement pour envoyer des paquets dans un réseau. Comme la couche physique est propriétaire à SemTech, LoRa est rentabilisé sur la vente des transceivers radio.

II.3.7.2. Les mécanismes de robustesse de LoRa

a) Moyens de réception massive et à grande échelle

Comme dans SigFox, LoRa dispose de plusieurs gateways capables de recevoir les trames de différents produits, ce qui diminue les probabilités de pertes de trames.

b) Acquittement et retransmission de trame

La couche MAC de LoRa peut acquitter une trame reçue correctement et peut retransmettre la trame dans le cas où elle ne serait pas acquittée. Jusqu'à huit retransmissions sont possibles. Chacune se fait sur un canal différent, impliquant ainsi l'utilisation d'un débit différent.

c) Etalement de spectre par compression d'impulsion (Chirp Spread Spectrum, CSS)

Le concept de CSS a été proposé par Hüttmann en 1940, et a été pour la première fois implémenté dans un transceiver radio appelé nanoLOC, développé par Nanotron Technologies [70]. En outre, le CSS a été également implémenté dans la couche physique IEEE 802.15.4a pour les réseaux WPAN et

BY-NC-ND

se révèle plus performant que le standard IEEE 802.15.4 (ZigBee) en termes de propagation radio et de sensibilité au bruit [71].

Aussi appelée technique d'étalement de spectre par modulation linéaire de fréquence, le CSS est semblable au FHSS, et surtout au DSSS utilisée dans la technologie ZigBee dans le sens où il utilise toute la largeur de la bande passante attribuée pour diffuser un signal. Cependant, contrairement aux techniques de DSSS et FHSS, le CSS ne nécessite pas de générateur de séquence pseudo-aléatoire pour distinguer le signal du bruit, ni de synchronisation du pseudo-bruit, ni de synthétiseur de fréquence. La technique du CSS utilise une impulsion chirp au lieu d'une séquence de pseudo-aléatoire pour coder les informations. Ce chirp est une impulsion dont la fréquence augmente (up-chirp) ou diminue (down-chirp). Il permet d'étendre le signal sur toute la bande passante disponible. Un facteur d'étalement de spectre paramétrable et variable rend le CSS idéal pour les systèmes nécessitant une adaptation de débit ou de portée en fonction de l'application ou du changement des conditions de propagations radio (Figure II-41). Exemple : si un produit se trouve loin de la gateway et qu'il existe des obstacles entre les deux, une meilleure sensibilité est alors requise. Le serveur du réseau LoRa augmente alors le facteur d'étalement, le débit utile diminue mais la connexion est maintenue. Si, a contrario, le produit est proche de la gateway, la portée est bonne et il n'y a pas besoin d'accroitre la sensibilité, le facteur d'étalement est donc diminué, le débit augmente et les trames radio sont transmises en un temps plus court.

En outre, l'utilisation de facteurs d'étalement différents permet l'orthogonalité des signaux ; ainsi deux signaux LoRa arrivant sur la même gateway n'interfèrent pas entre eux. Cela donne à la gateway la capacité de recevoir plusieurs signaux de différent débits sur le même canal et en même temps.

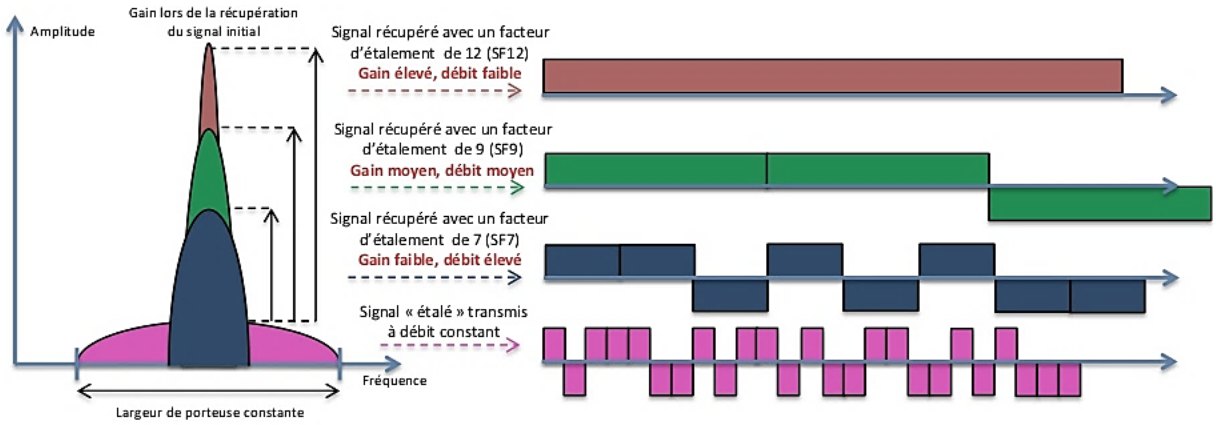


Figure II-41 : La largeur de bande d'un signal modulé en CSS en fonction du facteur d'étalement de spectre

La technique du CSS est utilisée pour les applications militaires car il est très difficile de détecter et d'intercepter le signal lors du fonctionnement à faible puissance. Plus le signal est étalé plus il est robuste aux interférences, surtout aux interférences à bande étroite. Le CSS a également une bonne robustesse contre les fadings causés par les propagations multi-trajets [72].

BY-NC-ND

d) Correction d'erreur (Forward Error Correction, FEC)

LoRa emploie aussi une forme de correction d'erreurs qui permet la récupération des bits d'information en cas de corruption par des interférences. Cela nécessite un encodage supplémentaire des données contenues dans le paquet transmis. En fonction du débit de codage sélectionné, la durée de la trame est plus ou moins longue.

II.3.8. Conclusions de la comparaison des protocoles RadioFréquences sans fil étudiés et conclusions

Dans le Tableau II-10, un aperçu des caractéristiques principales de chacune des normes étudiées est présenté. L'une des principales distinctions entre les différentes normes est la bande de fréquences qu'ils utilisent. Le choix de la fréquence affecte de nombreuses propriétés de transmission. La perte en espace libre dépend de la fréquence porteuse. Dans les bandes de fréquences Sub-GHz comme la bande de 868 MHz, les récepteurs captent une plus grande partie de la puissance transmise à une distance donnée par rapport aux bandes de fréquences plus élevées en considérant la même antenne. Et la marge de différence est encore plus grande entre ces bandes quand le trajet entre l'émetteur et le récepteur contient des obstacles comme les murs et les étages. Et pour cause, plus la fréquence est grande plus les atténuations engendrées par les obstacles augmentent. Une autre caractéristique des bandes Sub-GHz est que les circuits sont moins sensibles aux imperfections, ce qui rend leur conception plus simples et donc souvent moins coûteuse.

D'autre part, la bande passante dans les bandes de fréquences sub-GHz est limitée. La bande 868 MHz a une largeur de 7 MHz et elle est divisée en plusieurs sous-bandes pour des applications spécifiques, alors que la bande de 2,4 GHz fournit plus de 80 MHz de bande passante continue. Cela a pour conséquence de limiter le débit de transmission des données en sub-GHz. Bien qu'une transmission à haut débit ne soit pas requise par les applications domotiques, avoir un débit élevé permet de réduire considérablement la consommation d'énergie en émission des produits comme c'est le cas dans le standard EnOcean. L'utilisation d'un débit élevé peut également améliorer le comportement du produit en situation d'interférence car la probabilité de collision est moindre. En outre, les largeurs de bande étroites en sub-GHz limitent l'utilisation des techniques d'étalement du spectre et de communications multi-canaux.

Concernant la robustesse des différentes normes radio, les sources d'interférence doivent être évaluées. Dans la bande 868 MHz, de nombreux appareils fonctionnent sur les mêmes fréquences porteuses. Et bien que la réglementation européenne limite le duty-cycle des émetteurs dans de nombreuses sous-bandes afin de diminuer l'interférence qu'une seule source peut infliger, des interférences peuvent quand même se produire dans les domaines espace-temps-fréquence et les normes de cette bande sont peu équipées de mécanismes destinés à la gestion d'interférence. Pour

BY-NC-ND

éviter les interférences, les systèmes Sub-GHz peuvent changer de fréquence porteuse dynamiquement. Parmi les produits sub-GHz étudiés, seul KNX-RF Multi emploie cette technique.

Dans la bande 2,4 GHz les interférences proviennent principalement des normes de réseau sans fil tels que IEEE 802.11 (Wi-Fi) et Bluetooth. Bien que les communications sans fil en 2,4 GHz ne soient pas soumises à des contraintes de duty-cycle, ils sont généralement plus sophistiqués que les communications sub-GHz et emploient des mécanismes tels que le CSMA utilisé dans la norme ZigBee. En outre, la bande passante en 2,4 GHz étant plus large, il devient possible d'utiliser plusieurs canaux de transmission et des techniques d'étalement de spectre afin d'éviter des interférences en employant par exemple des sauts de fréquences adaptatifs (Bluetooth LE) ou le DSSS (ZigBee).

BY-NC-ND

Tableau II-10 : Comparaison des protocoles RadioFréquences étudiés adaptés des spécifications des protocoles et de la littérature

	KNX-RF Multi-Fast [48]	**KNX-RF Multi-Slow** [48]	**ZigBee** [51]	**Bluetooth LE** [60]	**EnOcean** [62]	**Z-wave** [65]	**SigFox** [68]	**LoRa** [69] [73]
Bande de fréquences (MHz)	868,3 (EU)		868 (EU) / 915 (USA) / 2400 (Universel)	2400 (Universel)	868,3 (EU) / 315 (Amérique du Nord) / 902,875 (USA)/ 928.35 (Japon)	868,42 (EU) / 908,42 (USA)/ 2400 (Universel)	868 (EU) / 902 (USA)	863-870 (EU) 902-928 (USA)
Nb. de canaux	3	2	1 / 10 / 16	40	1	1	6	8
Puissance Maximum	25 mW ERP (+14 dBm)		25 mW ERP (+14 dBm) à 868 MHz 20 mW EIRP (+13 dBm) à 2400 MHz	10 mW EIRP (+10 dBm)	0.5 mW EIRP (-3 dBm) à 315 MHz 20 mW EIRP (+13 dBm) à 868 MHz	25 mW ERP (+14 dBm)	25 mW ERP en uplink (+14 dBm) 500 mW ERP en downlink (+27 dBm)	25 mW ERP (+14 dBm)
Duty-Cycle	F1 → 1 % F2 → 0,1 % F3 → 100 %	S1 → 100 % S2 → 10 %	1 % (868 MHz)	–	10% (315 MHz) 1% (868,3 MHz)	1 % (868 MHz)	1% en uplink 10% en downlink	1% ou 0.1% selon le canal
Débit (kbit/s)	16,384	8,192	20 / 40 / 250	1000	125	9,6 / 40 / 100	0,01 en uplink 0,06 en dowlink	Variable de 0,25 à 5 kbits/s en CSS 50 kbits/s en FSK
Modulation	FSK avec l'indice de modulation $3 \leq m \leq 5$	FSK avec l'indice de modulation $2,5 \leq m \leq 8$	BPSK / BPSK / O-QPSK	GFSK (BT≈0,5, m≈0,5)	ASK / ASK / FSK / FSK	FSK / FSK / GFSK (m≈0.6)	DBPSK en uplink GFSK en downlink	CSS ou FSK
Techniques d'étalement de spectre	n/a		DSSS (1bit→15 chips à 868/915 MHz / 4 bits →32 chips à 2400 MHz)	FHSS	n/a	n/a	Utra Narrow Band	CSS
Détection / Correction d'erreurs	CRC-16		CRC-16	CRC-24 + FEC taux de 1/3 ou 2/3	CRC-8	Checksum de 8 bits ou CRC-16	CRC-16 en uplink CRC-8 en downlink	CRC-16 + FEC taux de 4/5, 4/6, 4/7 ou 4/8
BER / PER maximum	0,01% BER		1% PER	0,1% BER (0-37 octets) 0,064% BER (38-63 octets) 0,034% BER (64-127 octets) 0,017% BER (128-N octets)	0,1% BER	1% PER	0,1% BER	0,1% BER

BY-NC-ND

	KNX-RF Multi-Fast [48]	**KNX-RF Multi-Slow** [48]	**ZigBee** [51]	**Bluetooth LE** [60]	**EnOcean** [62]	**Z-wave** [65]	**SigFox** [68]	**LoRa** [69] [73]
Portée (m)	60 (Indoor) >1000 (Outdoor)		10 - 100 (Line of Sight)	10 - 100 (Line of Sight)	30 (Indoor) / 300 (Outdoor)	40 (Indoor)	30-50 km en zone rurale 3-10 km en zone urbaine	15-22 km (Zone rurale) 3-8 km (Zone urbaine)
Mécanismes de la couche MAC	LBT + AFA + ACKs + Intertrame aléatoire + Retransmission		CSMA/CA + RTS/CTS + ACKs + Backoff aléatoire + Retransmission	AFH + Acquittement + Retransmission	LBT et ACKs uniquement pour les produits alimentés par secteur	LBT + Backoff aléatoire + ACKs + Retransmission	R-FDMA + ACKs + Répétition de trame + Réception massive	FH + ACKs + CSS + Retransmission + Réception massive
Topologie	Etoile	Etoile	Etoile - Maillé	Etoile	Etoile - Maillé	Etoile - Maillé	Etoile d'étoiles	Etoile d'étoiles
Type de produits	Maître – Esclave	Maître – Esclave	Coordinateur – Routeur – Produit terminal	Maître - Esclave	Maître - Esclave	Contrôleur – Produit terminal (source routing)	Serveur (Cloud) – Station de base –- Produit terminal	Serveur (Cloud) – Gateway – Produit terminal
Nb. max de saut de nœuds	1		30 en Mesh routing 10 en Tree routing 5 en Source routing	1	5	4 (Source routing uniquement)	n/a	n/a
Sécurité	n/a		AES-128	AES-128	n/a	AES-128	AES-128	AES-128
Sensibilité	Typ. -95 dBm Min. -80 dBm		Typ. -85 dBm (2,4 GHz) Typ. -92 dBm (868/915 MHz)	Typ. −87 à −93 Min. -70 dBm	Typ. -97 dBm	Min. -95 dBm (9.6 kbits/s) / -92 dBm (40 kbits/s) - 89 dBm (100 kbits/s)	Typ. -140 dBm pour la station de base Typ. -126 dBm pour le produit terminal	Variable selon le débit. Ex à 250 bit/s: -147 dBm pour la gateway et -138 dBm pour le produit terminal
Nombre de nœuds	n/a		2^8 (Etoile) / 2^{16} (Maillé)	n/a	n/a	232	1,8 millions par station de base	62500 par gateway
Latence	24 ms	524 ms	15 ms	1 ms	3 ms (meilleur cas) 1,28 s (pire cas)	5 à 15 ms (40 kbit/s)	~ 2 à 6 secondes	Variable selon le débit. Classe A : Pas de contrainte de latence. Classe B : Qlqs secs. Classe C : < 1 sec.
Configuration	Push Button, ETS (Propriétaire à l'association KNX)		Propriétaire au fabricant	Application smartphone	Push Button	Propriétaire au fabricant	Application local ou à distance	Application local ou à distance
Faiblesses / Inconvénients	Pas de cryptage sécurité + Pas de marché aux USA		Profil non interopérables	Portée limitée (2,4 GHz sans maillage)	Fiabilité (pas d' pour tous les produits) + Applications limités principalement au Push-Button + Pas de sécurité	Propriétaire + Topologie maillée mais en source routing → si le contrôleur arrête de fonctionner le réseau entier tombe	Propriétaire + Imprécisions fréquentielles + Pas d'écoute de canal + Forte latence	Couche PHY propriétaire + Pas d'écoute de canal + Portée plus faible que SigFox

BY-NC-ND

Chapitre III

Les concepts théoriques fondamentaux de transmission de données, de propagation RF et d'interférences

BY-NC-ND

Chapitre III. Les concepts théoriques fondamentaux de transmission de données, de propagation RF et d'interférences

Ce chapitre présente les concepts théoriques fondamentaux sur lesquels repose la transmission de données RadioFréquences. Il présente également les caractéristiques physiques ayant une influence sur la propagation radio et les interférences. Dans un premier temps, la chaine générique de transmission de données et les différents blocs qui la composent seront succinctement décrits. Dans un deuxième temps, les aspects impactant la transmission dans le média radio indoor seront présentés, ainsi que la théorie qui décrit les problématiques de non-linéarité et d'interférences dans les systèmes radio, plus particulièrement au niveau de la réception.

III.1. Les concepts théoriques fondamentaux de transmission de données

Dans une liaison radio, les données numériques doivent subir un certain nombre de transformations avant transmission et une autre série de transformations inverses à la réception. Tous les éléments de ce lien ont des descriptions mathématiques et des théorèmes qui leurs sont associés dans la théorie de l'information et qui régissent leur performance. Une représentation d'une chaine de transmission radio générique est illustrée Figure III-1. Elle comprend les principaux blocs ayant un impact sur la performance du lien radio.

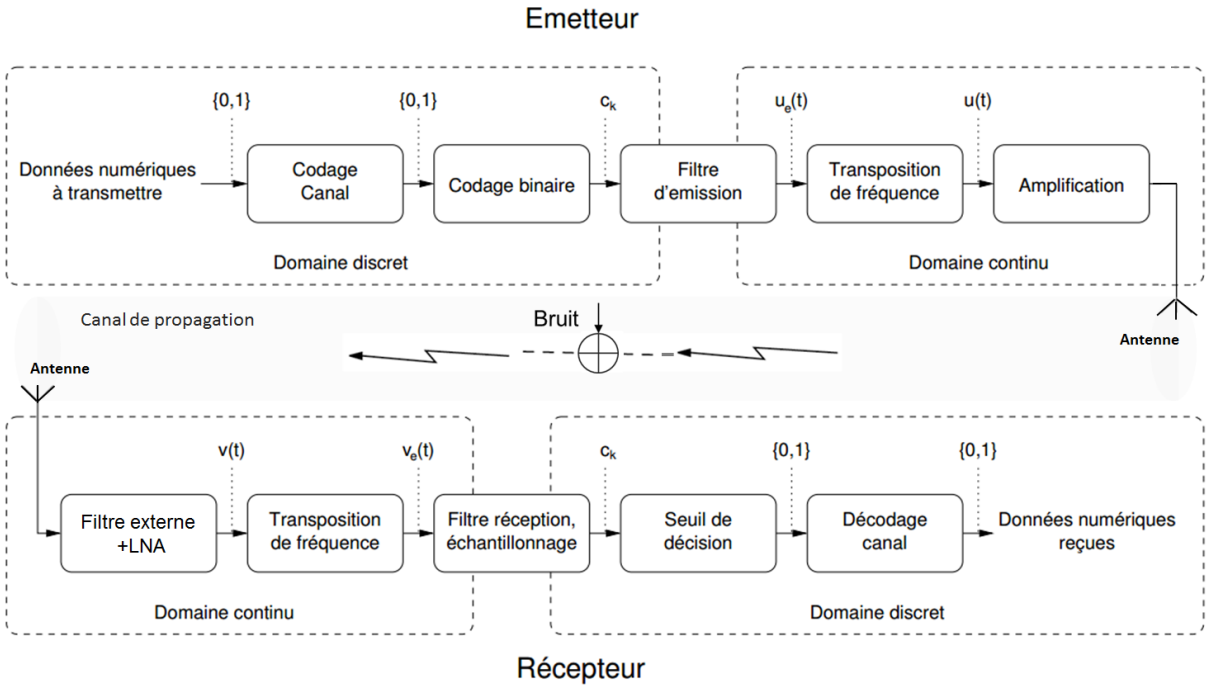


Figure III-1: Etapes d'une chaîne de transmission numérique

En partant de la source de données dans la partie émission, les données sont protégées en utilisant un codage de canal, qui rajoute de la redondance aux bits de données afin de réaliser la correction d'erreurs (FEC : Forward Error Correction) ou bien la détection d'erreur. Les bits encodés sont ensuite transmis à un bloc de décodage binaire qui se charge de transformer, par une modulation numérique,

BY-NC-ND

les bits {0,1} en symboles C_k (Codeword) qui seront associés à N bits et qui peuvent être réels ou complexes. Cette modulation peut se faire en amplitude (ASK), en fréquence (FSK), en phase (PSK) ou en amplitude et phase (QAM). Soit A∈ℝ l'amplitude du signal et M le nombre de symboles possibles tels que $M=2^N$. Les expressions des symboles C_k associés à ces quatre modulations sont décrites dans le Tableau III-1.

Tableau III-1 : Expressions des symboles pour certaines modulations

Type de modulation	Expression des symboles
M-ASK	$C_k = A\, a_k\ ;\ a_k = \big(2k-(M-1)\big)\ avec\ k \in \{0,\dots,M-1\}$
M-FSK	$v_{FSK}(t) = A\, cos[2\pi(f_c + f_k)t]\ ;\ avec$ $v_{FSK}\ la\ forme\ d'onde, k \in \{0,\dots,M-1\}\ et$ $f_k = \big[\big(2k-(M-1)\big)\,\Delta f\big]\ avec\ \Delta f\ la\ deviation\ enfréquence$
M-PSK	$C_k = A\, e^{\left(\frac{2jk\pi}{M}+\varphi_0\right)}\ ;\ \varphi_0\ est\ la\ phase\ du\ premier\ symbole\ et$ $k \in \{0,1,\dots,M-1\}$
M-QAM	$C_k = A\,(a_k + jb_k);\ a_k\,, b_k = \big(2k-(M-1)\big)\ avec$ $k \in \{0,\dots,M-1\}$

Etant donné que le canal de transmission est un milieu continu, avant de pouvoir y transmettre les symboles il faut procéder à une transformation pour obtenir un signal continu. Les symboles ont une cadence d'horloge à la fréquence $\frac{1}{T_s}$, où T_s est la durée du symbole. Une forme d'onde, noté $h(t)$, permettra de transformer le signal discret en signal continu. C'est une fonction non nulle sur l'intervalle [0, T_s]. Une forme d'onde simple est le rectangle de durée T_s.

$$u_e(t) = \sum_{k=0}^{\infty} C_k\, h(t - kT_s) \qquad \text{(III-1)}$$

Le signal qui est généré en sortie a un spectre infini. Sachant qu'en pratique il est impossible d'utiliser tout le spectre dans un canal réel, il est par conséquent nécessaire de rajouter un filtre passe bas après cette forme d'onde. En effet, ce filtre (appelé filtre d'émission) permettra de limiter la bande passante du signal émis. On notera g(t) sa réponse impulsionnelle. Souvent dans un souci de simplification, c'est tout l'ensemble {forme d'onde - filtre d'émission} qui est appelé "filtre d'émission", qui a pour réponse impulsionnelle $g * h(t)$. Le signal ainsi généré devient analogique, et ses composantes analogiques serviront dans les processus suivants. La partie qui sert à la transposition de fréquence comprend un ou plusieurs mélangeurs selon le type de modulation appliquée, et sert, comme son nom l'indique, à transposer le signal bande de base sur la porteuse désiréeg(t). De ce fait, il existe deux architectures d'émetteurs selon le type de transposition en fréquence: l'émetteur

BY-NC-ND

Homodyne (ou à transposition directe, aussi appelé Zero-IF) et l'émetteur superhétérodyne (ou à deux étages) [74].

Il est possible de créer deux porteuses orthogonales à la même fréquence en les déphasant de $\pi/2$. Cette méthode s'appelle la modulation en quadrature, et permet de moduler deux signaux u_I et u_Q avec chacune de ces porteuses. Ainsi, le signal sinusoïdal modulé $u(t) = A\,cos(2\pi f_c t + \varphi)$ peut également s'écrire :

$$\begin{aligned} u(t) &= A\,cos\varphi\,cos(2\pi f_c t) - A\,sin\varphi\,sin(2\pi f_c t) \\ &= u_I\,cos(2\pi f_c t) - u_Q si\,n(2\pi f_c t), \end{aligned} \tag{III-2}$$

tels que $u_I = A\,cos\,\varphi$ et $u_Q = A\,sin\,\varphi$. Les porteuses orthogonales en phase et en quadrature correspondent respectivement aux termes $cos(2\pi f_c t)$ et $sin(2\pi f_c t)$.

Si l'on considère par exemple la modulation PSK, les termes en quadrature s'écriront alors $u_I(t) = A\,cos\,\varphi(t)$ et $u_Q(t) = A\ sin\,\varphi(t)$. Pour simplifier les notations, les deux signaux à moduler $u_I(t)$ et $u_Q(t)$ peuvent ainsi être regroupés en un seul terme, appelé enveloppe complexe :

$$u_e(t) = u_I(t) + j u_Q(t) \tag{III-3}$$

Dans ce cas, la modulation d'amplitude de l'enveloppe complexe s'écrit :

$$u(t) = Re\{u_e(t) e^{2j\pi f_0 t}\} \tag{III-4}$$

En combinant les formules (III-1) et (III-4) on obtient :

$$u(t) = Re\left\{e^{2j\pi f_c t} \sum_{k=0}^{\infty} C_k\ (h * g)(t - kT_s)\right\} \tag{III-5}$$

Le signal modulé, noté $u(t)$, est ensuite amplifié en fonction de la puissance sélectionnée, et l'amplificateur est relié à une antenne qui rayonne et crée le signal radio. Le signal rayonné est transmis sur le canal radio, qui est caractérisé par des atténuations provenant de l'environnement physique. Ces caractéristiques seront étudiées dans la section III.3. Par ailleurs, au cours des différentes étapes de transformation du signal dans la chaine de transmission du bruit peut se rajouter au signal utile. De plus, en cas d'interférence dans le canal radio, une puissance additionnelle non désirable provenant de l'interféreur se rajoute également au signal. Ces phénomènes seront quant à eux étudiés dans la section III.3.

A la réception, l'antenne capture le signal et le transmet à l'amplificateur faible bruit LNA (Low Noise Amplifier). L'antenne de réception peut avoir un gain additionnel, alors que le LNA dégrade le rapport signal à bruit. Le bruit rajouté par le LNA est décrit par la figure de bruit (NF : Noise Figure). Le signal en sortie subit une nouvelle transposition de fréquence en utilisant un ou plusieurs mixeurs

BY-NC-ND

afin de convertir le signal de la fréquence porteuse à une fréquence intermédiaire (IF : Intermediate Frequency) puis en bande de base (récepteur superhétérodyne), ou directement en bande de base (récepteur Homodyne). Si la fréquence porteuse f_c est connue, et si l'on reconsidère le signal modulé en ASK comme exemple, la démodulation consisterait à multiplier $u(t)$ par un signal sinusoïdal de fréquence porteuse f_c, le signal résultant s'écrit alors:

$$v(t) = u(t)\,sin(2\pi f_c t) = A(t)\,sin^2(2\pi f_c t) = \frac{A(t)}{2} - \frac{A(t)\,cos(4\pi f_c t)}{2} \qquad \text{(III-6)}$$

Pour isoler le signal bande de base qui contient l'information $A(t)$, il suffit de réaliser un filtrage passe-bas. En cas de modulation en quadrature, les deux signaux $u_I(t)$ et $u_Q(t)$ sont démodulés en les multipliant respectivement par deux porteuses déphasées de $\pi/2$ qui sont $cos(2\pi f_c t)$ et $sin(2\pi f_c t)$. De la même manière que dans la démodulation classique, un filtrage passe-bas est nécessaire pour isoler le signal bande de base. A ce stade, le signal est encore continu, par conséquent un échantillonnage doit être réalisé afin de déterminer les d'éléments binaires transmis. Pour ce faire, il faut réaliser un filtrage en réception adapté au filtrage utilisé en émission pour une réception optimale des symboles transmis.

III.2. Les différents types d'architectures de transceiver pour la transposition de fréquence

Intéressons-nous maintenant à la partie hardware. Comme mentionné précédemment, il existe plusieurs architectures en émission et en réception qui permettent de moduler le signal et de le transposer à la bonne fréquence. Elles sont divisées en deux principales catégories : les architectures Homodyne et les architectures Super-Heterodyne.

III.2.1.1. Emetteur « Homodyne » et émetteur « Super-Hétérodyne », quelles différences ?

L'émetteur Homodyne consiste à transposer le signal en bande de base directement à la fréquence d'émission. En effet, après une conversion numérique analogique et un filtrage passe-bas de reconstitution, le signal est mélangé avec un signal de même fréquence généré par un oscillateur local afin de réaliser la transposition en fréquence radio f_{RF}. Le signal subit ensuite une amplification de puissance et un filtrage passe-bande avant d'être rayonné par l'antenne. Cette architecture d'émission possède certains inconvénients parmi lesquels certains ont conduit au développement d'une autre architecture appelée « Super-Hétérodyne ». Cette dernière consiste à faire une transposition indirecte de fréquence en utilisant une ou plusieurs fréquences intermédiaires (IF : Intermediate Frequency).

BY-NC-ND

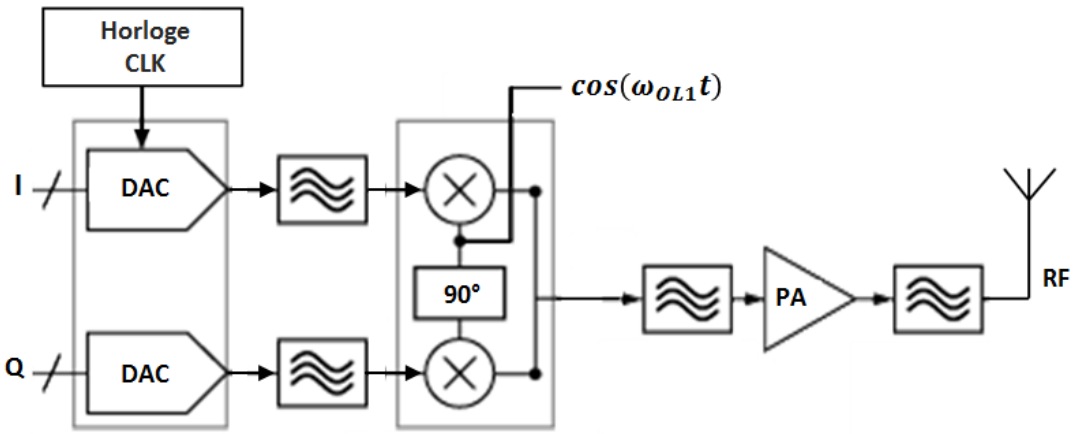


Figure III-2 : Architecture typique d'un émetteur Homodyne rajout additioneur

Dans un émetteur Homodyne typique Figure III-2, le mélangeur utilisé par le modulateur IQ n'est pas idéal et n'est donc pas parfaitement isolé : des signaux d'intermodulation qui peuvent affecter le signal émis et les canaux adjacents se retrouvent à la sortie du modulateur. Un filtre passe-bande est donc utilisé pour filtrer ces fréquences indésirables. Le signal est ensuite injecté dans un amplificateur de puissance, celui-ci est également caractérisé par des non-linéarités et peut créer des intermodulations [75]. Un filtre passe-bande est de nouveau nécessaire pour isoler le signal utile. Ces phénomènes de non-linéarités ne sont pas spécifiques à l'architecture Homodyne ; ils existent également dans l'architecture superhétérodyne (Figure III-3) qui utilise également des composants non-linéaires. Une description théorique des problèmes de non-linéarités sera présentée dans la section III.3.

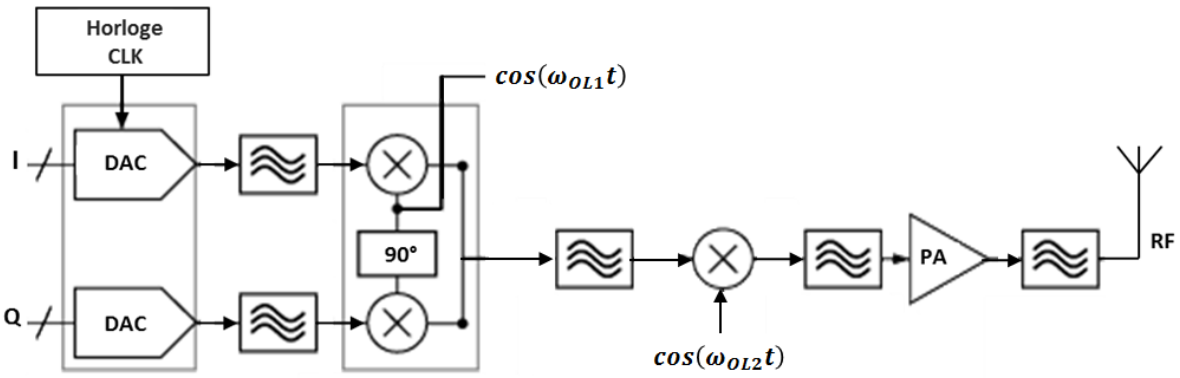


Figure III-3 : Architecture typique d'un émetteur Super-Hétérodyne

Toujours dans le cas de l'émetteur Homodyne, lorsque l'amplification forte du signal à émettre est effectuée, un couplage important apparaît entre l'amplificateur de puissance (PA) et l'oscillateur local qui oscille à la même fréquence que le signal entrant. Ce défaut provoque deux phénomènes appelés "Injection Pulling" lorsque l'amplitude du signal RF change, ou "Injection Locking " lorsque c'est la fréquence de l'OL qui varie [76]. En outre, étant donné que la conversion directe nécessite un oscillateur à fréquence élevée, il est difficile d'obtenir une quadrature parfaite entre les voies I et Q [77]. Pour remédier à ces inconvénients, une approche consiste à réaliser la transposition en fréquence

BY-NC-ND

du signal bande de base en deux (ou plusieurs) étapes à l'aide de mélangeurs supplémentaires, et c'est là, le principe des émetteurs Super-Hétérodynes. Ainsi, les fréquences comprises dans le spectre du signal à la sortie de l'amplificateur sont éloignées des fréquences propres des oscillateurs.

III.2.1.2. Le récepteur Super-Hétérodyne

Il existe plusieurs types d'architectures Super-Hétérodynes possibles en réception [78], mais elles reposent toutes sur le même principe - le signal RF est d'abord amplifié dans une étape sélective en fréquence et à faible bruit, puis converti à une fréquence intermédiaire grâce à un mélangeur à f_{OL1} suivi d'une amplification significative et d'un filtrage supplémentaire [79]. Dans la plupart des récepteurs de ce type, c'est la fréquence f_{OL1} de l'oscillateur qui est variable, et ce, de telle sorte que tous les canaux radio dans la bande de fréquences d'opération soient transposés à une même et unique fréquence intermédiaire f_{IF}. L'étape suivante consiste à transposer le signal en bande de base grâce à un démodulateur IQ en utilisant un mélangeur de fréquence f_{OL2}. Le synoptique du récepteur superhétérodyne typique est présenté Figure III-4.

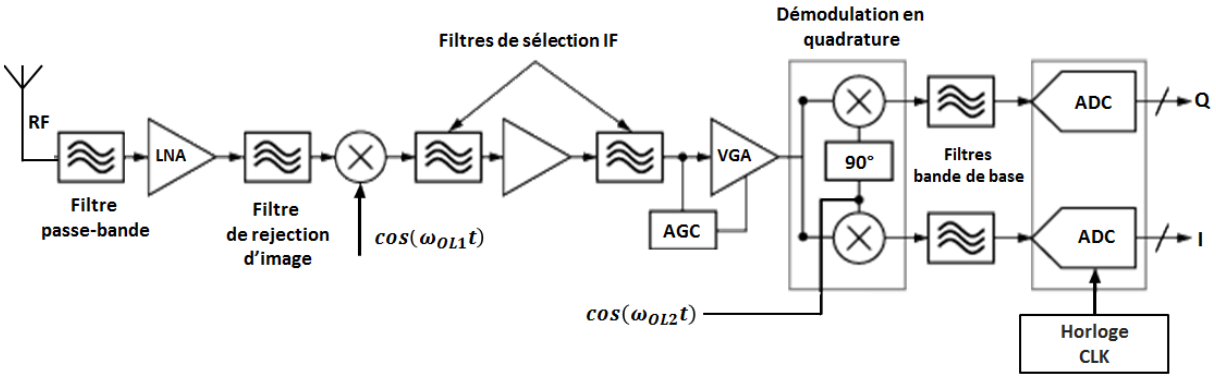


Figure III-4 : Architecture typique d'un récepteur Super-Hétérodyne

Le passage du signal f_{IF} dans le premier mélangeur, produit un signal à la fréquence $f_{OL1} + f_{RF}$ et un autre à la fréquence intermédiaire défini par $f_{IF} = f_{OL1} - f_{RF}$. Dans le cas où un signal indésirable se trouve à une fréquence f_{im} symétrique à celle du signal radio reçu f_{RF} par rapport à la fréquence de l'oscillateur f_{OL1}, les signaux à f_{RF} et f_{im} se retrouveront tous les deux à la fréquence f_{IF} en sortie du mélangeur, provoquant ainsi une interférence. En raison de cette symétrie fréquentielle, le signal indésirable est appelé signal image (Figure III-5).

En règle générale, si la fréquence intermédiaire f_{IF} est élevée, l'image est alors loin du signal radio reçu et peut donc être filtrée par un filtre de réjection d'image situé avant le premier mélangeur. Cependant, ce filtrage constitue un véritable challenge dans l'architecture Super-Hétérodyne car il nécessite un filtre à "ondes de surface" (SAW) ou à "ondes de volume" (BAW) très sélectif ayant un facteur de qualité Q important, ce qui est difficile à concevoir.

BY-NC-ND

A contrario, si la fréquence intermédiaire est faible, la sélection de fréquence est moins contraignante, mais une suppression correcte de l'image devient plus difficile à réaliser. La Figure III-5 illustre ces problèmes de haute et basse fréquence intermédiaire.

L'architecture superhétérodyne requiert donc un fort compromis entre la sensibilité et la sélectivité en fréquence. En pratique, davantage d'étages IF de mélangeurs peuvent être utilisés pour atténuer ces contraintes.

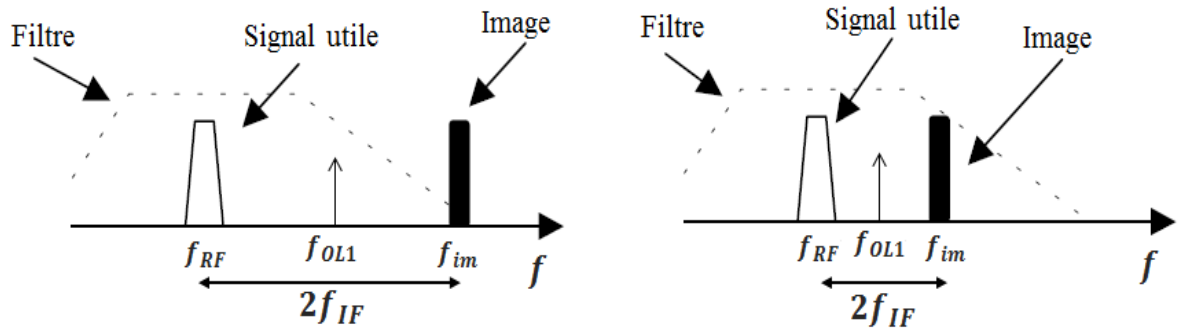


Figure III-5 : Problème de haute et basse fréquence intermédiaire dans un récepteur Super-Hétérodyne

Après ce filtrage, le signal IF subit une amplification supplémentaire et sa puissance est stabilisée à un niveau prédéterminé par une boucle AGC (Automatic Gain Control) pour optimiser le processus de démodulation en quadrature. Une adaptation de gain est en effet nécessaire pour corriger proprement le signal analogique avant sa conversion numérique, car les Convertisseurs Numérique-Analogique (DAC : Digital to Analog Converter) présentent la plupart du temps une dynamique limitée. Les composantes I/Q qui en résultent sont ensuite filtrées en bande de base et sont numérisées par un double ADC (Analog to Digital Converter).

III.2.1.3. Le récepteur Homodyne

Dans le cas du récepteur Homodyne, le signal radio reçu de fréquence f_{RF} est converti directement en bande de base via des mélangeurs en quadrature qui oscillent à la même fréquence. Le signal est filtré par un filtre passe-bande puis amplifié par un amplificateur faible bruit (LNA : Low Noise Amplifier) avant d'être transposé directement en bande de base par un démodulateur IQ. Ceci est illustré dans le schéma synoptique de la Figure III-6.

Le principal avantage d'un récepteur Homodyne est qu'il ne souffre pas du problème d'image car la conversion de fréquence est directe (pas de fréquence intermédiaire). Un autre avantage de cette architecture est sa simplicité. En effet, il n'y a plus besoin de concevoir un filtre passe-bande très sélectif à fort facteur de qualité.

BY-NC-ND

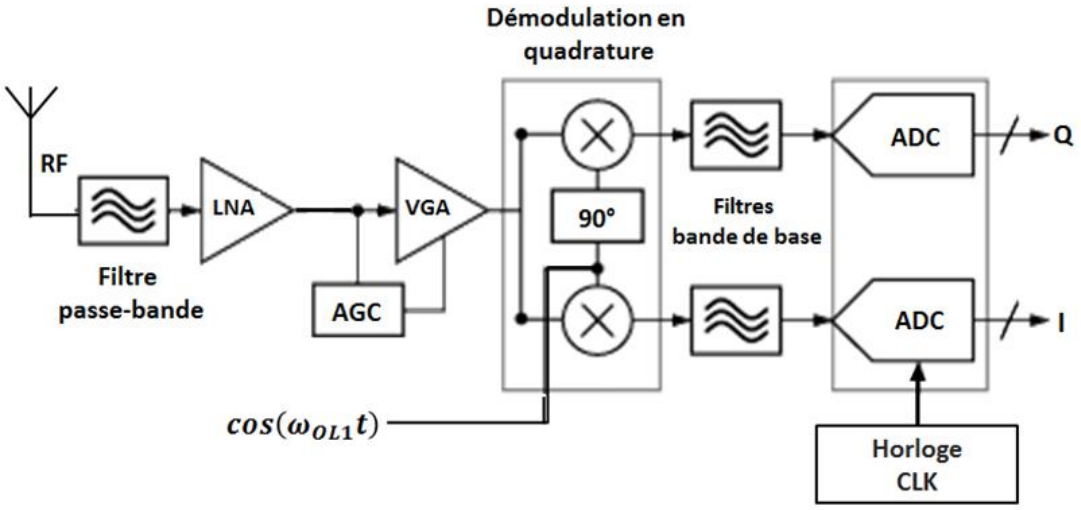


Figure III-6 : Architecture typique d'un récepteur Homodyne

Cependant, ce récepteur souffre d'un certain nombre de problèmes d'implémentation. L'inconvénient majeur est l'offset DC critique qui peut être généré à la sortie du mélangeur lorsqu'une fuite du signal généré par l'oscillateur local est mélangée avec le signal normalement généré par cet oscillateur même [80] comme illustré sur la Figure III-7. Cela a pour conséquence de saturer les étapes suivantes et d'affecter le processus de détection du signal. En outre, étant donné que la sortie du mélangeur est un signal en bande de base, il peut facilement être endommagé par les non-linéarités du mélangeur, en particulier lorsque le signal radio reçu est faible.

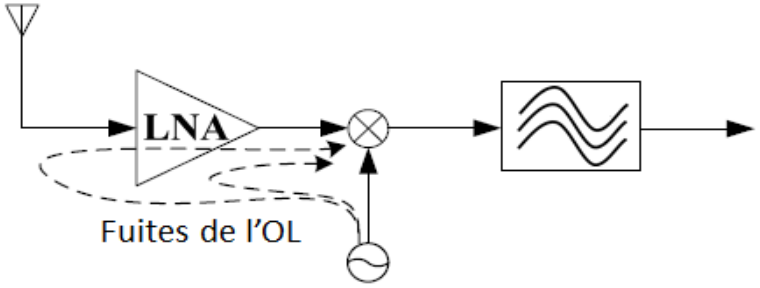


Figure III-7 : Problème de la fuite de l'oscillateur local et auto-interférence dans un récepteur Homodyne

III.3. Les caractéristiques de bruits internes au transceiver radio : les non-linéarités, le bruit et leur impact sur le signal reçu

Dans cette partie, les paramètres internes fondamentaux qui caractérisent les performances d'un transceiver radio sont discutés, en particulier dans la partie réception. Dans une communication radio, la qualité du signal est détériorée par des signaux indésirables tout au long de la chaine de transmission radio. Outre le bruit rajouté par le canal de propagation radio, les émetteurs-récepteurs sans fil ajoutent leur propre bruit et signaux indésirables qui dégradent davantage la qualité du signal.

La Figure III-8 montre un scenario critique typique où, au moment où le récepteur reçoit un signal utile faible d'un émetteur placé très loin, un autre émetteur à proximité de ce récepteur perturbe le signal utile avec un fort signal indésirable. Etant donné que les signaux d'interférence peuvent avoir

BY-NC-ND

une puissance considérable comparés au signal utile, la conception d'un système capable de détecter le signal utile faible dans un tel scénario présente un challenge majeur de conception et nécessite l'intégration de composants faible bruit ayant une bonne linéarité. Pour caractériser à quel point un récepteur sans fil dégrade la qualité du signal, différents paramètres sont utilisés comme indicateurs.

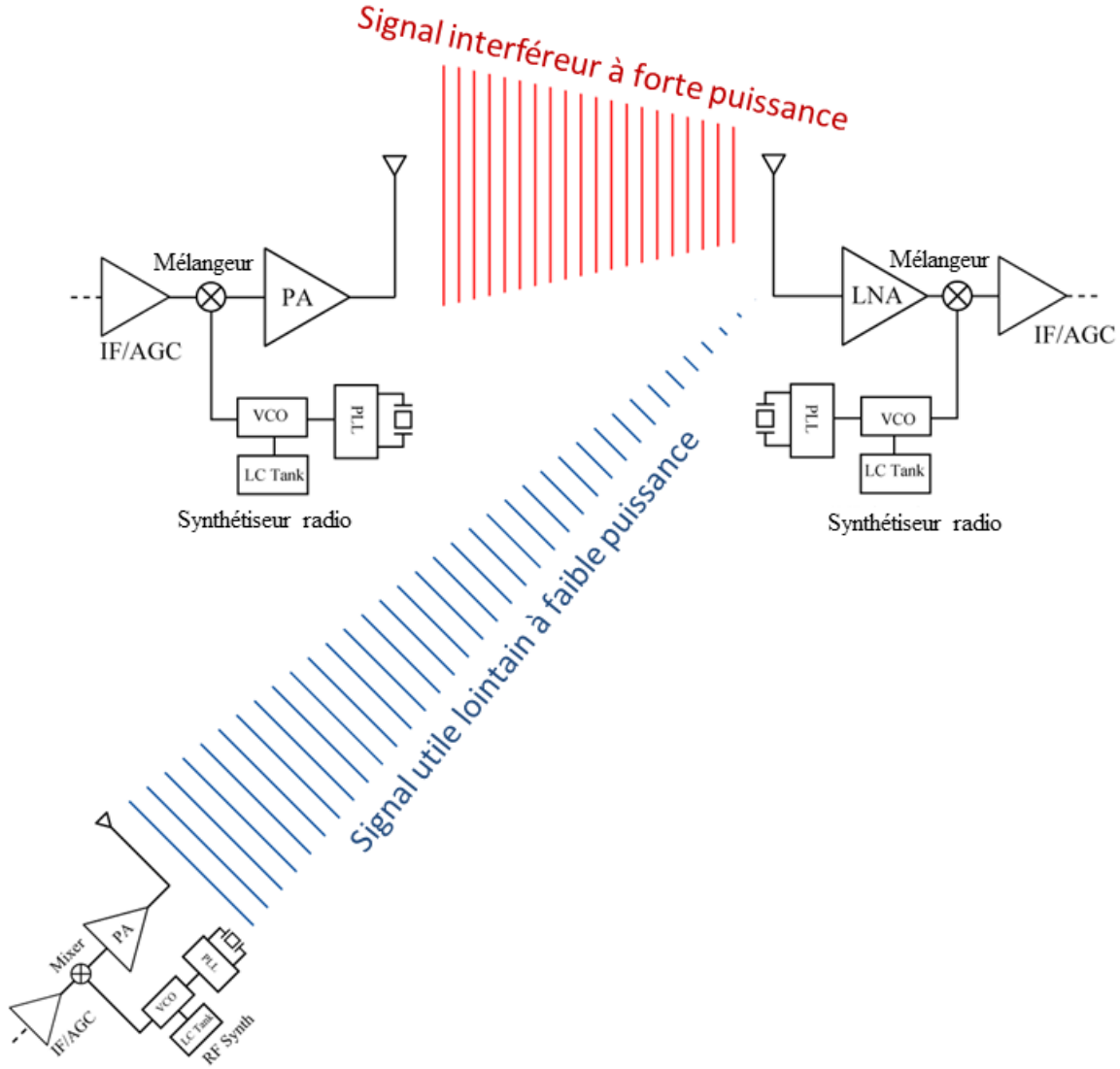


Figure III-8 : L'importance de la distance par rapport au récepteur dans un scénario d'interférence

III.3.1. Le bruit

Les fluctuations aléatoires des grandeurs physiques peuvent conduire le récepteur à capter des signaux à la fréquence d'opération qui ne sont pas liés au signal utile et placerait un seuil minimum sur le signal utile qui peut être détecté. La métrique pour caractériser ceci dans le récepteur est la figure de bruit. En général, le bruit dans le récepteur provient de trois sources [81]:

- **Le bruit thermique** est dû au mouvement thermique des porteurs de charge (en général des électrons). Tout élément du circuit qui comporte une résistance dans sa modélisation, a un bruit

BY-NC-ND

thermique. La densité spectrale du bruit thermique est constante dans la bande observable et peut être modélisée par un bruit blanc.

- L**e bruit de Grenaille (Shot Noise)** existe dans les structures où les porteurs de charge passent une barrière de potentiel comme par exemple dans les jonctions $P-N$, diodes et transistors. La densité spectrale de puissance de ce type de bruit est également constante et peut être modélisée comme un bruit blanc.
- **Le bruit de scintillation (Flicker Noise)** est dû à la capture piège et à la libération intermittente des porteurs de charge au niveau du canal de silicium et d'oxyde. Ce phénomène donne quant à lui à la densité spectrale de puissance une allure en $1/f$, c'est-à-dire qu'il décroit avec l'augmentation de la fréquence jusqu'à une fréquence de transition, coin ou pivot, pour rester pratiquement constant ensuite. Ainsi, ce bruit fait partie de ce que l'on appelle les bruits roses.

Quelle que soit la source du bruit, la performance du récepteur en termes de bruit global doit être évaluée. Cela peut être fait avec l'équation suivante. Etant donné que le bruit et le signal utile en entrée des composants électroniques vont subir le même gain tout au long de la chaine de transmission, le bruit ajouté par ces composants même va causer une dégradation du rapport signal à bruit entre l'entrée et la sortie de chaque composant. Ce rapport est appelé le « facteur de bruit » sur l'échelle linéaire et « figure de bruit » ou Noise Figure (NF) en anglais sur l'échelle logarithmique comme défini par ces équations :

$$Facteur\ de\ bruit = \frac{SNR_{in}}{SNR_{out}} \tag{III-7}$$

$$NF = 10\,log(Facteur\ de\ bruit)[dB] \tag{III-8}$$

Le facteur de bruit du récepteur est un paramètre important qui détermine le signal le plus faible qui peut être détecté. Cela se traduit directement par une distance maximale de l'émetteur où la communication est possible (portée). La puissance du bruit en sortie du récepteur, qui dépend du facteur de bruit, de la largeur de bande et du gain du récepteur, peut être calculée comme suit :

$$N_{out}[dBm] = -174\,dBm + 10\,log\,BW + NF[dB] + G[dBm] \tag{III-9}$$

Maintenant, si l'on divise (en linéaire) le bruit en sortie par le gain du récepteur pour obtenir l'équivalent de ce bruit en entrée, cela nous indiquera la valeur en dBm du signal minimum que le système est capable de détecter.

$$SMD[dBm] = -174dBm + 10\,log\,BW + NF[dB], \tag{III-10}$$

avec SMD le Signal Minimum Détectable. Le plancher de bruit est directement proportionnel à la bande passante. Par conséquent, pour les systèmes ayant un débit de données plus grands et qui

BY-NC-ND

nécessitent donc des bandes passantes plus larges pour un schéma de modulation donné, la valeur minimum du signal détectable augmente.

III.3.2. Le bruit de phase

L'oscillateur local du système est l'unité en charge de décalage fréquentiel du signal RF reçu. Comme tout dispositif électronique, un oscillateur est producteur de bruit. Tant qu'un oscillateur est basé sur un amplificateur associé à un quartz, son bruit n'est généralement pas rédhibitoire car le quartz présente le ton le plus pur. L'utilisation de circuits oscillants de moindre qualité (Q) et l'apparition de montages plus sophistiqués (ex. PLL et DDS) a rapidement montré leurs faiblesses alors que les performances exigées deviennent de plus en plus sévères. Ces nouveaux montages présentent des non-idéalités et du bruit, qui créent une composante de gigue (jitter) dans la phase de la forme d'onde et qui propage ainsi l'énergie du ton dans le spectre.

$$OL(t) = A\,cos\big(\omega_{OL}t + \varphi_{n(t)}\big), \tag{III-11}$$

où $\varphi_{n(t)}$ représente le bruit de phase. Cela revient donc à moduler le signal en sortie dans les bandes latérales autour de la porteuse. Le bruit de phase est en fait une légère modulation de la porteuse produite par l'oscillateur, ce qui se traduit par des bandes latérales plus ou moins importantes. Il est quantifié dans le domaine fréquentiel en termes de dBc/Hz ce qui, traduit en langage ‘‘courant’’, signifie : la différence de puissance (en dB) entre l'une des bandes latérales qui résultent de l'instabilité et la fréquence porteuse idéale. Dans la pratique, cette différence de puissance est ramenée à une bande passante de 1 Hertz ramenée.

Si l'OL est bruyant (c'est à dire que la décroissance du bruit est faible quand on s'éloigne de la porteuse), ce bruit va se mélanger avec des signaux adjacents au canal écouté et tomber dans la bande passante du récepteur. Le résultat sera une augmentation du bruit du canal écouté, et qui dit augmentation du bruit dit diminution de la sensibilité du récepteur. Ce phénomène si gênant illustré dans la Figure III-9 s'appelle en anglais: Reciprocal Mixing (mélange mutuel ou réciproque).

$$OL(t) = A\,cos\big(\omega_{OL}t + \varphi_{n(t)}\big) \tag{III-12}$$

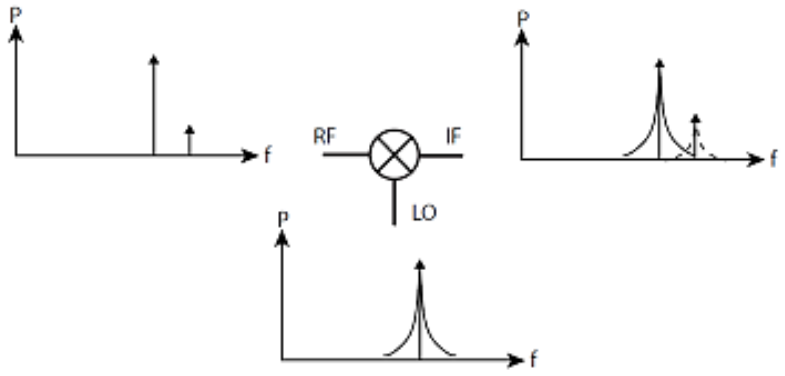


Figure III-9 : Le mélange réciproque causé par l'oscillateur harmonique (Reciprocal Mixing)

BY-NC-ND

Le niveau de bruit dans la bande de signal utile provoqué par ce mélange réciproque peut être exprimé comme suit :

$$P_{n,RecMix}[dBm] = P_{interféreur}[dBm] \; + \; L\,(\Delta f) \; + \; 10\log BW, \tag{III-13}$$

où $P_{interféreur}$ est le niveau de puissance du bloqueur (interféreur), $L(\Delta f)$ est le bruit de phase mesuré entre le bloqueur et le signal utile, alors que BW désigne la bande passante du signal utile. L'hypothèse est que le bruit de phase est constant au long de la BW du signal désiré. Si la bande passante du signal est grande et le bruit de phase variant, cela devrait être pris en considération.

III.3.3. La sensibilité

La sensibilité est définie comme étant la puissance minimale du signal requise pour une qualité spécifique de l'information reçue. Dans l'information numérique, cela sera mesuré par le taux d'erreur binaire TEB (ou le taux d'erreur par trame). D'un point de vue statistique, on notera une différence entre le TEB et la probabilité d'erreur P_e, en admettant que la probabilité d'erreur est égale à l'espérance mathématique du TEB, $P_e = E[TEB]$, ou autrement dit que le $TEB \rightarrow P_e$ lorsque le nombre de bits transmis tend vers l'infini.

Fondamentalement, la sensibilité est le niveau de puissance requis pour obtenir un rapport signal à bruit spécifique (TEB spécifié par le standard de la technologie utilisée) :

$$Sensibilité[dBm] = SMD[dBm] + SNR[dB] \tag{III-14}$$

III.3.4. Les non-linéarités

Les systèmes non-linéaires sont des systèmes capables de générer de nouvelles fréquences. En d'autres termes, leur spectre de fréquence en sortie n'est pas nécessairement le même que celui en entrée. Pour commencer l'étude des effets des non-linéarités, il faut commencer par les systèmes non-linéaires sans mémoire et invariants dans le temps. Pour de tels systèmes, le signal de sortie peut être exprimé à l'aide d'un développement en série de Taylor comme suit :

$$y(t) = a_1 x(t) + a_2 x^2(t) + a_3 x^3(t) + \cdots \tag{III-15}$$

III.3.4.1. La distorsion harmonique

Si uniquement une sinusoïde est appliquée à un système non-linéaire, le spectre en sortie comporte des composantes de fréquence qui sont des multiplies entiers de la fréquence d'entrée. En remplaçant $x(t)$ par $A\cos(\omega t)$ dans l'équation ci-dessus, on obtient:

BY-NC-ND

$$y(t) = a_0 + a_1 A\,cos(\omega t) + a_2 A^2\,cos^2(\omega t) + a_3 A^3\,cos^3(\omega t) \quad \text{(III-16)}$$

$$= a_0 + a_1 A\,cos(\omega t) + \frac{a_2 A^2}{2}(1 + cos(2\omega t)) + \frac{a_3 A^3}{4}(3cos(\omega t) + cos(3\omega t))$$

$$= a_0 + \frac{a_2 A^2}{2} + \left(a_1 A + \frac{3a_3 A^3}{4}\right)cos(\omega t) + \frac{a_2 A^2}{2}cos(2\omega t) + \frac{a_3 A^3}{4}cos(3\omega t)$$

A partir de cette équation, on peut calculer la puissance des harmoniques dans le spectre en sortie. Par ailleurs, quelques phénomènes importants peuvent être décrits à partir de cette équation :

III.3.4.2. La compression de gain

Tous les systèmes conçus ont une plage dynamique spécifique qui détermine le signal minimal et le signal maximal que le système peut traiter. En général, le calcul du gain en régime petits signaux (A faible) est effectué en négligeant les harmoniques. Ainsi si on considère que tous les termes en $A^n << a_1 A$, le gain est a_1 et il est seulement valide pour les régimes suffisamment faible en puissance. Quand la puissance du signal en entrée augmente, la puissance du signal en sortie augmente linéairement jusqu'à une certaine valeur. Ensuite, le gain du système à cette fréquence particulière commence à changer et on sort de la zone linéaire. Ce phénomène est naturel car il y a toujours une limite à la quantité de puissance qu'un système peut générer.

Pour quantifier cet effet, un paramètre appelé le point de compression à -1dB est défini. Il correspond au point de fonctionnement du système pour lequel le gain « petits signaux » est diminué de 1 dB par rapport à un système idéal parfaitement linéaire (Figure III-10).

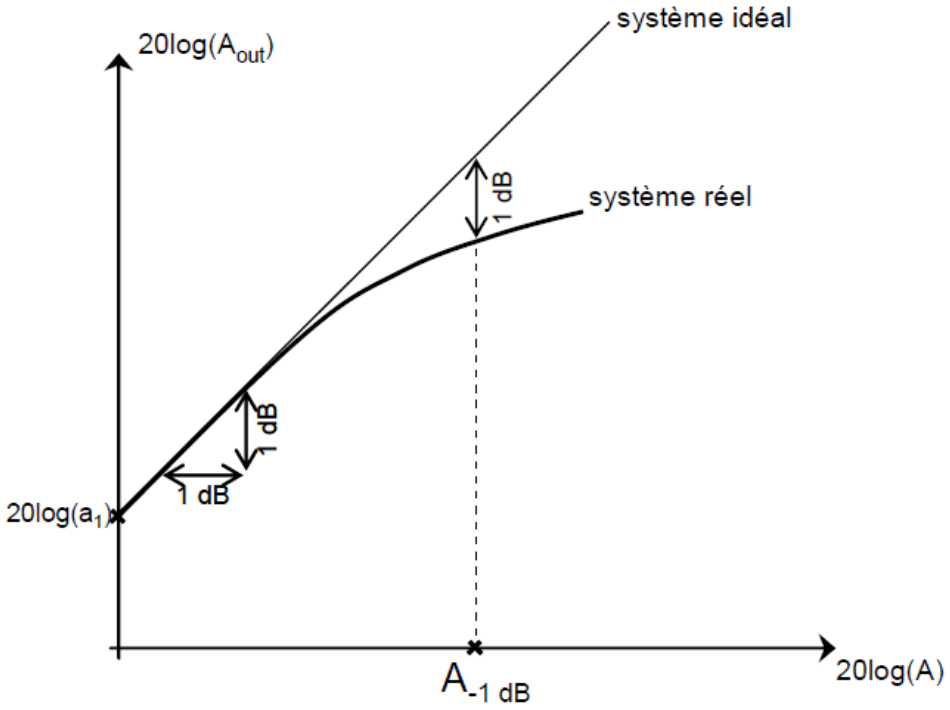


Figure III-10 : Le point de compression à -1 dB

BY-NC-ND

Considérons un système à symétrie impaire qui comporte des non-linéarités jusqu'au troisième ordre. En reprenant l'équation développée (III-16), le gain G du fondamental s'écrit :

$$G = a_1 + \frac{3}{4} a_3 A^2, \tag{III-17}$$

où A est l'amplitude du signal d'entrée. De toute évidence, le second terme est responsable de la compression du gain. Tout d'abord, on peut noter l'importance du signe du terme a_3. Compte tenu de la conservation de l'énergie dans un système électronique, a_3 doit être négatif dans le cas d'un signal assez grand. Le calcul du point de compression se déduit de la Figure III-10.

$$20\,log\left|a_1 + \frac{3}{4} a_3 A_{-1dB}^2\right| + 1dB = 20\,log|a_1| \tag{III-18}$$

Ce qui implique :

$$A_{-1dB} = \sqrt{0{,}11 \frac{4}{3} \left|\frac{a_1}{a_3}\right|} \tag{III-19}$$

En général, le point de compression à -1dB donne au concepteur RF une idée sur le degré de linéarité du système et à quel moment il va entrer dans le régime non-linéaire pour commencer à se soucier d'autres mécanismes.

III.3.4.3. La désensibilisation

Ce phénomène est beaucoup plus gênant pour le concepteur RF que la compression car dans ce cas le signal utile reste faible et c'est le signal d'interférence qui domine le canal radio. Alors pourquoi la désensibilisation peut-elle nuire au système ? Imaginez un scénario dans lequel un signal indésirable de puissance élevée accompagne un signal utile de faible puissance. Le gain du système est comprimé en raison du traitement de ce grand signal indésirable. Par conséquent, le facteur de bruit total s'écrirait :

$$F_{Total} = F_1 + \frac{F_1 - 1}{G_1} + \frac{F_3 - 1}{G_1 G_2} + \cdots + \frac{F_k - 1}{G_1 G_2 \ldots G_{k-1}} \tag{III-20}$$

Si le gain G_1 diminue à cause de la puissance interférente, la contribution du bruit des étages suivants devient importante. Par conséquent, le signal minimum détectable devrait avoir une puissance plus élevée pour être capté à travers le bruit. Pour quantifier cet effet, les équations sont les mêmes que dans le scénario de compression avec la différence qu'on ne reçoit plus un seul signal, mais deux signaux ; le signal utile et le signal interféreur $x(t) = A_S \cos(\omega_S t) + A_B \cos(\omega_B t)$, ce qui conduit en sortie au signal :

BY-NC-ND

$$y(t) = \left(a_1 A_S + \frac{3a_3 A_S^3}{4} + \frac{3a_3 A_S A_B^2}{2}\right) cos(\omega_S t) \quad \text{(III-21)}$$

Sachant que $A_S \ll A_B$, on peut obtenir le gain du signal utile :

$$y(t) = \left(a_1 + \frac{3a_3 A_B^2}{2}\right) A_S \, cos(\omega_S t) \quad \text{(III-22)}$$

Comme discuté précédemment, le terme a_3 est négatif. Par conséquent, le gain du signal utile diminue avec l'augmentation de la puissance de l'interféreur. Sur la base de l'équation ci-dessus, on peut calculer la perte de gain à mesure que la puissance du signal bloqueur augmente.

III.3.4.4. Les intermodulations

La distorsion d'intermodulation se produit lorsque les signaux en entrée ne sont plus des tons purs, ou bien si le signal utile est sujet à deux signaux interféreurs ou plus. Dans un tel scénario, les composantes du spectre de sortie ne sont pas nécessairement des harmoniques. Ces produits de distorsion proviennent de la différence et la somme des tons en entrée et de leurs harmoniques. Pour quantifier ces effets, on peut considérer un signal d'entrée deux tons tel que $x(t) = A_1 \cos(\omega_1 t) + A_2 \cos(\omega_2 t)$. Le calcul du spectre en sortie jusqu'au troisième ordre suit l'équation :

$$y(t) = a_0 + a_1\big(x(t)\big) + a_2\big(x(t)\big)^2 + a_3\big(x(t)\big)^3 \quad \text{(III-23)}$$

En développant les termes de cette expression on obtient toutes les composantes du spectre en sortie à savoir, les fondamentaux :

à f_1 $$\left(a_1 + \frac{3}{4}a_3 A_1^2 + \frac{3}{2}a_3 A_2^2\right) A_1 cos(\omega_1 t) \quad \text{(III-24)}$$

et f_2 $$\left(a_1 + \frac{3}{4}a_3 A_2^2 + \frac{3}{2}a_3 A_1^2\right) A_2 cos(\omega_2 t) \quad \text{(III-25)}$$

les harmoniques de f_1 et f_1 non détaillés ici et différents termes d'intermodulation aux fréquences.
Les intermodulations d'ordre 2 (IM_2) s'expriment comme suit :

à $(f_1 \pm f_2)$ $$a_2 A_1 A_2 cos((\omega_1 + \omega_2)t) + a_2 A_1 A_2 cos((\omega_1 - \omega_2)t) \quad \text{(III-26)}$$

et les intermodulations d'ordres 3 (IM_3) s'écrivent comme suit :

à $(2f_1 - f_2)$ $$\frac{3}{4}\, a_3 A_1^2 A_2 cos((2\omega_1 - \omega_2)t) \quad \text{(III-27)}$$

et $(2f_2 - f_1)$ $$\frac{3}{4}\, a_3 A_2^2 A_1 cos((2\omega_2 - \omega_1)t) \quad \text{(III-28)}$$

Les produits d'intermodulation de second ordre à $(f_1 \pm f_2)$ sont problématiques principalement dans les récepteurs Homodynes. D'autre part, les produits d'intermodulation du troisième ordre sont problématiques pour tous les récepteurs, indépendamment de leur architecture, car ils peuvent être très

BY-NC-ND

proches du signal fondamental en entrée et deviennent alors difficiles à éliminer par filtrage. En effet, la Figure III-11 illustre les produits d'intermodulations développés jusqu'à l'ordre 7 et il apparait que les produits d'ordres impairs $(f_1 \pm 2f_2)$ et $(f_2 \pm 2f_1)$ donnent des signaux proches des fréquences d'entrée : c'est dire que les produits d'intermodulation d'ordres impairs ne peuvent être supprimés par filtrage et que la seule solution réside dans une amélioration de la linéarité du système.

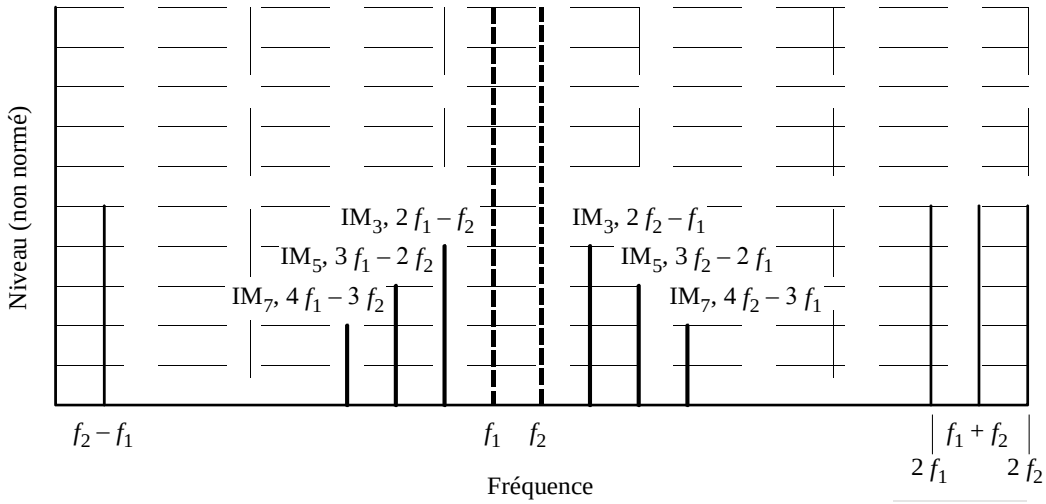


Figure III-11 : Les produits d'intermodulation (IM) jusqu'à l'ordre 7 (trait plein) associés aux fréquences fondamentales (trait pointillé)

La distorsion de la n-ième d'intermodulation est une mesure utile pour évaluer un système dans son comportement non linéaire (Figure III-12). L'IP_n correspond au point d'interception pour lequel les amplitudes du fondamental et de l'IM_n sont égales. On définit l'IIP_n ($Input\ IP_n$) comme étant l'amplitude du signal d'entrée correspondant à l'IP_n et l'OIP_n ($Output\ IP_n$) comme étant l'amplitude correspondante en sortie du fondamental et de l'IMn. Un récepteur sera plutôt caractérisé par son IIP_n et un émetteur par son OIP_n ($OIPn\ =\ a_1 * IIPn$).

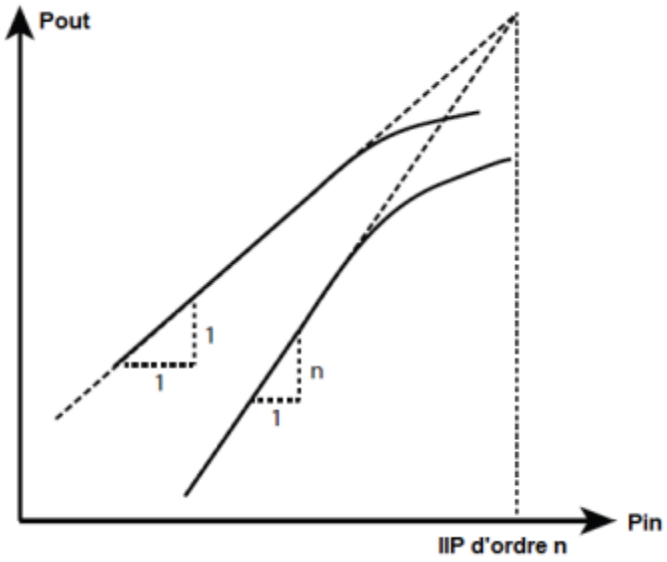


Figure III-12 : Le point d'interception d'ordre

BY-NC-ND

La façon de mesurer la n-ième intermodulation est d'injecter deux tons égaux proches et régler la puissance de telle sorte que les termes du n-ième ordre deviennent visibles, et donc quantifiable, dans le spectre. Ensuite, calculer le point d'interception IIP_n comme suit:

$$IIP_n[dBm] = P_{IN}[dBm] + \frac{P_{IN}[dBm] - P_{IMD_n}[dBm]}{n-1} \quad \text{(III-29)}$$

Les points d'interception du deuxième et troisième ordre sont les plus importants pour les récepteurs RadioFréquences.

III.3.4.5. La modulation croisée

La modulation croisée (Cross-Modulation en anglais) est un phénomène non linéaire dans lequel une modulation d'un signal d'interférence est transférée sur le signal utile en raison des non-linéarités d'ordre impaire.

Dans le cas où l'amplitude du signal utile est largement inférieure à l'amplitude du signal d'interférence ($A_S \ll A_M$) et où le signal interférant est modulé, par exemple en amplitude, l'entrée du système s'écrit :

$$x(t) = A_S\, cos(\omega_S t) + A_M[1 + m(t)]\, cos(\omega_M t) \quad \text{(III-30)}$$

Et le spectre en sortie est alors exprimé comme suit :

$$y(t) = \left(a_1 + \frac{3}{4} a_3 A_M^2[1 + 2m(t) + m^2(t)]\right) A_S cos(\omega_S t) \quad \text{(III-31)}$$

L'équation ci-dessus montre qu'une version déformée de la modulation AM du signal d'interférence a été transféré dans le signal utile aux fréquences ω_M et $2\omega_M$. La modulation croisée est une mesure très importante dans les émetteurs-récepteurs où l'émetteur et le récepteur fonctionnent simultanément (système Full-Duplex).

III.3.4.6. La dynamique de puissance d'entrée

C'est le rapport entre la puissance maximum "supportable" du signal d'entrée et la puissance minimale "exploitable" du signal d'entrée. Il est défini comme la différence de niveau de puissance entre le point de compression 1dB et le plancher de bruit du système.

$$\begin{aligned} DR[dBm] &= CP_{-1dB,IN}[dBm] - SMD[dBm] \\ &= CP_{-1dB,IN}[dBm] + 174dBm - 10\, log(BW) - NF[dB] \end{aligned} \quad \text{(III-32)}$$

BY-NC-ND

III.4. Les caractéristiques de bruits externes au transceiver radio : le canal de propagation radio indoor et ses modélisations mathématiques

Quand le signal est rayonné, il est transmis sur le canal RadioFréquences. Dans un environnement indoor, ce canal est caractérisé par des atténuations provenant de l'environnement physique (Figure III-13). Deux types d'affaiblissement du signal dus à ces atténuations se produisent. Le premier type est un évanouissement lent, appelé « Slow Fading ». Il caractérise les variations de puissance sur les grandes distances. Ce fading est notamment utilisé pour décrire l'affaiblissement linéique de puissance (Path Loss) et l'atténuation causée par les composants du bâtiment, à savoir les murs, les étages, etc.

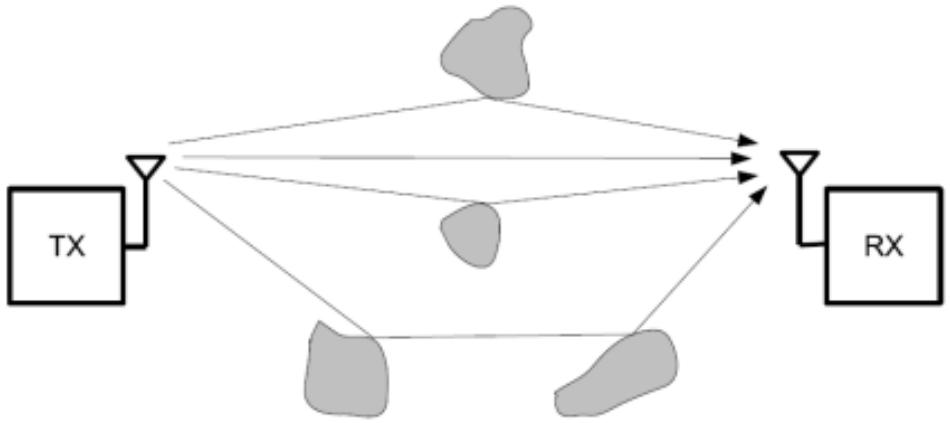


Figure III-13 : La propagation dans le canal indoor

Le second type est un évanouissement rapide, appelé « Fast Fading ». Celui-ci caractérise les fluctuations rapides de la puissance du signal reçu sur des distances très courtes de l'ordre de quelques longueurs d'onde. Ces fluctuations sont causées par la propagation par les trajets multiples en indoor. Les trajets-multiples sont provoqués par les phénomènes de transmission, réflexion, diffraction, et diffusion que subit le signal sur son parcours (Figure III-13). Par conséquent, plusieurs signaux radio atteignent le récepteur par des chemins différents et peuvent alors interférer de façon constructive ou destructive. En outre, il existe des effets appelés « Doppler » liés aux déplacements des personnes au sein du bâtiment. Tous ces phénomènes dépendent évidemment de la fréquence utilisée et des matériaux constituant les obstacles rencontrés (murs en béton, façade en verre, béton armée, etc.).

La Figure III-14 montre la variation de puissance que subi le signal pour les différents types d'atténuation en indoor.

BY-NC-ND

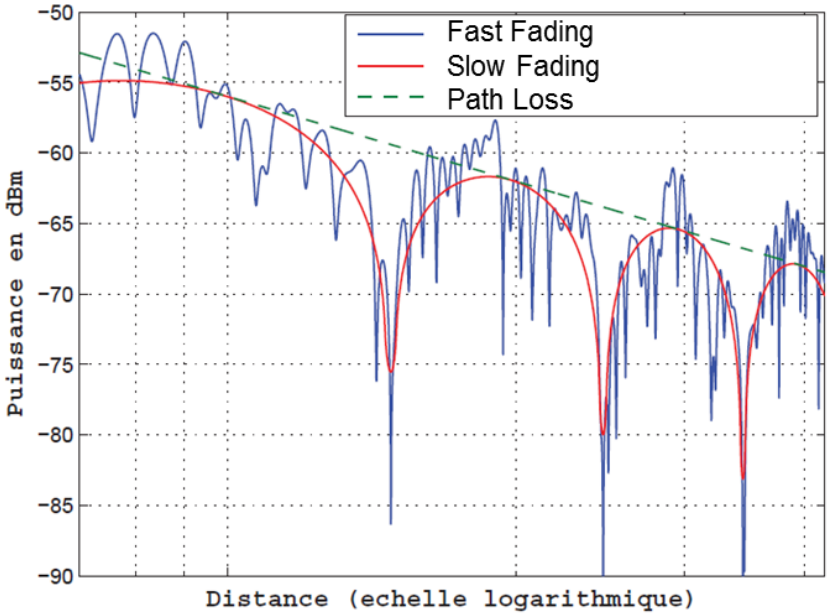


Figure III-14 : Les variations de la puissance reçue en fonction de la distance [82]

Comme souvent, lorsque les phénomènes sont complexes, on a recours à des modèles mathématiques pour les décrire [83]. La complexité de ces modèles est relative au degré de précision souhaité. En effet, plus la précision est grande, plus le modèle mathématique est complexe. Il existe plusieurs types de modèles pour la propagation RadioFréquences. Du point de vue de la largeur de bande, il y a les modèles à bande étroite (Narrowband) et les modèles à large bande (Wideband). Du point de vue de la méthodologie, il y a les modèles empiriques, les modèles stochastiques, les modèles déterministes et les modèles semi-déterministes. Le Slow Fading et le Fast Fading sont généralement modélisées par des modèles stochastiques et empiriques. Enfin du point de vue des scénarios d'application, il y a les modèles de propagation indoor et les modèles de propagations outdoor. Dans cette section, un exemple de modèle empirique indoor pour la propagation à bande étroite sera présenté. Comme cette thèse n'aborde que les atténuations indoor à grande échelle, seul un modèle mathématique décrivant le « Slow Fading » sera présenté. Mais avant cela, commençons par définir le modèle le plus simple associé à la propagation radio dans l'espace libre.

III.4.1. Propagation radio dans l'espace libre

Le cas idéal où il n'y a pas d'obstacles à traverser correspond à la propagation en espace libre. Conformément à la loi de FRIIS [84], la puissance reçue par une antenne de réception qui est séparée de l'émetteur par une distance *d* s'écrit:

$$P_r = P_t \,.\, G_t . G_r . \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2 \qquad \text{(III-33)}$$

Pr correspond à la puissance de transmission, Gt et Gr sont les gains des antennes émetteur et récepteur, d la distance entre l'émetteur et le récepteur et enfin λ la longueur d'onde.

Quand cette formule est exprimée sur l'échelle logarithmique, cela donne :

BY-NC-ND

$$P_r|_{dBm}(d) = P_t|_{dBm} + G_t|_{dBi} + G_r|_{dBi} + 20\ log\left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right) \quad \text{(III-34)}$$

Lorsque les gains d'antenne sont exclus, le modèle de propagation en espace libre s'écrit alors :

$$PL(d) = 20\ \log\left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right) = 20\log\left(\frac{4\pi}{\lambda}\right) + 20\log(d) \quad \text{(III-35)}$$

tels que *PL(d)* représente le Path Loss, qui est égale à $(P_r - P_t)_{dB}$. Le terme *20 log(d)* indique que l'atténuation en espace libre (AEL) augmente de 20 dB par décade (une décade est équivalente à multiplier par 10 la distance entre l'émetteur et le récepteur). En partant de cette formule d'AEL, un certain nombre de modèles empiriques de perte de propagation (Path Loss) sont construits sous une forme similaire à :

$$PL(d) = a + 10\,.\,n\,.\log(d) \quad \text{(III-36)}$$

où a est une perte de trajet constante à une distance de référence, et n l'exposant de perte de propagation qui dépend fortement de l'environnement de propagation. Dans le cas de l'atténuation en espace libre, l'exposant de perte est égal à 2. Dans [85], il est rapporté que l'exposant de perte de trajet peut généralement varier entre 1.6 et 6.5.

III.4.2. Propagation radio dans un environnement indoor

La zone de couverture dans un environnement indoor est dérivée du calcul de bilan de liaison. Le bilan de liaison général qui décrit le rapport signal à bruit (SNR : Signal to Noise Ratio) dB au niveau du récepteur pour une liaison radio dans l'espace libre est représenté sur l'échelle logarithmique par l'équation :

$$SNR_{dB} = P_t|_{dBm} + G_t|_{dBi} - PL + G_r|_{dBi} + P_{BT}|_{dBm} - F - I \quad \text{(III-37)}$$

Ici, le paramètre P_t est la puissance de transmission au niveau du l'émetteur, et les paramètres G_t et Gr représentent les gains d'antenne de l'émetteur et le récepteur. Le paramètre PL décrit l'atténuation statique de la puissance, provoquée par les caractéristiques physiques du bâtiment. Ainsi, PL correspond au « Slow Fading ». Il sera étudié plus en détail dans la section III.4.2.1. En outre, les paramètres *F* et *I* représentent, respectivement, la figure de bruit et les pertes d'implémentation dans le récepteur.

La somme logarithmique des paramètres P_t et G_t représente la Puissance Isotrope Rayonnée Equivalente (PIRE) qui est défini par :

$$PIRE|_{dBm} = P_t|_{dBm} + G_t|_{dBi} \quad \text{(III-38)}$$

La PIRE décrit la quantité de puissance dans la direction du gain d'antenne maximal qui est équivalente à un émetteur de rayonnement isotropique. Cette puissance rayonnée est limitée en raison de la réglementation des autorités responsables qui spécifient les règles d'usage de la bande de

BY-NC-ND

fréquences utilisée comme décrit dans la section I.2. En général, la combinaison de la puissance de transmission P_t et le gain de l'antenne de l'émetteur G_t doit remplir la condition :

$$P_t|_{dBm} + G_t|_{dBi} \leq PIRE(max)|_{dBm} \quad \text{(III-39)}$$

Enfin, le paramètre P_{BT} décrit le bruit thermique au niveau du récepteur qui peut être calculé à partir de :

$$P_{BT}|_{dBm} = 10 \,.\, log_{10}\left(\frac{k.T.B_{eff}}{1\,mW}\right) \quad \text{(III-40)}$$

Dans cette équation, le paramètre B_{eff} désigne la largeur de bande effective de la technologie évaluée en Hertz, et elle dépend du débit de données et la modulation appliquée. Le paramètre T est la température ambiante qui est fixé à une valeur T = 290 K. En outre, k représente la constante de Boltzmann, qui est égale à 1,38065 x 10^{-23} J / K. Dans le cas où T est différent de T = 290 K, l'équation (III-37) est seulement une approximation, ce qui conduira à de petits écarts dans la pratique.

Sur la base de ces équations, il est possible de calculer la distance maximale de couverture fiable pour une PIRE donnée. Si la PIRE est fixée à sa valeur maximale, l'équation (III-37) peut alors s'écrire comme suit :

$$PL(max) = PIRE(max)|_{dBm} + G_r|_{dBi} - P_{BT}|_{dBm} - (SNR)_{dB} - F - I \quad \text{(III-41)}$$

Dans cette équation, $PL(max)$ décrit l'atténuation maximale à l'intérieur du bâtiment. Une communication fiable est possible si l'atténuation est inférieure à $PL(max)$. En effet, $PL(max)$ correspond à la distance minimum à laquelle une technologie peut porter si les effets additionnels causés par les interférences ne sont pas pris en compte. Le paramètre $(SNR)_{dB}$ doit être réglé en fonction des besoins du récepteur afin de parvenir à un BER ou PER convenable (dont la valeur maximum est souvent fixée par le standard de la technologie utilisée). Puisque le rapport signal à bruit dépend de la performance de la modulation et du codage dans le modèle de canal évalué, les impacts causés par l'évanouissement sélectif en fréquence (Fast Fading) sont également couverts par ce paramètre.

III.4.2.1. Modèle théorique du Slow Fading dans l'environnement indoor

Comme expliqué précédemment, le Path Loss décrit l'atténuation causé par la distance entre l'émetteur et le récepteur pour une certaine fréquence. Le nombre des obstacles parcourus par l'onde et la nature des matériaux qui les constituent doivent également être pris en considération car ils peuvent rajouter des atténuations significatives au signal. En outre, ces atténuations peuvent être influencées par d'autres paramètres comme l'angle d'intersection de l'onde. Pour modéliser ces phénomènes de Slow Fading, plusieurs modèles ont été développés pour estimer de façon approximative les atténuations dans un scénario donné. Ces modèles sont basés chacun sur des

BY-NC-ND

mesures en indoor et appliquent des valeurs moyennes d'atténuations dans les murs et les étages, ce qui induit au final à des résultats différents selon le modèle utilisé. De plus, les modèles combinent pour bon nombre d'entre eux plusieurs modèles développés dans le passé par d'autres chercheurs. Parmi les modèles indoor les plus connus, ceux présentés dans le rapport *COST-231* [86], qui contient trois modèles empiriques de propagation en indoor (*One Slop Model, Multi-Wall Model et Linear Attenuation Model*), et ceux présentés dans les recommandations *ITU-R P.1238-6* [87] faites par l'union internationale des télécommunications (ITU : International Telecommunication Union). Il existe aussi deux autres modèles intéressants qui sont le modèle *IEEE 802.11 Task Group n (TGn)* [88] et le modèle m*iniWatt II* [89].

Dans les travaux fait par les auteurs de [90], ces modèles ont été étudiés et utilisés pour calculer l'atténuation dans trois scénarios réalistes dans un bâtiment résidentiel. Les approximations résultantes de ces travaux ont ensuite été comparées aux mesures faites sur le terrain et il en découle que le modèle m*iniWatt II* est le prometteur. Ils ont ensuite apporté une modification mineure à ce modèle pour atteindre davantage de précision dans leurs prédictions. Par conséquent, le modèle *miniWatt II* modifié est le modèle qui a été retenu dans ce manuscrit pour décrire la propagation radio en indoor dans ce manuscrit.

Le modèle *miniWatt II* est basé sur des mesures empiriques est a été publié dans [89]. Il définit un modèle pragmatique pour une estimation rapide de l'atténuation dans un bâtiment résidentiel typique. Ainsi, les paramètres complexes, comme l'angle d'intersection, sont négligés. En général, le modèle de calcule l'atténuation pour un scénario donné en utilisant l'équation :

$$PL(d) = \eta(f)\,.10\,.log_{10}\left(\frac{d}{d_0}\right) + 20\,.log_{10}\left(\frac{4\pi.f.d_0}{c_0}\right) + \sum_{i=0}^{n_{murs}} L_{mur}\,(i,f)|_{dB} + \sum_{j=0}^{n_{étages}} L_{étages}\,(j,f)|_{dB} \quad \text{(III-42)}$$

La première partie de cette équation représente le Path Loss qui est caractérisé par l'exposant de perte $\eta(f)$ qui dépend de la fréquence d'émission f. Le paramètre d est la distance entre l'émetteur et le récepteur en mètre. d_0 est la distance de référence jusqu'à laquelle une décroissance quadratique de la puissance est supposée. Le modèle donné suppose que $d_0 = 1m$, et la constante c_0 représente la vitesse de la lumière. Les parties restantes décrivent les atténuations des murs et des sols traversés par le signal. Ici, $L_{mur}(i,f)$ décrit l'atténuation du *i-ème* mur à la fréquence de transmission, tandis que $L_{étage}(j,f)$ représente l'atténuation du *j-ème* étage. $L_{mur}(0,f)$ et $L_{étage}(0,f)$ sont nuls car ils correspondent respectivement à une absence de mur et une absence d'étage sur le trajets de l'onde.

Etant donné que les atténuations dépendent des matériaux de construction, il s'avère très difficile de déterminer l'atténuation exacte d'un mur individuel ou d'un étage. Il en va de même pour l'exposant

BY-NC-ND

de perte de trajet $\eta(f)$. Par conséquent, des valeurs moyennes représentatives ont été déterminées pour la modélisation. Elles peuvent être appliquées pour estimer les atténuations dans un scénario donné. Quand des valeurs d'atténuation moyennes sont supposées, l'équation (III-42) peut alors être simplifiée comme suit :

$$PL(d) = \eta(f) \,.\, 10 \,.\, log_{10}\left(\frac{d}{d_0}\right) + 20 \,.\, log_{10}\left(\frac{4\pi . f . d_0}{c_0}\right) + n_{murs} \,.\, L_{mur}(f)|_{dB} + n_{étages} \,.\, L_{étage}(f)\Big|_{dB} \quad \text{(III-43)}$$

Ici, $L_{mur}(i, f)$ est l'atténuation moyenne par mur, et $L_{étage}(j, f)$ décrit l'atténuation moyenne par étage pour la fréquence d'opération. Plus de 2000 mesures ont été effectuées dans des environnements indoor résidentiels afin de déterminer ces valeurs moyennes. Les paramètres mesurés sont résumées dans le Tableau III-2.

Tableau III-2 : Valeurs mesurées des paramètres d'atténuations d'un bâtiment typique [89]

Paramètre	**Fréquence**	
	Sub-GHz	**2,4 GHz**
$\eta(f)$	2	2.3
$L_{mur}(f)$	3 dB	6 dB
$L_{étage}(f)$	12 dB	15 dB

En ce qui concerne les pertes $L_{mur}(i, f)$, les valeurs mesurées sont conformes aux résultats des mesures provenant d'autres auteurs. Les auteurs de [91] rapportent une atténuation moyenne de 6.29 dB pour un seul mur à une fréquence d'émission de 2,4 GHz . En outre, les auteurs dans [92] ont déterminé une atténuation moyenne de 2.38 dB par mur à 900 MHz. Dans ces deux publications, l'atténuation dus aux murs est supposé être linéairement dépendant du nombre de murs traversés.

Par ailleurs, les auteurs de [92] rapportent une atténuation de 12.9 dB pour un seul étage à 900 MHz. Cependant, le modèle décrit par l'équation (III-43) suppose une relation linéaire entre le nombre d'étages pénétré et l'atténuation résultante. Ceci est en contradiction avec les résultats présentés dans [92] et [93] ou une relation non-linéaire a été observée. Ainsi, Langhamer et al ont proposé une modification afin d'optimiser le modèle m*iniWatt II* de l'équation (III-43).

La relation non linéaire entre l'atténuation de plusieurs étages est causée par le fait que le signal peut utiliser d'autres canaux de propagation outdoor. Cet effet réduit les pertes de pénétration du sol. Par conséquent, un facteur noté $\boldsymbol{K_f}$ a été introduit pour calculer l'atténuation des étages. Il a été sélectionné en conformité avec *COST-231 MWM (Multi-Wall Model)*. L'atténuation de la construction résultant est décrite par l'équation :

BY-NC-ND

$$PL(d) = \eta(f) \,.\, 10 \,.\, log_{10}\left(\frac{d}{d_0}\right) + 20 \,.\, log_{10}\left(\frac{4\pi . f . d_0}{c_0}\right) + n_{murs} \,.\, L_{mur}(f)|_{dB} + \underbrace{n_{étage}^{\left(\frac{n_{étage}+2}{n_{étage}+1}-b\right)}}_{K_f} \,.\, L_{étage}(f)\big|_{dB} \quad \text{(III-44)}$$

Une valeur de 0,46 a été sélectionnée pour l'élément « b » servant à calculer le facteur $\boldsymbol{K_f}$. Cette valeur a été dérivée de [86]. Tous les autres paramètres du modèle sont identiques aux paramètres du modèle *miniWatt II* initial. L'introduction du facteur $\boldsymbol{K_f}$ conduit à une atténuation plus faible dans des environnements multi-étages. Après validation et vérification, le modèle *miniWatt II* modifié montre des performances meilleures que tous les autres modèles en termes de précision de prédiction, aussi bien pour les bandes de fréquences 2,4 GHz que pour les bandes Sub-GHz.

En utilisant l'équation (III-44) représentative le modèle *miniWatt II*, il est possible de montrer l'effet de la fréquence de transmission sur les atténuations dans le bâtiment. La Figure III-15 montre l'atténuation dans un scénario indoor typique. Le scénario comprend une liaison radio entre deux produits séparés d'une distance de 10 mètres. En outre, un mur à 3 mètres et un étage à 7 mètres de l'émetteur obstruent le chemin direct de l'signal émis. La figure montre les différences d'atténuation pour les fréquences de transmission de 868 MHz et 2,4 GHz. La fréquence 868 MHz est évidemment moins impactée par les obstacles que la fréquence 2,4 GHz. Si on les compare à une distance de 9 mètres de l'émetteur, l'utilisation de la fréquence 868 MHz conduirait à environ 18 dB d'atténuation en moins, ce qui se traduirait en une plus longue portée pour une même puissance d'émission.

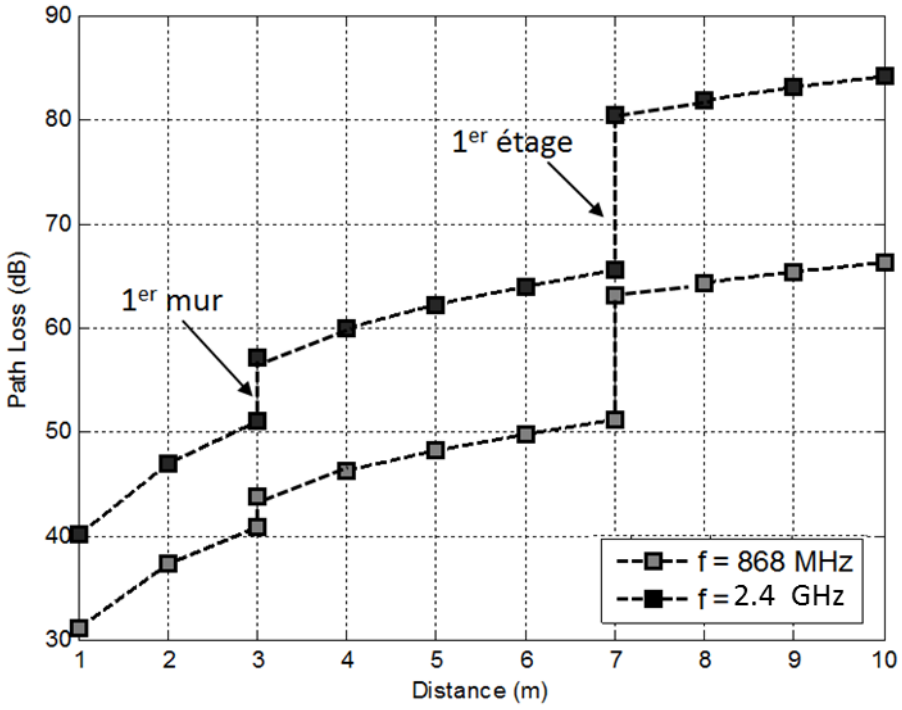


Figure III-15 : L'impact de la fréquence sur l'affaiblissement de puissance dans un environnement indoor en utilisant le modèle miniWATT II

BY-NC-ND

III.5. Cas d'application réaliste de l'impact des interférences et du bruit sur la fiabilité d'un système radio: Application sur une box domotique compacte multi-protocoles et multi-profils

Dans cette thèse, nous allons étudier les interférences dans une box multi-protocoles composée, en plus d'un module KNX-RF, de différentes technologies radio développées par différents fabricants. Ces modules opèrent côte à côte pour la gestion du confort, de l'énergie et des besoins de sécurité. Il s'agit donc ici d'un scénario d'application qui combine des sources de bruit et d'interférences externes et internes au module KNX-RF. Externe, car le module est placé dans un environnement physique contraignant où d'autres modules sont placé à proximité directe et opèrent en même temps, et internes car les composants du module génèrent eux même des bruits et des perturbations.

La box étudiée est composée d'un module KNX-RF qui est multi-profils (Fast et Slow) et d'un module d'alarme radio qui utilise un protocole propriétaire. La box peut être étendue à d'autres types de technologie (e.g. Wi-Fi, ZigBee et EnOcean). Ce genre de passerelle ajouterait une bonne flexibilité au réseau domotique car l'utilisateur ne serait plus dépendant d'un seul fabricant. Il aurait en effet la possibilité de gérer son réseau domotique comme il le souhaite et facilement changer les éléments qui lui déplaisent pour augmenter le confort et l'efficacité énergétique.

Un état de l'art sur les boxs domotiques a été réalisé dans un premier temps. Il montre qu'il existe plusieurs articles scientifiques ayant étudiés le sujet avec différentes définitions de solutions multi-protocoles. L'un des principaux objectifs du développement de boxs domotiques par le passé était de permettre l'interaction entre les protocoles filaires et sans fil pour assurer la rénovation des bâtiments existants. La box présentée dans [94] est un bon exemple d'une passerelle domotique où le protocole KNX filaire TP interagit avec le protocole sans fil ZigBee. Cependant, les futurs systèmes domotiques tendent à éviter le câblage intrusif dans les bâtiments pour faciliter l'installation des produits et réduire les coûts.

Plusieurs boxs trouvées dans la littérature recherche sont basées sur le protocole ZigBee. Ni et al [95] ont proposé une passerelle résidentielle sans fil qui relie un module Zigbee (2,4 GHz) par une interface UART et un module Wi-Fi (2,4 GHz) par USB. Elle est capable de convertir les données issues du Wi-Fi en données ZigBee et vice versa. Cette passerelle Wi-Fi /ZigBee se révèle être d'une grande stabilité et d'une bonne immunité faces aux interférences d'après les auteurs. En revanche, le plan des essais expérimentaux et la méthodologie suivie pour évaluer cette robustesse RF n'ont pas été décrits et aucune simulation de robustesse de radio n'a été menée. En outre, comme le Wi-Fi n'est pas considéré comme une technologie du HBA, ZigBee est le seul protocole domotique utilisé dans cette passerelle.

Zhang et al [96] ont présenté un système de Zigbee multi-profils pour des applications de télé-surveillance d'intérieur. La box développée comprend une interface Bluetooth 2,4 GHz et les auteurs affirment qu'elle pourrait être enrichi d'un module GPS. Cependant, dans leurs travaux, seuls les tests

BY-NC-ND

de consommation d'énergie ont été réalisés. Dans un autre article, Wibowo et al [97] ont proposé une passerelle intégrée pour l'interopérabilité des réseaux de capteur (WSN) et IP (WLAN). Aucune précision sur le standard WSN utilisé n'est faite et les modules radio sont connectés à la passerelle via de longs câbles ; il n'est donc pas question d'étudier les interférences dans cette passerelle car les modules RF ne sont pas réellement côte à côte. De plus, ils ne sont pas destinés à être vendus sur le marché. Les auteurs de [98] et [103] ont quant à eux réalisé des recherches sur la virtualisation des passerelles domotiques dans des environnements multi-fabricants en déplaçant les fonctions de passerelle de la maison sur le matériel physique, ce qui simplifie l'implémentation physique de la box et la rend adaptable à de nouvelles technologies et protocoles. La solution proposée repose sur ce qu'ils ont appelé Software-Defined Networking (SDN). Cependant, le travail est seulement un concept qui n'a pas été physiquement réalisé. En outre, le concept manque d'exemples d'application. Les travaux [100]-[101] proposent des solutions pour le développement d'une passerelle multi-protocoles basée sur la capacité de décrire sémantiquement à la fois la structure de l'application et les fonctionnalités du produit afin d'unifier le format des données. En réalité, cette solution est difficile à adapter pour la majorité des protocoles domotiques populaires sur le marché en raison de leur complexité. De plus, il n'est pas envisageable de recevoir plusieurs signaux et de les traiter en même temps avec cette solution.

Kaur et al [102] ont proposé de combiner les technologies ZigBee, Bluetooth et GSM en une seule box sans fil multi-protocoles. L'idée est de transformer tout signal reçu par la box quel que soit le protocole en un signal GSM. En revanche, ce travail n'aborde pas le contrôle de données via smartphone, ceci ne répond donc pas aux besoins de la domotique. En outre, aucune mise en œuvre physique de la passerelle proposée n'a a été développée et aucune analyse d'interférence n'a été effectuée. Enfin en 2012, un groupe de recherche a présenté une box qui serait capable de traiter plusieurs normes de communication à la fois, à savoir: WM-Bus / OMS (mesure), ZigBee, EnOcean, 6LoWPAN et Wi-Fi [103]. L'architecture globale du système ainsi que les hypothèses de conception associées au hardware et au software ont été introduites en détails. Bien que le concept initial de cette box soit modulaire, son développement physique a été abandonné plus tard pour des raisons de financement.

Parmi les boxs rencontrées dans la littérature de recherche, aucune ne considère la version radio du protocole KNX. Les boxs de l'état de l'art avec leurs différentes formes d'intégration utilisent principalement le protocole ZigBee. En outre, en ce qui concerne le marché, les boxs vendues aujourd'hui ne sont que des solutions ZigBee mono-profil, c'est à dire qu'ils n'adressent qu'une seule application (chauffage par exemple) [104] car il n'y a pas d'interopérabilité entre les profils ZigBee existants (éclairage, chauffage, etc ...). La version qui garantit cette interopérabilité est la version ZigBee 3.0 qui n'est sorti qu'en 2016. Elle nécessitera donc un certain temps avant d'être déployée sur le marché [55]. La limitation au mono-profil est aussi valable pour toutes les autres boxs dédiées à la

BY-NC-ND

domotique qui existent aujourd'hui sur le marché français [105]-[106]-[107]-[108]. Par ailleurs, les boxs de l'état de l'art ne sont pas purement RadioFréquences. Les modules radio étant en effet reliés par des câbles, les problèmes d'interférence radio ne se posent pas car les modules sont distants les uns des autres (> 50 cm). Et même dans les quelques boxs purement RF rencontrées, les interférences n'ont pas été étudiées. De plus, aucun article ne fait une étude de robustesse radio avec une approche combinant mesures et simulations.

Dans cette thèse, il est question d'étudier les interférences dans une box domotique compacte purement radio qui permettrait de faire du multi-protocole et du multi-profils en même temps. Elle repose sur KNX-RF (868 MHz) la technologie plutôt que ZigBee (2,4 GHz), ce qui permet une meilleure portée radio pour les environnements indoor domotique. Elle comprend également un module d'alarme (434-869 MHz) et un lien vers Internet via une connexion LAN. Le protocole d'alarme propriétaire utilisé dans cette box permet une interaction avec une installation de sécurité entièrement alimenté par piles ; il en va de même pour KNX (le système KNX-RF peut également être entièrement alimenté par piles).

Le développement de cette box RF compacte et modulaire présente néanmoins certains challenges. Le premier est le risque potentiel d'interférences entre les différents modules dû au fait qu'ils sont placés à proximité immédiate les uns des autres (seulement quelques centimètres les séparent) et qui fonctionnent pour certains dans la même bande de fréquences ISM et sont destinés à traiter des signaux radio de différents standards de façon simultanée. L'autre challenge est que cette box en plus d'être une solution multi-protocole, doit également être une solution multi-profils. Par conséquent, dans ces travaux nous avons évalué la fiabilité radio du box proposé par des simulations et des essais expérimentaux. Le modèle développé simule le protocole KNX-RF et considère l'architecture du transceiver SX1211[109]. Comme mentionné précédemment, le modèle pourrait être utilisé pour simuler d'autres protocoles et d'autres transceivers RF. En effet, il est important d'avoir un outil de simulation qui permettrait de prédire les résultats expérimentaux et d'identifier les risques en avance de phase mais aussi un outil qui pourrait être utilisé dans l'élaboration des roadmaps stratégiques et techniques. Un autre challenge est de développer une box domotique qui soit développée rapidement et à moindre coût. Pour ce faire les antennes utilisées sont des antennes classiques, tels que l'antenne fouet ou l'antenne F-inversées qui sont quasiment isotropes avec des gains de 0 dBi étant donné que la box doit rayonner dans toutes les directions afin que l'utilisateur puissent installer le produit sans soucier de sa direction. Ici, l'objectif n'est pas de faire une étude approfondie sur le découplage des antennes ou d'optimiser leurs caractéristiques et leur directivité car cela nécessite du temps et de l'expérience. Par ailleurs, étant donné que le module KNX-RF utilise la plus récente version du standard « KNX-RF-Multi », il faut que celui-ci soit rétro-compatible avec les anciens produits intégrant la version "KNX-RF-Ready" qui comptent plus de 1000 références déjà installé chez le client).

BY-NC-ND

III.6. Conclusion

Dans ce chapitre, les aspects théoriques fondamentaux sur lesquels reposent une communication RadioFréquences entre un émetteur et un récepteur ont été décrits. Des généralités sur le canal de propagation dans un environnement indoor, les types d'architectures possibles pour le transceiver, ainsi que les paramètres qui permettent de quantifier les phénomènes de non-linéarités présents tout au long de la chaîne de transmission ont été présentés car ils ont tous un impact direct sur les phénomènes d'interférences.

Ces connaissances théoriques ont été utilisées dans ces travaux pour le développement de modèles de simulation dédiés à évaluer la robustesse radio de KNX-RF. L'exemple d'application présenté dans ce chapitre et qui concerne les perturbations radio dans une box compacte multi-protocoles et multi-profils sera étudié grâce notamment à un modèle développé dans l'environnement MATLAB/Simulink et qui sera décrit dans le chapitre suivant.

BY-NC-ND

Chapitre IV

Simulation de la robustesse RadioFréquences de KNX-RF sous MATLAB/Simulink

BY-NC-ND

Chapitre IV. Simulation de la robustesse RadioFréquences de KNX-RF sous MATLAB / Simulink

Ce chapitre étudie la robustesse radio de la toute dernière version du standard RadioFréquences KNX-RF dédié aux applications du Home & Building Automation. KNX-RF est considérée comme étant une technologie dite « verte » adaptée aux réseaux de capteurs sans fil dont l'offre compte plus de 7000 gammes de produits différents et plus de 100 million de produits installés chez le client dans les 20 dernières années, et parmi ceux-ci 500 milles produits RF sont vendus par an. Néanmoins, un certain degré de robustesse radio est nécessaire pour l'interaction de tous ces produits dans la maison et le bâtiment.

Comme expliqué précédemment, ce protocole partage sa bande de fréquences avec de nombreuses autres technologies et normes qui utilisent la bande SRD. En plus des interférences (dans la même bande ou les bandes adjacentes), KNX-RF doit surmonter les bruits introduits tout au long de la chaîne de transmission et les atténuations en indoor causées par les obstacles, les propagations à trajets multiples, etc. Pour cette raison, des mécanismes de robustesse (décrit dans la section II.3.1.2) ont été implémentés dans la dernière version « Multi » de KNX-RF. Cependant, une étude approfondie et claire sur la performance radio de ce standard n'a jamais été réalisée jusqu'à présent dans la littérature recherche.

Afin d'estimer la robustesse radio et la fiabilité de ce standard, des scenarios d'interférence critiques typiques ont été modélisés à l'aide de MATLAB/Simulink. Cette robustesse est caractérisée en termes de diminution de la portée du module testé causé principalement par une désensibilisation du récepteur en cas d'interférences, mais aussi en termes de nombres de trames perdues à cause des collisions. Des essais expérimentaux ont été réalisés afin de valider les résultats de simulation. Le modèle développé va nous permettre de pouvoir prédire la robustesse du protocole pour un scénario d'interférence donné.

IV.1. Description et validation du modèle élaboré sous MATLAB/Simulink

Toutes les caractéristiques physiques importantes de KNX-RF présentées dans la section II.3.1.1 peuvent être modélisées et simulées avec MATLAB / Simulink. Pour effectuer des simulations réalistes, le transceiver SX1211 fabriqué par le fondeur SEMTECH est utilisé [109]. D'autres transceivers tels que le Si4461 de SiLabs Corporation, le CC1120 de Texas Instrument [110]-[88] ainsi que d'autres chips RF Sub-GHz peuvent également être modélisés dans le simulateur.

BY-NC-ND

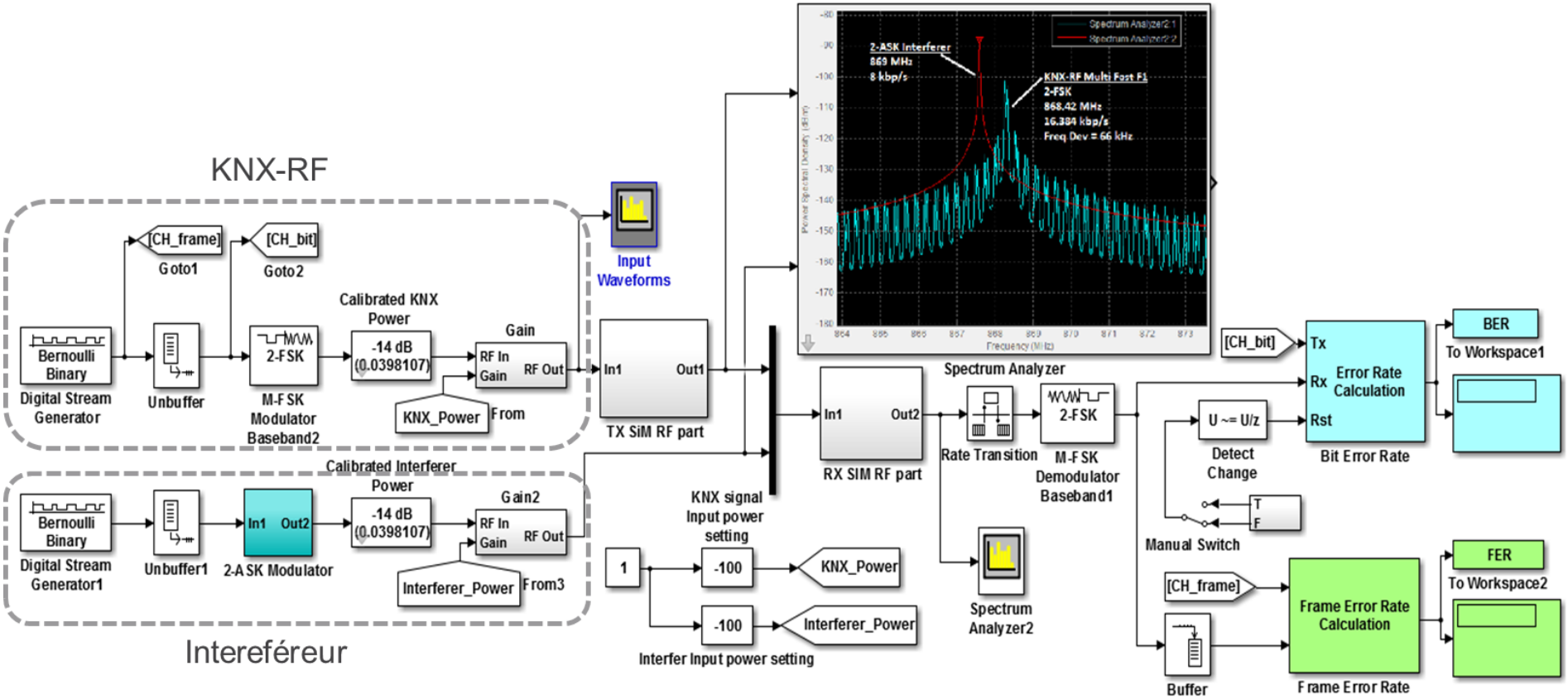


Figure IV-1 : Le modèle de simulation de robustesse RF construit sous MATLAB/Simulink

BY-NC-ND

La modélisation Simulink du transceiver est réalisée grâce à la toolbox SIM-RF développée par MathWorks [111]. Cette toolbox est utilisée pour la conception et l'analyse des composants RF. Elle permet de faire une simulation complète de la chaine radio en tenant compte du canal de propagation et des impédances ainsi que des propriétés physiques linéaires et non linéaires des mélangeurs, amplificateurs et filtres, à savoir la figure de bruit, l'IP_2, l'IP_3 et le point de compression à -1dB . Les filtres peuvent être simulés en important leurs paramètres S dans le modèle qui sont extraits des fichiers de mesures (touchstones). Le modèle développé pour cette étude est présenté dans la Figure IV-1.

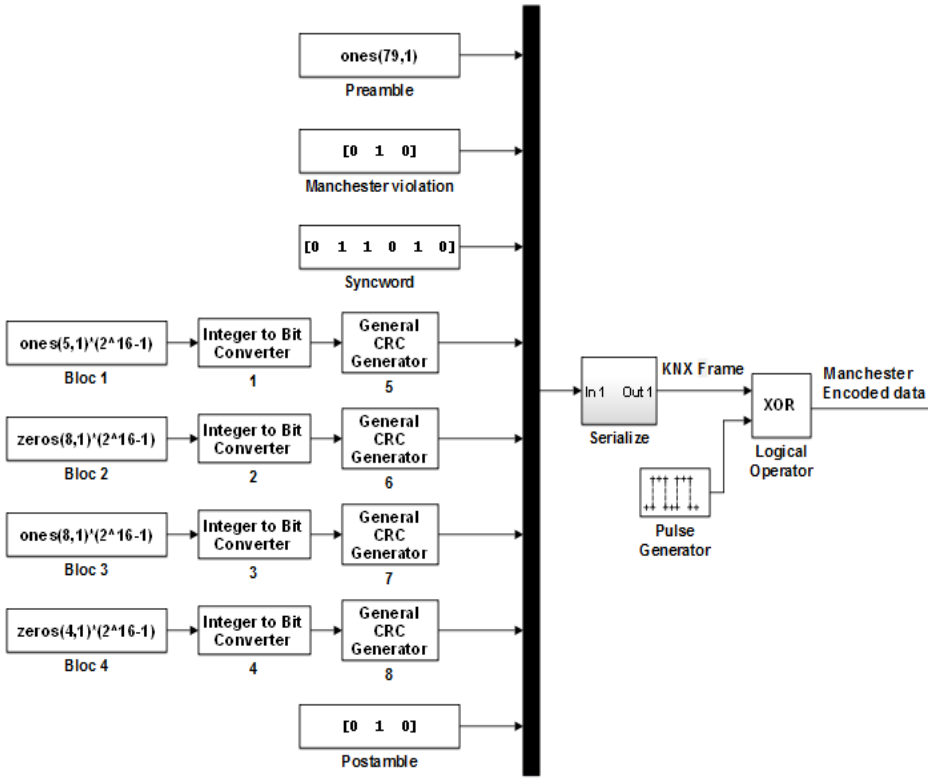


Figure IV-2 : Diagramme-bloc de génération de la trame KNX sur Simulink

Dans le modèle développé, le flux d'entrée est une séquence binaire générée par le bloc-diagramme Figure IV-2 qui correspond à la trame KNX-RF standardisée décrite dans la norme ETSI dont la longueur et le débit de données sont fixés en fonction du canal simulé. La trame comprend un préambule, 4 blocs de données utiles, les CRCs associés, un encodage Manchester, un synchword et un postambule (Figure II-5).

L'architecture choisie et simulée pour le transceiver SemTech est une architecture Homodyne. Au niveau du récepteur, le signal passe à travers un amplificateur à faible bruit (LNA) avant d'être converti en bande de base. Il est ensuite préamplifié avant d'entrer dans le bloc de démodulateur FSK comme le montre le schéma de la Figure IV-3.

BY-NC-ND

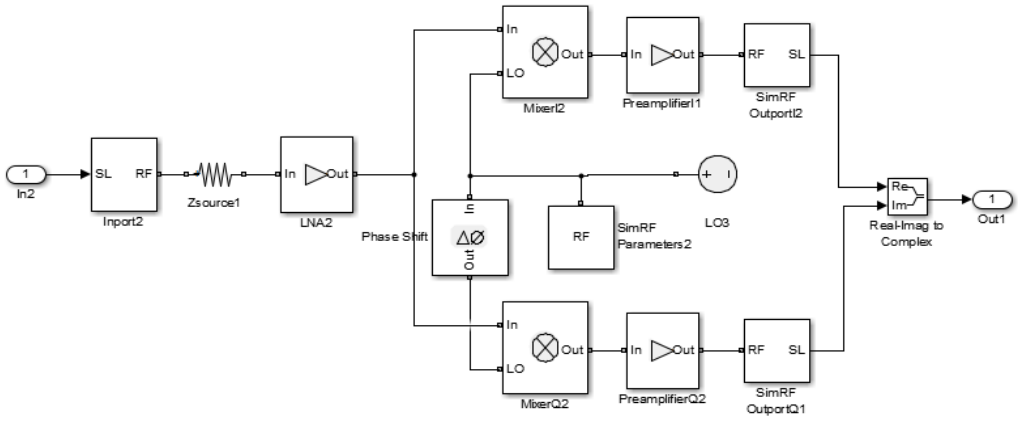


Figure IV-3 : Structure du bloc de réception Homodyne

Pour renforcer l'immunité radio du récepteur KNX-RF (en termes de désensibilisation), un filtre passe-bande SAW (Surface Acoustic Wave) a été rajouté à l'extérieur du chipset. Ce filtre externe est étudié dans ces travaux afin de déterminer sa valeur ajoutée sur le système.

IV.1.1. Première validation du modèle

Pour une première validation du modèle, nous effectuons un test de Rx Blocking comme décrit dans la norme ETSI EN 300-220-1 spécifiques aux produits SRD [12]. Ce test a pour objectif d'évaluer la désensibilisation du récepteur quand KNX-RF est perturbé par une porteuse pure indésirable dans la bande (± 2 MHz) et hors-bande (±10 MHz). Pour ce faire, la norme ETSI indique que le signal utile doit être réglé à une puissance égale à la limite de sensibilité du récepteur plus 3 dB, c'est-à-dire $(-103\,dBm\,+\,3\,dB)$ dans notre cas comme illustré dans la Figure IV-4. La puissance d'émission du signal KNX dans ce modèle est donc fixée à -100 dBm.

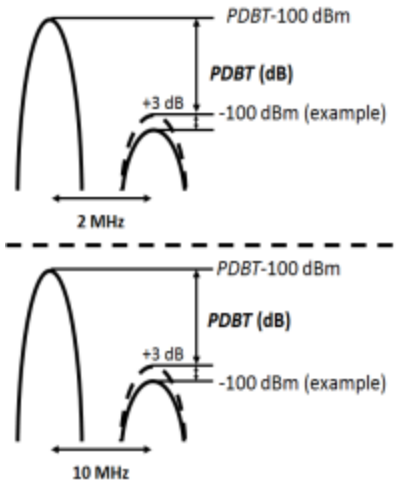


Figure IV-4 : Illustration du test de Rx Blocking

Ici, les résultats du Rx Blocking sont exprimés en termes de PDBT : Power Difference at BER Threshold. Cela correspond à la différence de puissance en dB entre les deux signaux rapportés lorsque le signal bloqueur (porteuse pure) commence à perturber le signal KNX-RF. Les simulations

BY-NC-ND

sont faites avec et sans le filtre SAW externe [112] dont le paramètre S_{21} est présenté Figure IV-5. Les résultats obtenus sont présentés dans le Tableau IV-1 et sont comparés aux valeurs de PDBT requises par la norme ETSI 300 220.

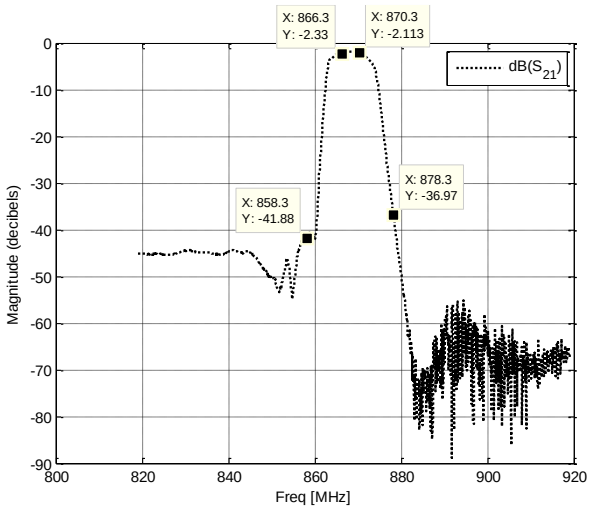


Figure IV-5 : Mesures du paramètre S_{21} du filtre SAW

Tableau IV-1 : Résultats de simulation du Rx Blocking pour le canal KNX-RF Fast F1

Fréquence de l'interféreur (Porteuse pure)	**PDBT requis par la norme ETSI SRD (dB)**	**PDBT simulé (dB) = P_{INTERF} (dBm) - P_{KNX} (dBm)**	
		Sans SAW	**Avec SAW**
-2 MHz de F1	≥ 35	56	56
-10 MHz de F1	≥ 60	60	100
+2 MHz de F1	≥ 35	56	56
+10 MHz de F1	≥ 60	56	96

Il découle de ce tableau que la norme n'est pas respecté dans le cas d'une porteuse pure à +10 MHz du signal KNX-RF (PDBT < 60 dB). Par conséquent, le transceiver SemTech nécessite un filtre passe-bande externe sélectif pour éviter une forte désensibilisation du récepteur et être conforme à la norme EN 300-220-1.

Pour compléter ces tests de Rx Blocking, des courbes de BER/FER ont été simulées avec et sans le filtre SAW externe. La Figure IV-6 présente les résultats simulés pour le signal bloqueur à -2 MHz du signal KNX-RF « F1 ». Quand le filtre SAW est utilisé, on constate que le PDBT augmente d'environ 2 dB en raison des pertes d'insertion dans la passante de ce filtre.

BY-NC-ND

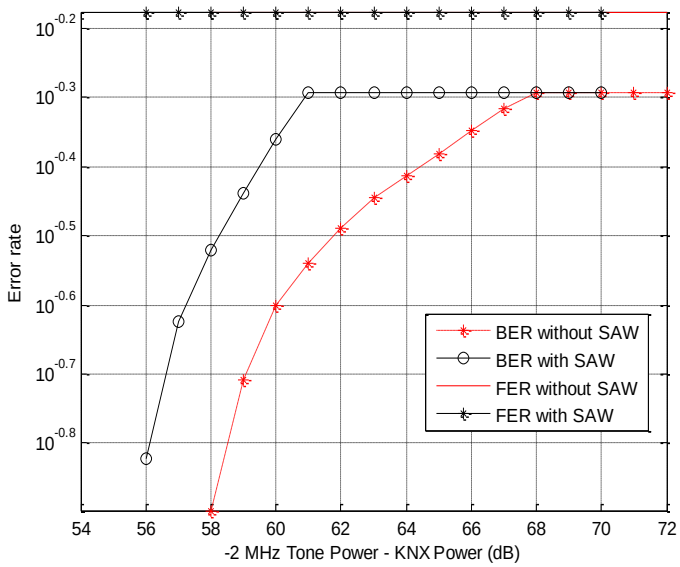


Figure IV-6 : BER du signal F1 avec et sans filtre SAW en présence d'une porteuse pure à -2 MHz de la F1

Dans le cas du bloqueur à -10 MHz du signal KNX-RF « F_1 », le PDBT augmente de +40 dB quand le filtre SAW est utilisé. Ceci est causé par la forte atténuation de ce filtre à 858,3 MHz (42 dB dans la Figure IV-7). Ces résultats servent de première validation du modèle construit.

Ces résultats de simulation doivent être comparés avec des mesures réelles afin de vérifier leur exactitude. Pour ce faire, un banc de test qui utilise des produits KNX-RF vendus dans le marché a été mis en place.

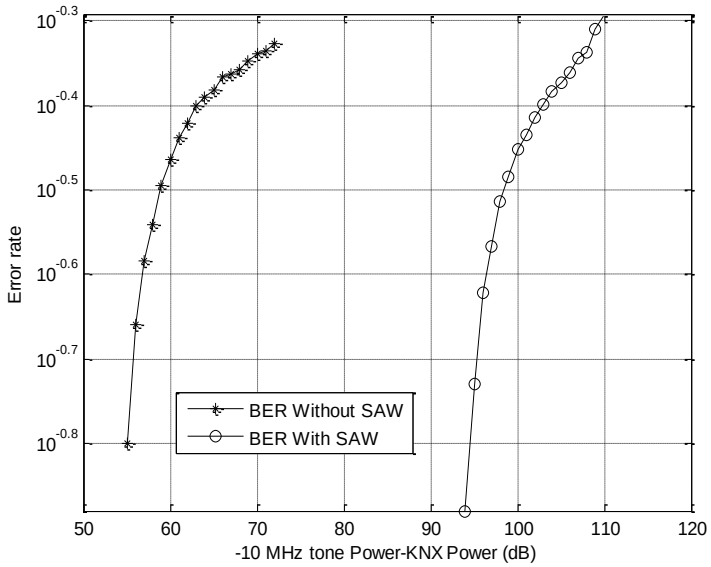


Figure IV-7 : BER du signal F1 avec et sans filtre SAW en présence d'une porteuse pure à -10 MHz de la F_1

IV.1.2. Mise en place d'un banc de test pour vérifier les résultats de simulation

La composition du banc de test est présentée dans la Figure IV-8. Pour faire coïncider les résultats de la simulation et ceux des mesures, un filtre a été identifié et placé en bande de base du

BY-NC-ND

récepteur du modèle Simulink. Les résultats de simulation décrits dans la section précédente correspondent à ceux relevés après l'ajustement du filtre bande de base.

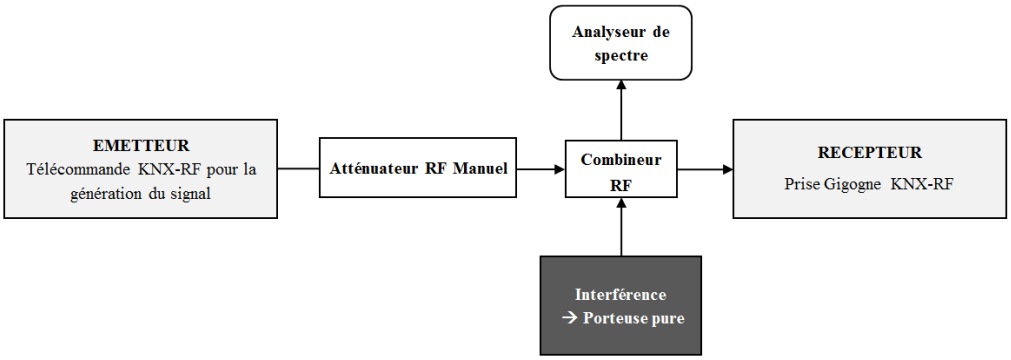


Figure IV-8 : La composition du banc de test conduit

Les produits utilisés et leurs références sont répertoriés dans le Tableau IV-2.

Tableau IV-2 : Les équipements de test utilisés et leurs références

Produits	Fabricant	Référence
Télécommande KNX-RF blindée (Tx)	Hager Controls	TU 404
Atténuateur Manuel	Agilent Technologies	8495A
Combineur RF	Mini-Circuits	ZFSC-3-4-S+
Générateur de signaux vectoriel	Rohde & Schwarz	SMJ 100A
Analyseur de spectre MXA	Agilent Technologies	N9020A
Prise Gigogne (Rx) = DUT	Hager Controls	TRC270F

Le Tableau IV-3 compare les résultats de mesure aux résultats de simulation. Ces derniers donnent une bonne approximation des performances en Rx Blocking. En outre, le tableau montre que le rajout du filtre externe au transceiver RF SX1211 est nécessaire pour être conforme à la EN 300-220-1 (≥ 60 dB à +/-10 MHz) ; ce qui n'est pas le cas dans les nouveaux chips [110]-[88] où un PDBT de plus de 66 dB a été mesuré à +/- 10 MHz sans filtre SAW.

Tableau IV-3 : Les résultats du test Rx Blocking de KNX

$F_{Porteuse} - F_{KNX-RF-F1}$ (MHz)	PDBT Mesuré (dB)		PDBT Simulé (dB)	
	Sans SAW	Avec SAW	Sans SAW	Avec SAW
-2 MHz	56	56	56	56
-10 MHz	59	89	60	100
+2 MHz	56	56	56	56
+10 MHz	57	87	56	96

IV.1.3. KNX-RF et d'autres types d'interférence

En raison de la présence d'une offre de marché importante pour la domotique, de nombreux protocoles RF propriétaires et standards ont été développés [113]. C'est pourquoi l'immunité radio de KNX-RF doit être évaluée en présence d'interférences modulées dans la bande. Deux interférences sont étudiées, à titre d'exemples, pour valider le simulateur.

BY-NC-ND

Le premier interféreur simulé est également un signal modulé en 2-FSK centré à 868,42 MHz avec un débit de 9,6 Kbps (Figure IV-9).

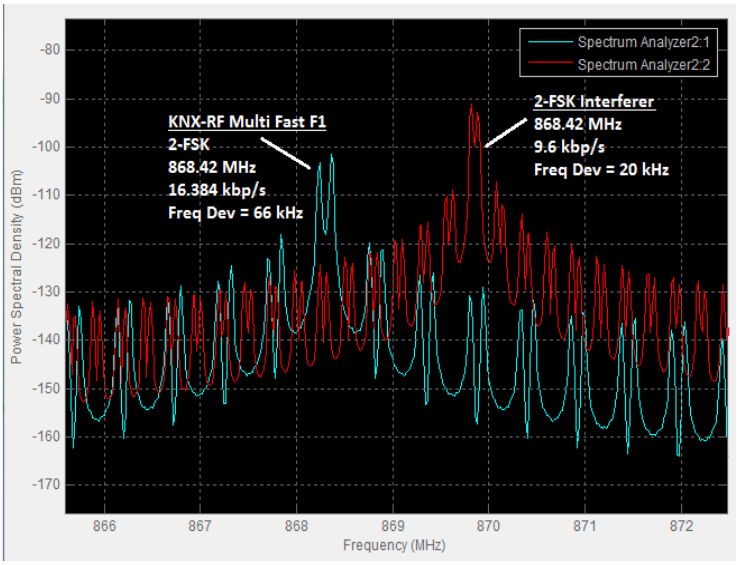


Figure IV-9 : Spectre du signal KNX-RF et du signal d'interférence modulé en 2-FSK

Les trois canaux Fast (F_1, F_2, F_3) ont été simulés et les résultats du Tableau IV-4 confirment que le PDBT augmente lorsque le signal d'interférence est éloigné de la fréquence du canal KNX: de F_1 à F_3, le PDBT a augmenté de 41 dB en 1,31 MHz d'espacement.

Tableau IV-4 : Spectre du signal KNX-RF et du signal d'interférence modulé en 2-FSK

KNX Channel	Δf (MHz) $f_{INTERF} - f_{KNX}$	**PDBT(dB) = P_{INTERF} - P_{KNX}**	
		Sans SAW	**Avec SAW**
F1 (868,3 MHz)	0.12	12	12
F2 (868.95 MHz)	0.53	49	49
F3 (869.85 MHz)	1.43	53	53

Le second est un signal modulé en 2-ASK à 869 MHz avec un débit de 8 Kbps (Figure IV-10).

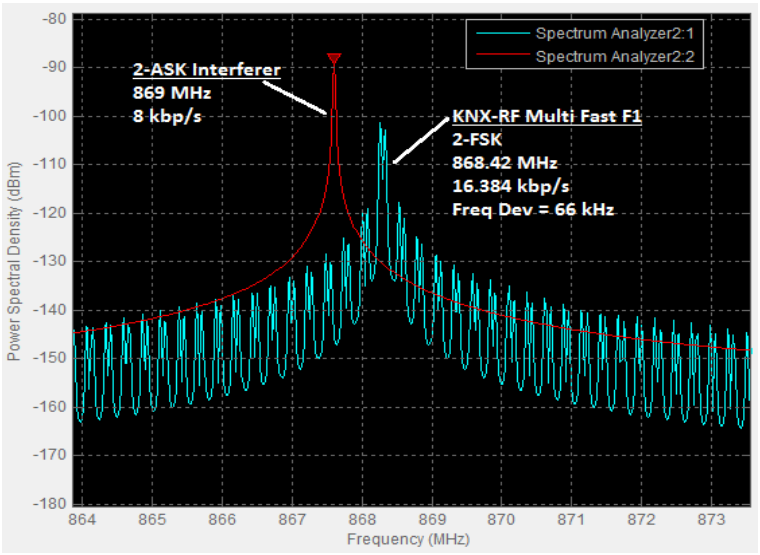


Figure IV-10 : Cas d'interférence de KNX-RF avec un signal modulé en 2-ASK

BY-NC-ND

Les résultats en termes de PDBT avec et sans filtres pour ce scénario sont présentés sur le Tableau IV-5.

Tableau IV-5 : Cas d'interférence de KNX-RF avec un signal modulé en 2-ASK

KNX Channel	Δf (MHz) $f_{INTERF} - f_{KNX}$	**PDBT(dB) = P_{INTERF} - P_{KNX}**	
		Sans SAW	**Avec SAW**
***F₂* (868.95 MHz)**	0.05	5	5
***F₁* (868,3 MHz)**	0.7	54	54

Après avoir analysé les courbes de BER résultantes de la Figure IV-11, il peut être conclu que l'interféreur N°1 avec la modulation 2-FSK perturbe beaucoup plus KNX-RF F1; ce qui est logique car sa fréquence est la plus proche.

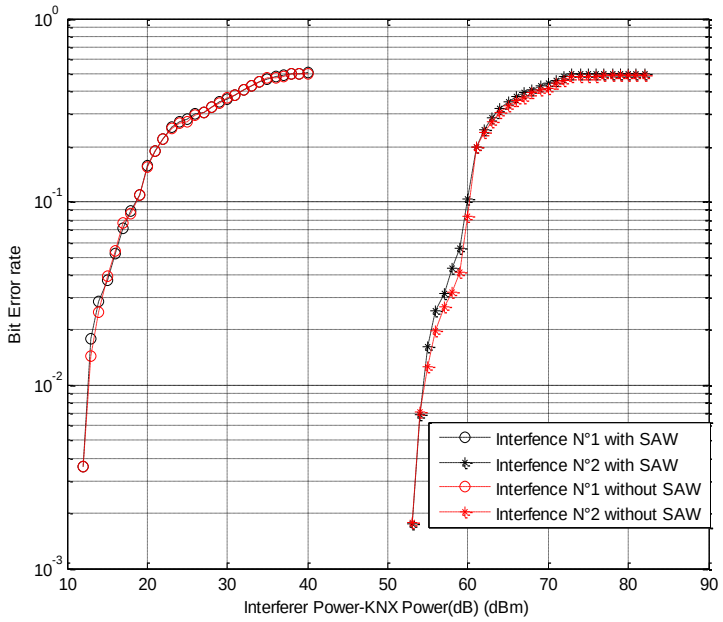


Figure IV-11 : Les courbes de BER des deux interférences

IV.2. Utilisation du modèle pour simuler les interférences dans une box domotique compacte multi-protocoles et multi-applications dans un environnement indoor

IV.2.1. Description de la box muti-protocole et du scenario d'application

La box domotique étudiée est composée de trois types de modules: le module KNX-RF-Multi, le module d'alarme radio et le module de contrôle (Figure IV-12). Elle comprend également un accès IP pour la communication via Wi-Fi. Elle peut être étendue à d'autres protocoles domotiques comme ZigBee, EnOcean... simplement en branchant des dongles à la box.

BY-NC-ND

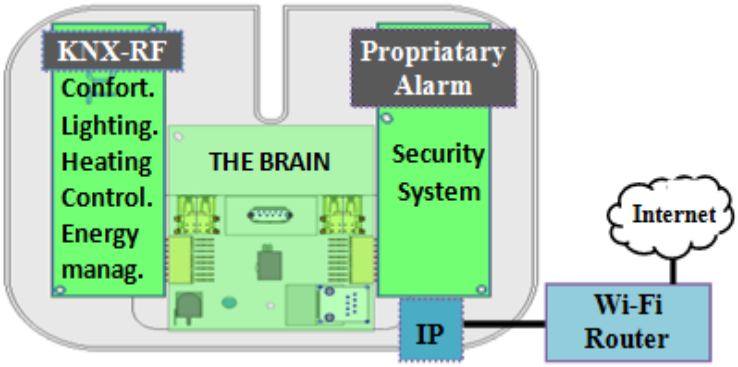


Figure IV-12 : Structure matérielle de la box domotique multi-protocole étudiée

La Figure IV-13 représente un scénario d'application où les appareils KNX-RF tous profil confondus et les produits de sécurité installés dans le bâtiment interagissent entre eux. Dans ce scénario, le système est centralisé, c'est-à-dire que toute communication radio passe par la box, mais cela n'empêche pas que certains produits fonctionnant avec le même protocole et ayant le même profil puissent directement communiquer entre eux sans passer par la box.

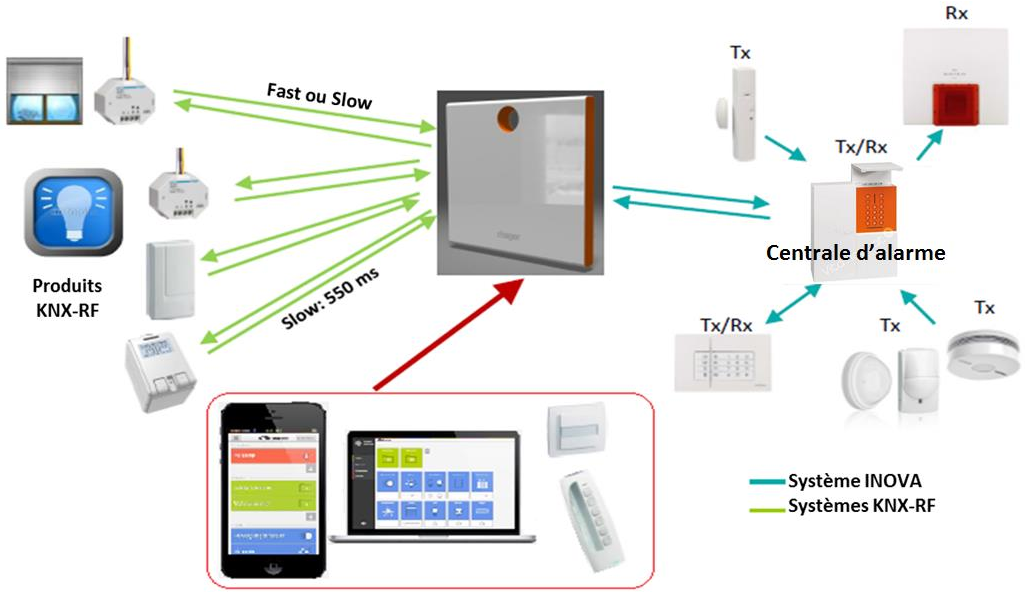


Figure IV-13 : Les équipements HBA et les systèmes de sécurité en interaction avec la box domotique

Le module d'alarme utilise un protocole propriétaire appelé « INOVA » dédié aux systèmes de sécurité radio. Il peut fonctionner sur deux fréquences, 869 MHz et 434.5 MHz, avec une modulation 2-ASK et un débit maximum de 4096 chip/s. Ce protocole propriétaire est utilisé car que sur le marché il n'existe aucun protocole RF standardisé ouvert dédié à la sécurité dans les bâtiments. Le protocole INOVA se démarque par le fait qu'il respecte la norme française d'alarme et de protection des bâtiments NFa2p, et par une offre complète de produits de sécurité où les produits alimentés par piles ont une excellente durée de vie (> 4 ans) comparé aux autre offres sur le marché exemple [104], [106].

BY-NC-ND

Le module de contrôle est le noyau de cette box ; il gère le fonctionnement des produits et leurs interconnexions. Il utilise le module KNX-RF pour configurer et interagir avec les produits domotiques KNX-RF (éclairage, volets roulants, thermostats et vannes de chauffage motorisés, etc.) mais aussi pour l'interaction avec les compteurs d'énergie comme Linky [114]. Il utilise le module d'alarme pour la configuration et le traitement des informations provenant de détecteurs de mouvements, des caméras de surveillance et de la centrale d'alarme. Il utilise la connexion IP pour le contrôle et la supervision via Internet.

Un scénario d'application de la box serait par exemple le suivant (illustration Figure IV-14) : une activité inhabituelle est détectée par un détecteur de mouvement (ou une caméra de surveillance), celui-ci transmet alors une trame à la fois au module d'alarme de la box et à la centrale d'alarme. Cette dernière déclenche immédiatement la sirène et tous les moyens de dissuasion. Le module d'alarme quant-à-lui communique avec le module KNX-RF pour déclencher immédiatement la fermeture de tous les volets roulants. Au même moment, le module Wi-Fi externe transmet un message d'alerte sur le Smartphone du propriétaire de la maison.

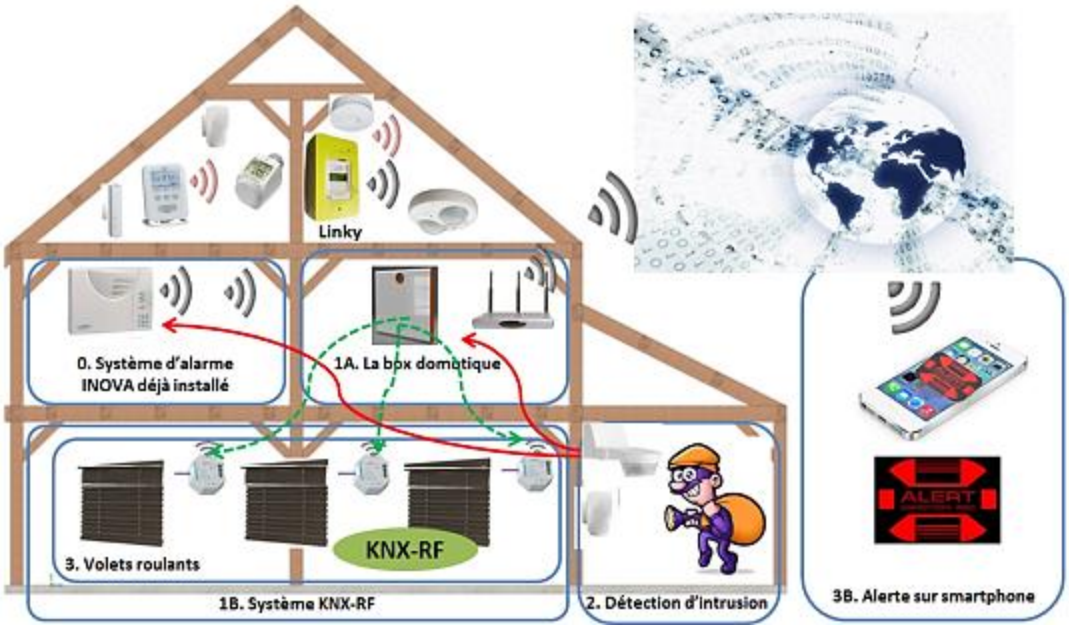


Figure IV-14 : Exemple de scénario d'utilisation de la box domotique

IV.2.2. Description de la problématique d'interférence associée à la box multi-protocolaire

Pour être multi-profils, la box comporte deux modules : KNX-RF Fast et KNX-RF Slow comme illustré dans Figure IV-15. Chacun de ces modules est connecté à une antenne fouet quasiment isotrope d'un gain d'environ 0 dBi et fournit une puissance de +10 dBm.

BY-NC-ND

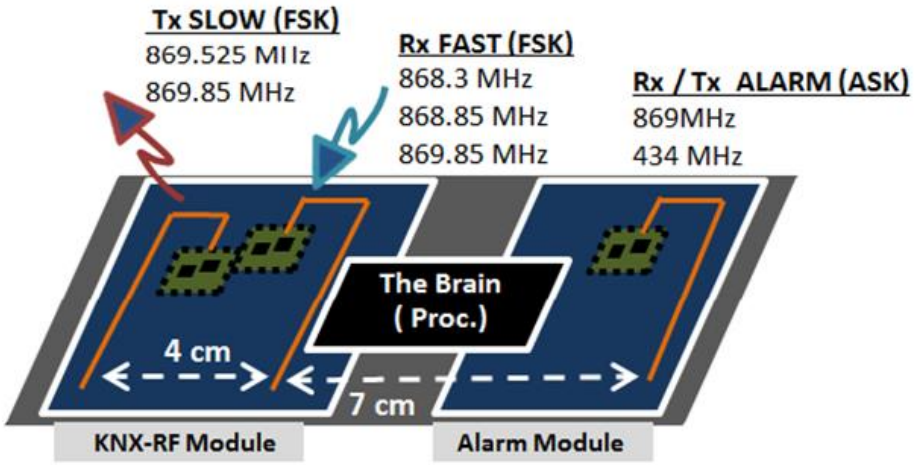


Figure IV-15 : Composition de la box domotique muli-protocoles étudiée

Le diagramme de rayonnement (ERP : Effective Radiated Power) en dBm de ces antennes à 868 MHz est présenté Figure IV-16 en polarisation horizontale et verticale. La mesure a été effectuée au moyen d'équipements calibrés composés d'une chambre anéchoïque SIEPEL, d'une antenne cornet SAS-571-7 de la société A.H. Systems, d'un analyseur de spectre Agilent N9020A et d'un logiciel dédié ANT32 de la société CT Systemes. Les deux antennes sont espacées de seulement 4 cm.

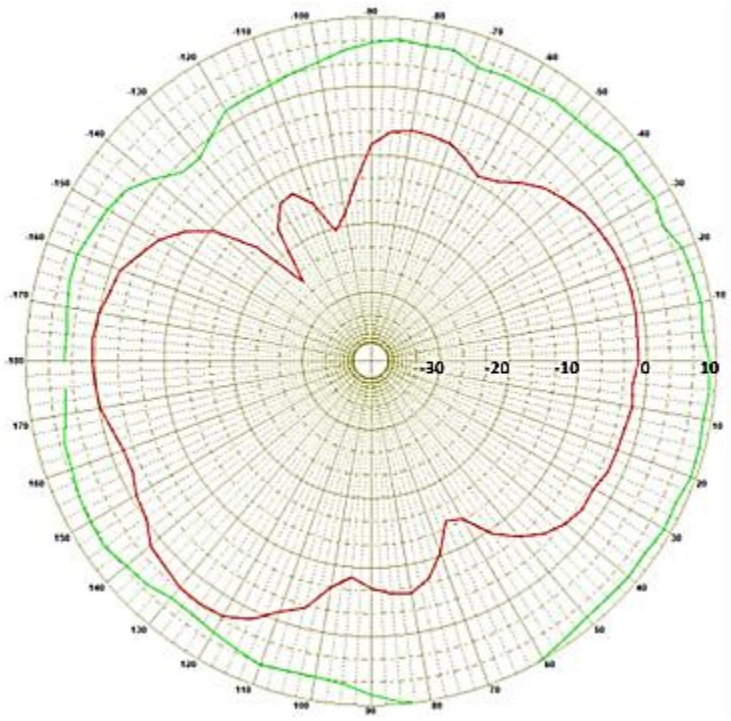


Figure IV-16 : Diagramme de rayonnement ERP de l'antenne utilisée à 868 MHz
(courbe rouge = polarisation horizontale, courbe verte= polarisation verticale)

Un retour d'état est la trame transmise lorsque la sortie d'un actionneur KNX-RF a changé, par exemple de ON à OFF. Le problème ici est que la réception et la transmission se font sur deux canaux

BY-NC-ND

KNX-RF adjacents (868,3 pour Fast et 869,85 MHz pour Slow) et que la très petite distance entre les deux antennes rend la réception du signal Slow difficile.

En effet, si un niveau de +10 dBm de puissance est utilisé pour la transmission du signal Fast, l'antenne supposé recevoir le signal Slow sera perturbée par environ +5 dBm de puissance d'interférence causée par un couplage mutuel d'antenne de -5 dB (mesuré avec la chambre anéchoïque SIEPEL et l'analyseur de réseau vectoriel calibré ZVB8 de Rohde & Schwarz). L'interférence se produit en réalité parce que la trame Slow occupe le canal pendant environ 550 ms alors que la trame Fast ne dure que 42 ms. Par conséquent, si une transmission Slow et une réception Fast (ou vice versa) se produisent simultanément, l'antenne dédié au Fast sera complètement aveuglée par l'émission de la trame Slow pendant 550 ms. La trame Fast de retour d'état sera alors perdue.

En ce qui concerne les interférences entre KNX-RF et le protocole INOVA, le risque d'interférence existe également puisque les deux protocoles partagent la même bande de fréquences quand la fréquence d'opération choisie pour le système d'alarme est de 869 MHz. Dans ce cas, il pourrait y avoir un couplage mutuel entre les antennes des deux modules car ils ne sont espacés que de 7 cm (Figure IV-15). Un scénario d'interférence dans ce cas serait par exemple le suivant : Le module d'alarme transmet des trames appelées "Check Alive" toutes les 20 minutes. Ces trames servent à vérifier que les produits de sécurité de protection et de dissuasion installés sont toujours actifs. Lors de la transmission de l'une de ces trames, le module KNX-RF de son côté tente de recevoir une commande quelconque au même instant « ***t*** ». Cette commande sera alors probablement perdue.

Dans tous ces scénarios d'interférences, la question est de savoir combien de trame seront perdues et à quel point cela est critique pour notre système multi-protocoles. Pour y répondre, plusieurs simulations et essais expérimentaux ont été réalisés ; l'objectif étant de mettre en place un outil capable de prédire ces problèmes par simulation. Mais avant cela, des probabilités de collision de trames ont été calculées pour avoir une première estimation théorique du nombre maximum de trames KNX-RF qui pourraient être perdues si de tels scénarios se produisent.

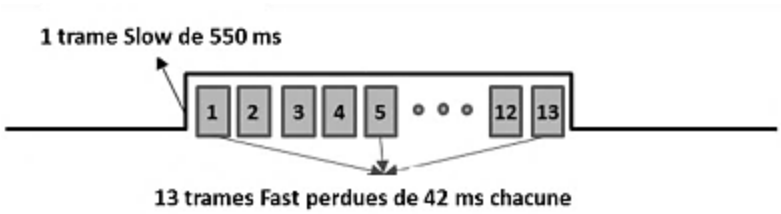


Figure IV-17 : Le nombre des trames Fast perdues lors d'une transmission Slow simultanée

IV.2.3. Calcul théorique de probabilité de perte de trames KNX-RF

La probabilité de perte de trames Fast et Slow est calculée pendant une période d'activité de 12 heures. Le scénario considéré ici est un environnement indoor où plusieurs produits de différents profils interagissent les uns avec les autres à travers la box domotique présentée. L'environnement

BY-NC-ND

indoor correspond ici à une grande maison de 8 chambres. Chaque chambre est équipée d'un certain nombre de produits KNX-RF. Le scénario considéré est un cas d'utilisation critique où 58 appareils domotiques sont utilisés : 52 appareils KNX-RF et 6 appareils Linky pour le comptage d'énergie. Le Tableau IV-6 décrit les types de produits utilisés dans ce scénario pire cas ; pire cas car cette box est plutôt dédiée à des applications dans des appartements ou maisons ayant une plus petite surface. Le nombre total de produits Tx / Rx et leurs temps d'occupation du canal sur une période de 12 heures ont été calculées.

Dans ce qui suit, nous allons calculer le nombre de trames Fast qui seraient perdues sur 12 heures dans le cas où la box transmet des trames Slow tout en essayant de recevoir des trames Fast. Dans le scénario étudié (Tableau IV-6), 92 trames Slow et 2398 trames transitent sur 12 heures. La durée d'occupation du canal par les trames Slow est de (92 x 550 ms) = 50,6 secondes. Si on divise cela par la durée d'une trame Fast (42 ms), on obtient le nombre de trame Fast perdues dues à la collision de trames, qui est de 1204 trames. D'autre part, on calcule le nombre total de trames reçues correctement pendant le reste du temps où le canal est libre. On divise alors 43149,4 secondes par 42 ms et on obtient que ~1027366 trames Fast sont reçues correctement. On calcule ensuite le ratio entre les trames Fast non reçues et reçues, qui donne un pourcentage de 0,11% de trames Fast perdues sur 12 heures. Or, il faut recevoir 2398 trames Fast sur 12 heures, cela fait donc (0,11% x 2398) ≈ 3 trames Fast perdues à cause des collisions de trames entre Fast et Slow. De la même manière, nous calculons le nombre de trames Slow qui seraient perdues sur 12 heures dans le cas où la box transmet, cette fois-ci, des trames Fast tout en essayant de recevoir des trames Slow. Il en résulte qu'une seule trame Slow serait perdue dans ce cas.

Les résultats montrent donc que 3 trames Fast dans le premier scénario et une 1 trame Slow dans le deuxième scénario pourraient être perdues sur une période de 12 heures en raison d'interférences entre les deux modules KNX-RF. Cela représente une perte de trame Fast estimée à $0{,}12\%$ sur 12 heures dans le premier scénario et une perte de trame Slow de $0{,}24\%$ dans le deuxième scénario. Ces taux sont inférieurs aux taux maximum de 2% fixée par la norme KNX-RF et qui correspond à un BER maximum de 10^{-4}.

BY-NC-ND

Tableau IV-6 : Détails sur le nombre de trames, temps d'occupations du canal et nombre de trames perdues en cas d'interférences entre KNX-RF Fast et KNX-RF Slow

Nombre de pièces	8
Nombre de lumières / pièces	1
Nombre de fenêtres/volets	1
Nombre de vannes chauffage	10
Nombre de convecteurs FP	5

		Nb de produits	Nb d'actions en 12 Hours	Durée de la trame Fast (ms)	Durée de la trame Slow (ms)	Nb total de trame Fast	Nb total de trames Slow	Durée totale d'occupation Fast (ms)	Durée totale d'occupation Slow (ms)
Capteur feuillures		8	4	42	550	32	32	1344	17600
Commande de vannes		10	6	42	550	60	60	2520	33000
Cercueil FP		5	6	42		30		1260	
Pilote volet roulant		8	4	42		32		1344	
Pilote lumière		8	10	42		80		3360	
Capteur température ambiante		8	48	42		384		16128	
Capteur température extérieur		1	48	42		48		2016	
Capteur luminosité		4	144	42		576		24192	
Compteur d'énergie (Linky)		6	144	46		864		39744	
Retour d'états	Eclairage	8	10	42		80		3360	
	Volet roulant	8	4	42		32		1344	
	Vanne de chauffage	15	12	42		180		7560	
					TOTAL	2398	92	104172	50600

	Trames Fast	Tarmes Slow
Nombre de trame perdues	2,81	0,22
Pourcentatge de trames perdues	0,12%	0,24%

BY-NC-ND

IV.2.4. Les résultats de simulation avec le modèle Matlab / Simulink

Le modèle MATLAB/ Simulink développé est utilisé pour simuler le premier scénario d'interférence entre les modules Fast et Slow. La réception de chaque canal KNX-RF-Multi Fast (F1, F2 et F3) a été simulé en étant perturbé par une émission dans un canal Slow (S1 ou S2). Le niveau de puissance du signal d'interférence Slow émis est à chaque fois fixé à +5 dBm, qui correspond à la puissance qui se retrouve, à cause du couplage d'antenne, à l'interface de l'antenne supposée recevoir le signal Fast. La puissance de ce signal Fast fixé initialement à +10 dBm est ensuite diminuée jusqu'à ce que la première erreur binaire apparaisse en réception. Ceci permet par la suite de déduire la portée du signal ainsi perturbé. Les résultats de simulation sont présentées Tableau IV-7. Ils démontrent que plus la fréquence du signal d'interférence Slow est proche de celle du signal utile Fast, plus la désensibilisation du récepteur Fast est rapide et la portée du signal Fast s'en retrouve plus courte. Ces résultats ne sont valides qu'en champs lointain (Annexe 1). Les résultats où l'espacement en fréquence entre les deux modules KNX-RF est proche de 0 mètre doivent considérer les conditions de champ proche, mais cela n'a pas été simulé dans ces travaux car on peut déjà conclure que le système n'est pas opérationnel dans ces cas-là.

Tableau IV-7 : Les résultats de simulation d'interférence entre les canaux Fast et Slow

Canal testé	**Canal interférent**	**Δf (MHz)** $= \lvert f_{INTERF} - f_{KNX} \rvert$	**Sensibilité de réception (dBm)**	**Portée estimée (mètres)**
Canaux FAST	Sans interférence	_	- 100	1200
Rx *F1*	Tx *S1*	1,55	- 64	43
Rx *F1*	Tx *S2*	1,255	- 59	25,5
Rx *F2*	Tx *S1*	0,9	- 51	10
Rx *F2*	Tx *S2*	0,575	- 40	2,7
Rx *F3*	Tx *S1*	0	_	0
Rx *F3*	Tx *S2*	0,325	- 26	0,5

IV.2.5. Test expérimentaux dans un environnement outdoor

Cette partie couvre les détails concernant les essais expérimentaux menés dans un environnement extérieur pour évaluer les limites de KNX-RF dans les scénarios d'interférences précédemment décrits et vérifier les résultats des simulations. Les mesures ont été réalisées dans un espace libre ou il n'y a aucun obstacle, bâtiment ou végétation. La box comprend les 4 modules présentés dans la IV.2.2 et tous ont été chargé avec les programmes appropriés. Le PCB utilisé est de type FR4 et fait 1,6 mm d'épaisseur (Figure IV-18).

BY-NC-ND

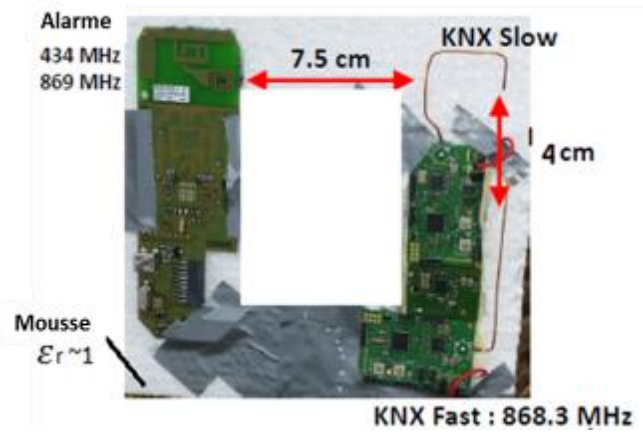


Figure IV-18 : Support physique de la box domotique utilisée dans les tests expérimentaux

IV.2.5.1. Méthode de mesure

La box domotique a été monté sur un trépied à une hauteur d'un mètre du sol. Un produit KNX-RF est lui aussi monté sur un trépied à un mètre du sol et sa position est modifiée tout en restant en visibilité directe (LOS) par rapport à la box. Ceci permet de déterminer la distance à partir de laquelle on commence à perdre des trames. Le produit transmet des trames KNX-RF vers la box alors que celle-ci transmets périodiquement des trames, considérés comme des trames d'interférence, vers d'autres produits. Trois scénarios sont évalués afin de déterminer la distance à partir de laquelle on commence à perdre des trames :

a) KNX-RF Fast perturbé par KNX-RF Slow

Tableau IV-8 : Résultats expérimentaux des interférences entre signaux KNX-RF en outdoor

Canal testé	Canal interférent	Portée mesurée (m)	Portée simulée (m)	Probabilité de perte de trame
Rx *F1*	Pas d'interférence	1161	1200	-
	Tx *S1*	43	43	0,12%
	Tx *S2*	29	25,5	0,12%
Rx *F2*	Pas d'interférence	1163	1200	-
	Tx *S1*	17	10	0,12%
	Tx *S2*	2	2,7	0,12%
Rx *F3*	Pas d'interférence	1021	1200	_
	Tx *S1*	-	-	0,12%
	Tx *S2*	0,5	0,5	0,12%

Le Tableau IV-8 montre les limites de portée radio observées sur chaque canal KNX-RF Fast testé, ainsi que la probabilité de perte de trame correspondante. On peut conclure à partir des résultats que dans le cas de fortes perturbations du signal KNX-RF, la portée radio diminue de plus de 1 km en cas d'absence d'interféreur à seulement quelques mètres en cas de forte interférence. En outre, ils

BY-NC-ND

montrent que les résultats de simulation corrèlent assez bien avec les résultats expérimentaux pour les six scénarios d'interférence étudiés. Les différences de portée entre la simulation et la mesure ne dépassent pas 7 mètres et la marge d'erreur en termes de bilan de liaison est de l'ordre de +/- 5 dB.

b) KNX-RF Fast et Slow perturbés par INOVA

Dans ce second test, le signal KNX-RF émis par le produit vers la box est confronté à un signal d'interférence INOVA émis en même temps par cette box vers un autre produit. Rappelons que l'antenne INOVA est placée à 7 cm seulement de l'antenne KNX-RF Fast. INOVA dispose de deux fréquences de fonctionnement 869 MHz et 434.5 MHz, toutes les deux sont testées. Les limites de portée obtenues pour tous les canaux KNX-RF sont rapportés dans le Tableau IV-9. Les résultats montrent qu'un système INOVA à 434,5 MHz ne perturbe pas la réception des trames KNX. En revanche, un signal INOVA à 869 MHz perturbe fortement la réception des trames KNX car ils partagent la même bande de fréquences. En constate dans ce dernier cas que la portée est de l'ordre de quelques centimètres à environ 2 mètres tout au plus.

Tableau IV-9 : Résultats expérimentaux des interférences entre signaux KNX-RF et INOVA en outdoor

Canal KNX-RF testé	**Canal INOVA (MHz)**	**Δf (MHz)** $= \lvert f_{INOVA} - f_{KNX} \rvert$	**Portée mesurée (m)**	**Probabilité de perte de trame**
Rx *F1*	Pas d'interférence	-	1161	-
	869	0,7	1,6	0,06%
	434,5	433,8	>1070	0%
Rx *F2*	Pas d'interférence	-	1163	-
	869	0,05	0,1	0,06%
	434,5	434,45	>1070	0%
Rx *F3*	Pas d'interférence	-	1021	-
	869	0,85	2,2	0,06%
	434,5	435,35	>1070	0%
Rx *S1*	Pas d'interférence	-	1125	-
	869	0,85	2	0,21%
	434,5	435,35	>1070	0%
Rx *S2*	Pas d'interférence	-	1133	-
	869	0.525	1	0,21%
	434,5	435,025	>1070	0%

BY-NC-ND

IV.2.6. Test expérimentaux dans un environnement indoor

Dans la deuxième campagne de mesure, la propagation du signal radio KNX-RF dans un environnement indoor a été étudiée. Dans ce cas, les facteurs qui ont impact sur la transmission du signal comportent non seulement le Path Loss, mais également les murs, les étages, les interférences, etc. Ces tests ont été conduits dans une maison typique composée de 2 étages et d'un sous-sol. Chacun des étages de la maison fait une surface de 27 x 17 mètres carrés, le sous-sol fait quant-à-lui 10x4 mètres carrés. Les murs de la maison sont de béton et de brique. La superficie totale de la maison jardins inclus fait 50 x 17 mètres carrés. Les dalles faisant les étages sont constituées de béton armé.

a) Résultats des tests effectués en absence d'interférence

Dans un premier temps, les mesures ont été faites dans la maison sans perturbation. La Figure IV-19 montre l'emplacement des produits pour tester les effets des murs et des étages. Des produits Fast et Slow ont été placés dans plusieurs coins de la maison pour vérifier si les signaux émis sont transmis par la box placée au rez-de-chaussée. Les résultats montrent que les produits KNX-RF ont une bonne portée d'environ 50 mètres. En effet, les signaux Fast et Slow sont reçu même lorsque les émetteurs sont placés à l'extrémité du jardin ou au coin le plus éloigné du grenier.

Figure IV-19 : Portée de KNX-RF à l'intérieur d'une maison sans interférences

BY-NC-ND

b) Résultats dans le cas où les signaux KNX-RF sont perturbés par d'autres signaux KNX

- **KNX-RF Fast perturbé par KNX-RF Slow**

Dans ce scénario, la box de reçoit une trame Fast en même temps qu'elle est en train d'émettre une trame Slow. Les différents emplacements des émetteurs présentés Figure IV-19 ont été à nouveau testés ici. La Figure IV-20 montre que les emplacements de l'émetteur Fast ou la trame transmise a été correctement reçue par la box. Tous les canaux KNX-RF ont été testés. Les résultats démontrent que la zone de couverture a diminué en raison des interférences.

- **KNX-RF Slow perturbé par KNX-RF Fast**

Dans ce scénario, la box de reçoit une trame Slow en même temps qu'elle est en train d'émettre une trame Fast. Les résultats de la Figure IV-21 montrent que la zone de couverture est seulement limitée aux chambres qui entourent la box à cause des interférences.

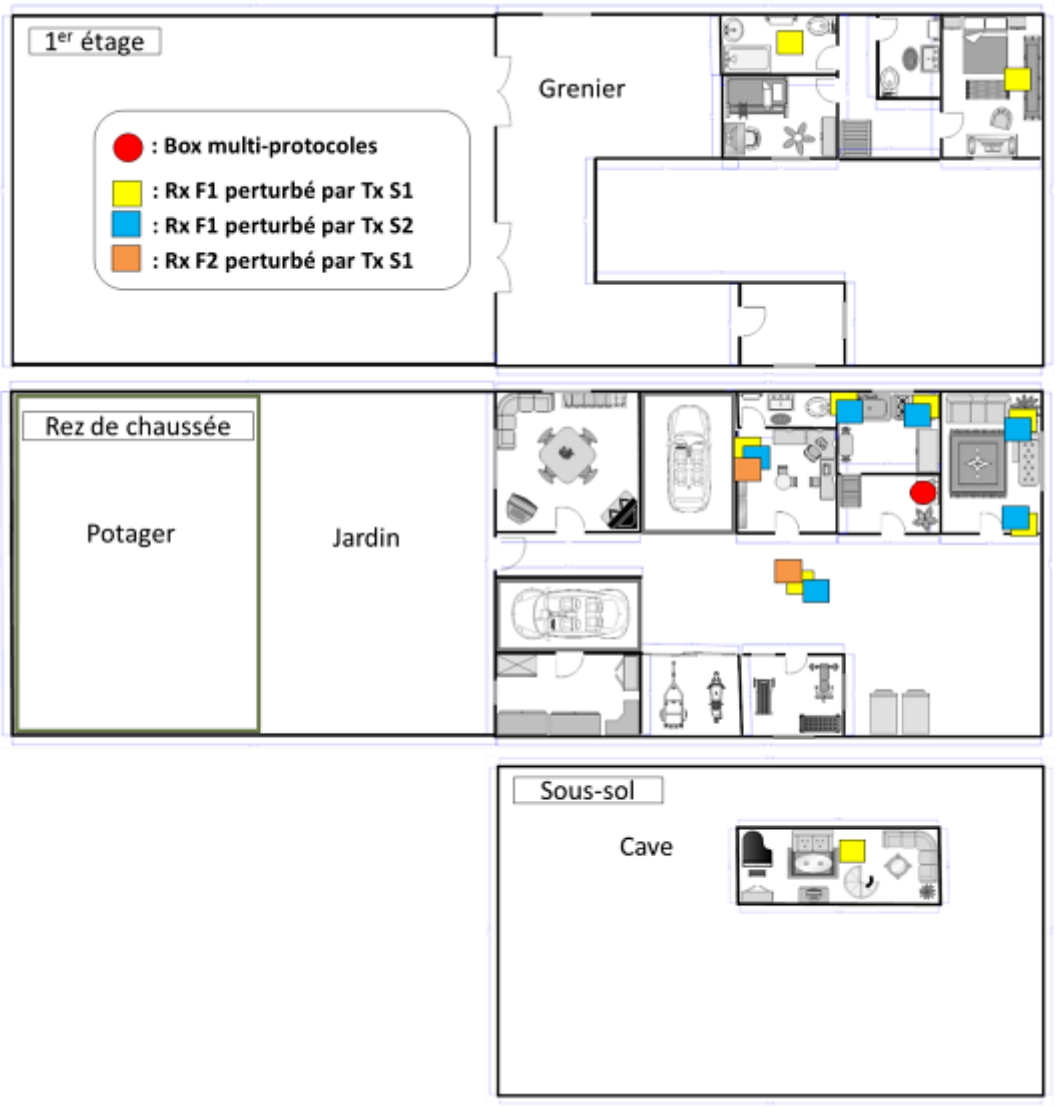


Figure IV-20 : Portée de KNX-RF Fast lorsqu'il est perturbée par des signaux Slow émis par la box

BY-NC-ND

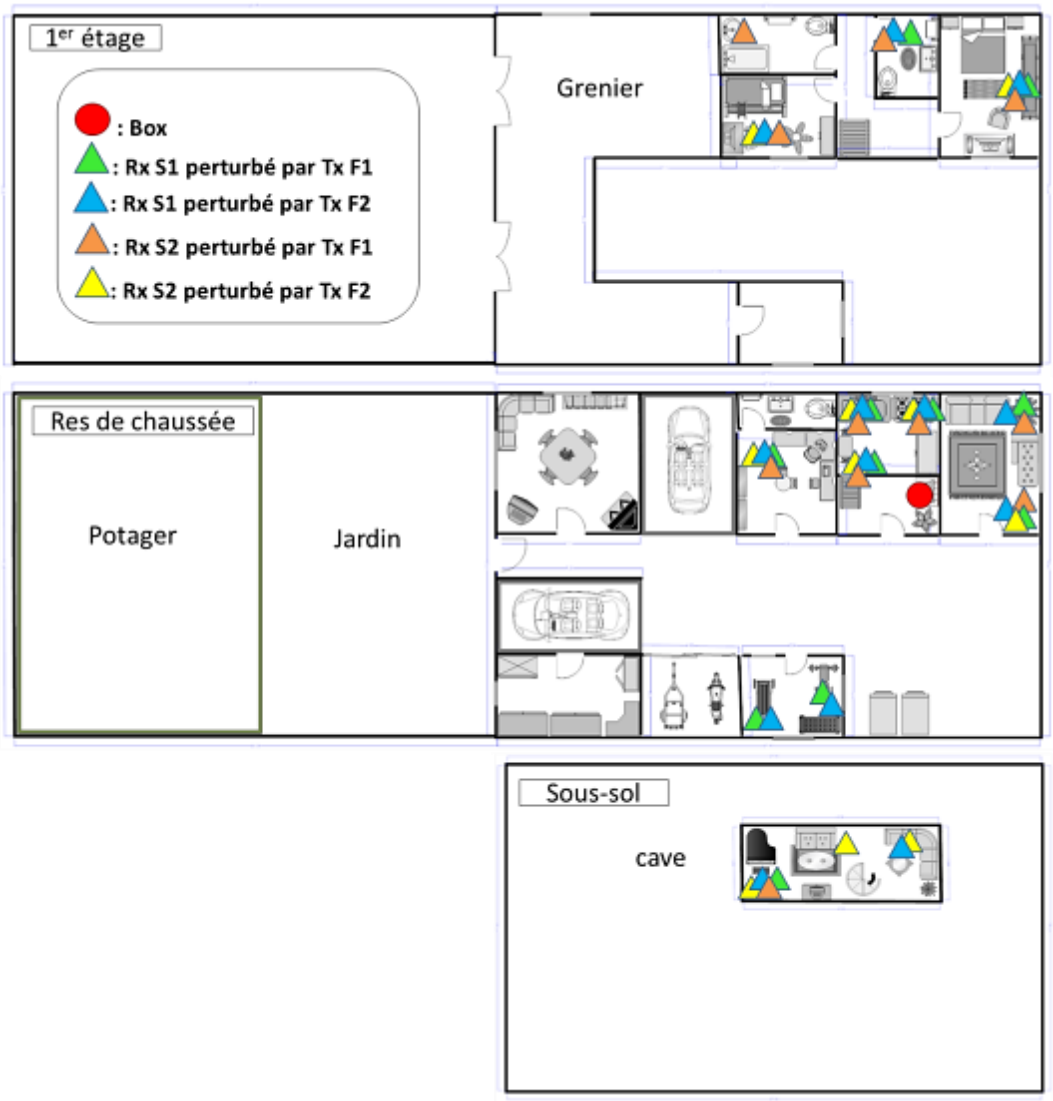


Figure IV-21 : Portée de KNX-RF Slow lorsqu'il est perturbée par des signaux Fast émis par la box

c) Résultats dans le cas ou KNX-RF est perturbé par des signaux INOVA

Comme le montre la Figure IV-22, lorsque la fréquence de fonctionnement du système d'alarme INOVA est réglé sur 434,5 MHz, le test expérimental montre qu'aucune perturbation du module KNX-RF ne se produit puisque les deux protocoles ne partagent pas la même bande (également vérifié par les simulations MATLAB).

BY-NC-ND

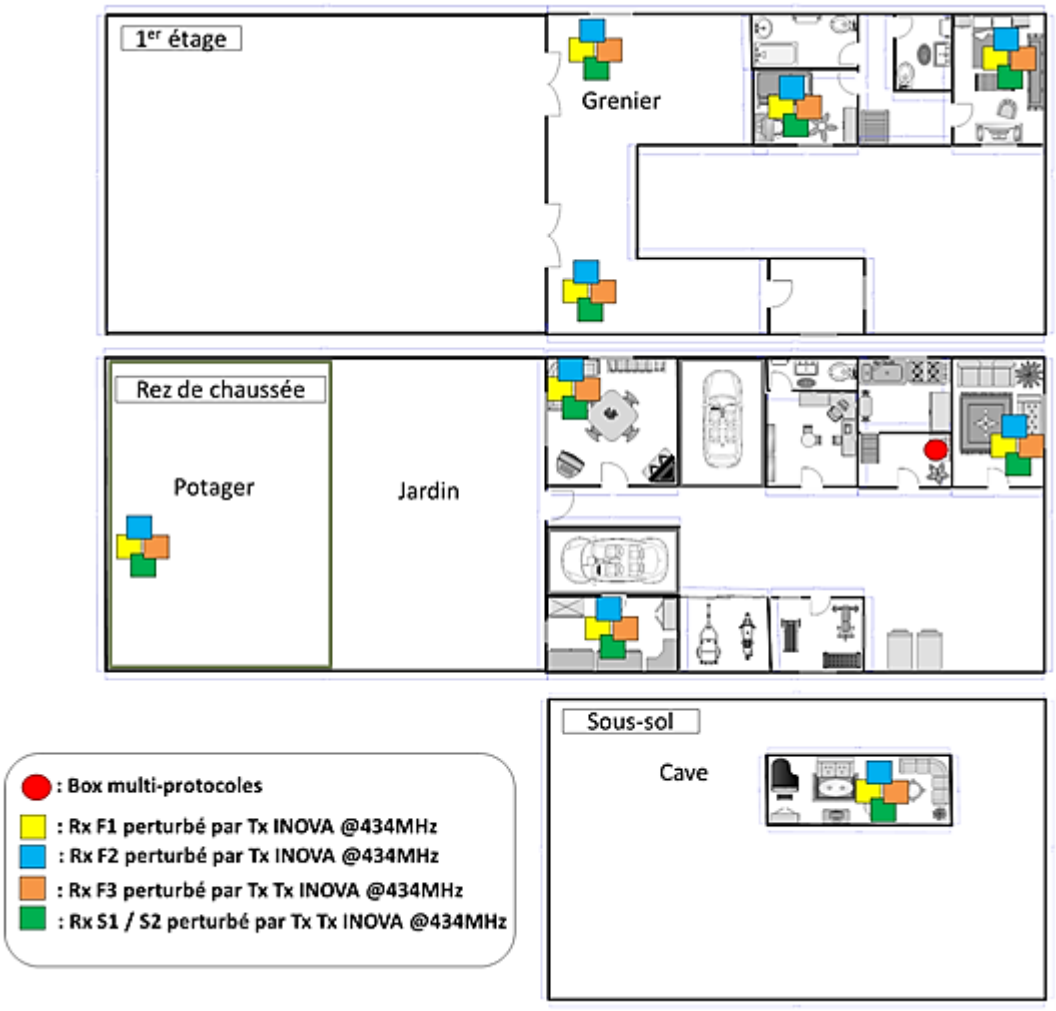


Figure IV-22 : Portée de KNX-RF lorsqu'il est perturbée par un signal INOVA 434 MHz émis par la box

Cependant, la Figure IV-23 montre que le réglage de la fréquence du système d'alarme à 869 MHz provoque des interférences graves. Les tests montrent que la couverture radio diminue considérablement dans ce scénario (en dessous de 2 mètres).

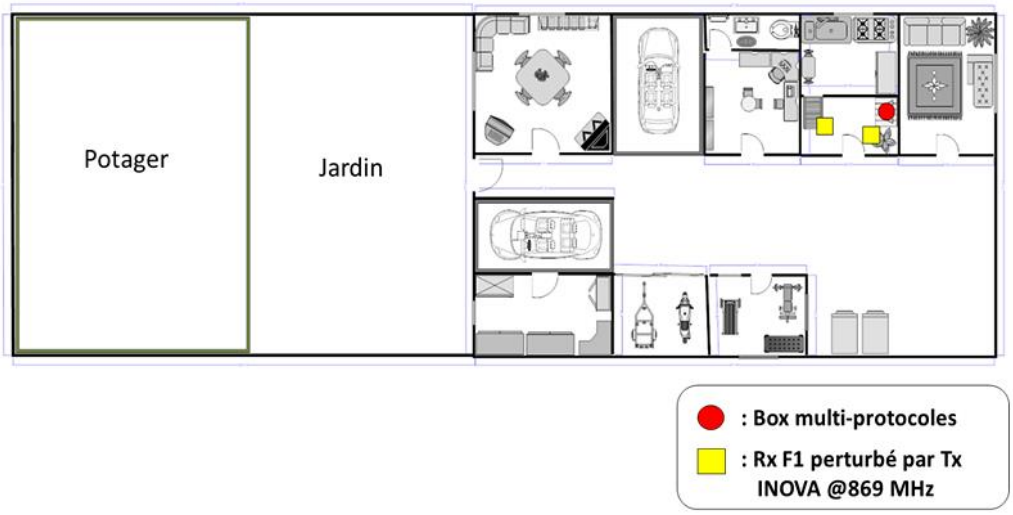


Figure IV-23 : Portée de KNX-RF lorsqu'il est perturbée par un signal INOVA 869 MHz émis par la box

BY-NC-ND

IV.3. Conclusion

Dans ce chapitre, un modèle MATLAB/Simulink qui permet d'avoir une estimation des performances du protocole KNX-RF dans des scénarios d'interférence est décrit.

Les résultats ont d'abord été analysés en se référant à la norme en vigueur KNX-RF dans le cas d'un blocage Rx, et ils confirment qu'un filtre externe au transceiver RF SEMTECH SX1211 est nécessaire pour être compatible avec cette norme. Ensuite, un scénario d'interférences entre différentes technologies radio placées côte à côte dans une box domotique compacte composée d'un module KNX-RF (868-870 MHz), un module d'alarme (869-433 MHz) et qui est extensible à d'autres modules radio. L'outil de simulation a été utilisé pour évaluer la criticité de l'interférence de ce système transversale et plusieurs essais expérimentaux intérieur / extérieur ont été effectués pour valider les limites de la portée radio observées. Les résultats ont montré une bonne convergence entre la simulation et l'expérimentation. En outre, une analyse de la probabilité de perte de trame est présentée dans ce travail. Enfin, le chapitre aborde quelques solutions aux limites de portée radio rencontrées pour les scénarios étudiés.

BY-NC-ND

Chapitre V

Simulation de la robustesse RadioFréquences de KNX-RF sous OMNet++

BY-NC-ND

Chapitre V. Simulation de la robustesse RadioFréquences de KNX-RF sous OMNet++

Dans ce chapitre, un modèle de simulation pour le protocole KNX-RF a été développé en utilisant le framework MiXiM de OMNeT++. C'est un simulateur qui permet de modéliser les différentes couches OSI, en particulier la couche MAC qu'on ne peut pas modéliser avec MATLAB/Simulink car celui-ci ne fournit que des modèles pour la couche physique. Le framework MiXiM a été choisi car il offre une boîte à outils puissante et riche en fonctionnalités et il est dédié spécifiquement à l'analyse des performances des réseaux de capteurs. D'ailleurs, de nombreuses normes telles que IEEE 802.11 (Wi-Fi) et IEEE 802.15.4 (ZigBee) ont déjà été évalués en utilisant cet outil. Un modèle pour la norme KNX-RF a donc été développé comme il n'en existe aucun aujourd'hui. Dans ce travail, le modèle a été construit conformément à la dernière version de KNX-RF «Multi». Un scenario d'auto-interférence sous forme d'une collision entre une trame Slow et une trame Fast a été simulé. Une solution d'amélioration de la robustesse radio dans ce cas sera proposée et validée par le modèle. Plusieurs autres scenarios sont envisageables et le modèle pourrait servir à valider les améliorations avant de les intégrer dans la stack d'un vrai produit.

V.1. Présentation du simulateur OMNet++

La plupart des simulateurs de réseaux sans fil sont dits simulateurs de réseaux à événements discrets. Tout ce qui se produit dans le monde réel (ou à l'intérieur du Hardware) est modélisé sous forme d'événements. Un événement pourrait être par exemple la transmission d'une trame. Par ailleurs, des événements peuvent en provoquer d'autres - dans l'exemple précédent, un évènement qui se déclencherait immédiatement après serait la réception de la trame par un autre nœud. Cette réception (ou transmission) peut aussi être modélisée sous forme de plusieurs fragments d'évènements (le nœud reçoit le préambule de la trame, le nœud reçoit le header, le nœud reçoit les données, etc.). Chaque événement a son horodatage, ou un moment précis dans le temps où il se produit, et à chaque événement le nœud exécute un bout de code pour gérer cet événement.

OMNet++ (Objective Modular Network) est un simulateur à événements discrets modulaire développé en C++ par le département des télécommunications de l'Université technique de Budapest [115]. Il fait partie des simulateurs de réseaux de capteurs les plus utilisés au côté de NS2, OPNET, Tossim et Tiny OS. Une comparaison entre OMNet++ et les autres simulateurs existants a d'ailleurs été réalisé dans [116] et [117]. OMNet++ et son environnement de développement IDE (Integrated Development Environment) sont basés sur la plateforme Eclipse qui fournit des outils pour la création et la configuration des modèles de réseaux comme les fichiers NED (Network Description) et INI (INItialization) et d'autres outils pour l'exécution des programmes. OMNet++ fournit également une interface graphique puissante et un noyau de simulation intégré. C'est un logiciel open source et sous licence GNU. Il supporte le débogage et permet la définition de scénarios de simulation simples mais aussi complexes. C'est ainsi que OMNet++ a gagné une forte notoriété au sein de la communauté

BY-NC-ND

scientifique et dans le monde industriel et a permis de simuler plusieurs briques de protocoles standards du marché grâce notamment à son architecture modulaire qui permet de réutiliser les modules et de les combiner de plusieurs façons comme des blocs de LEGO. Dans ces travaux, la version utilisée de OMNet++ est la version 4.6.

V.1.1. Description de la structure d'OMNet++

OMNet++ est basé sur des blocs appelés modules. Ces modules sont simples ou composés et sont connectés de façon hiérarchique. Le nombre de niveaux d'hiérarchie est illimité et l'ensemble des modules constituant le système est appelé Réseau. Dans l'exemple de la Figure V-1, A, B et C sont des modules simples et A et B sont utilisés ensemble dans un module composé D. A et B ont des ports d'entrée et de sortie par lesquels ils sont reliés les uns aux autres. D a seulement un port de sortie vers C et est donc incapable de recevoir des données.

Les modules simples sont écrits en C++ en utilisant la librairie de simulation basiques de OMNet et sont utilisés pour définir les algorithmes et définir le niveau bas de l'hiérarchie du modèle. Les modules composés sont constitués de plusieurs modules simples qui interagissent entre eux en utilisant des messages. Par ailleurs, un message peut être envoyé par un sous-module vers lui-même et dans ce cas, il est appelé « self-message » et est utilisé pour la planification d'événement (timer).

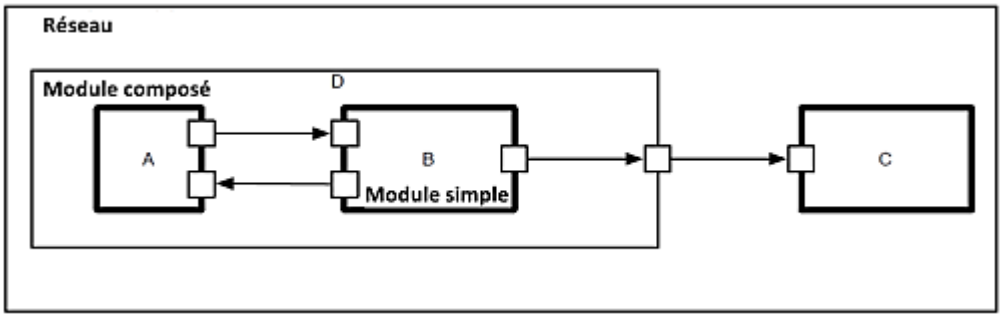


Figure V-1 : Module simple et module composé

Les modules simples utilisent à leur interface des ports appelés "gates" pour échanger des informations. Il y a les ports d'entrée "input", les ports de sortie "output" et les combinaisons des deux "inout". Un port d'entrée et un port de sortie peuvent être reliés par une connexion. Les connexions sont créées au sein d'un seul niveau de l'hiérarchie. Dans un module composé, un port associé à un module simple et un port associé à un module composé peuvent être connectés, mais les connexions entre deux niveaux d'hiérarchie différents ne sont pas autorisées. En outre, ces connexions déterminent la topologie du réseau simulé et les paramètres tels que le débit binaire, le temps de propagation et le taux d'erreur binaires leurs sont associés. OMNet++ utilise plusieurs types de fichiers dont:

- **Le fichier (.Ned):** ce fichier utilise le langage NED pour décrire la topologie du réseau (ports, connexions …) et décrire chacun des composants qui forment le réseau. Un fichier (.Ned) peut être utilisé en deux modes : mode graphique ou mode texte.

BY-NC-ND

- **Le fichier (.ini):** c'est un fichier de configuration étroitement lié au fichier (.Ned). Il permet la description du cas d'application et l'initialisation des paramètres de simulation (le temps maximum d'exécution, le nombre de nœuds, l'identifiant de chaque nœud, etc.).
- **Les fichiers (.cc) et (.h):** ces fichiers C++ représentent un module et correspondent respectivement au fichier code source et au fichier de l'entête.
- **Le fichier (.msg):** les messages échangés entre les modules sont déclarés dans ce type de fichier.

Le système de simulation fournit les composants suivants :

- **Un noyau de simulation :** celui-ci contient le code qui va gérer la simulation et la bibliothèque des classes C++. Il est compilé dans une bibliothèque partagée ou statique (des fichiers avec des extensions. a ou .lib). La plupart des classes dans la bibliothèque de simulation OMNet++ représentent les différente s entités du modèle : les ports, les canaux, les modules, les paramètres des modules, les objets, ainsi de suite. Par exemple, les messages et les paquets sont représentés respectivement par la classe cMessage et sa sous-classe cPacket. Une autre classe fréquemment utilisé est la classe cQueue, qui définit la file d'attente des paquets ainsi que leurs priorités.
- **Des interfaces d'utilisateur :** ces interfaces sont utilisées à l'exécution de la simulation pour faciliter le débogage. L'interface graphique Tkenv par exemple peut afficher des animations associés aux transit des paquets entre les différents nœuds, aux changement d'états (Tx, Rx , Sleep) de ces nœuds via des codes couleurs, etc. De plus, OMNeT ++ peut optionnellement créer un fichier contenant un enregistrement graphique des événements tels que la création et la suppression de messages, l'échéance des évènements, les transmissions de messages entre les sous modules (utile pour voir ce qui ce passe entre les différentes couche OSI par exemple), les échanges de paquets entre les nœuds ; et bien d'autres informations très utiles pour le débogage.

Le diagramme Figure V-2 présente les différentes étapes d'exécution d'une simulation sous OMNET++. Tout d'abord, les fichiers (.msg) sont traduits en code C++ par l'utilisation de programme opp_msgc. Ensuite, les codes sources sont compilés et liées à la bibliothèque d'interface utilisateur pour former une simulation exécutable. Les fichiers (.Ned) peuvent aussi être traduits en code C++ en utilisant l'outil nedtool et sont liés ou chargés dynamiquement quand la simulation commence. Lorsque le programme est lancé, il charge tout d'abord tous les fichiers spécifiés dans le modèle Ned de la topologie. Puis, il charge le fichier de configuration (omnetpp.ini) qui définit les paramètres de simulation. La définition des paramètres de plusieurs séries de simulation dans un seul fichier omnetpp.ini est possible. Les résultats de simulation sont ensuite écrits dans des fichiers ayant un format vectoriel (.vec), scalaire (.sca), ou bien un autre format définit par l'utilisateur.

BY-NC-ND

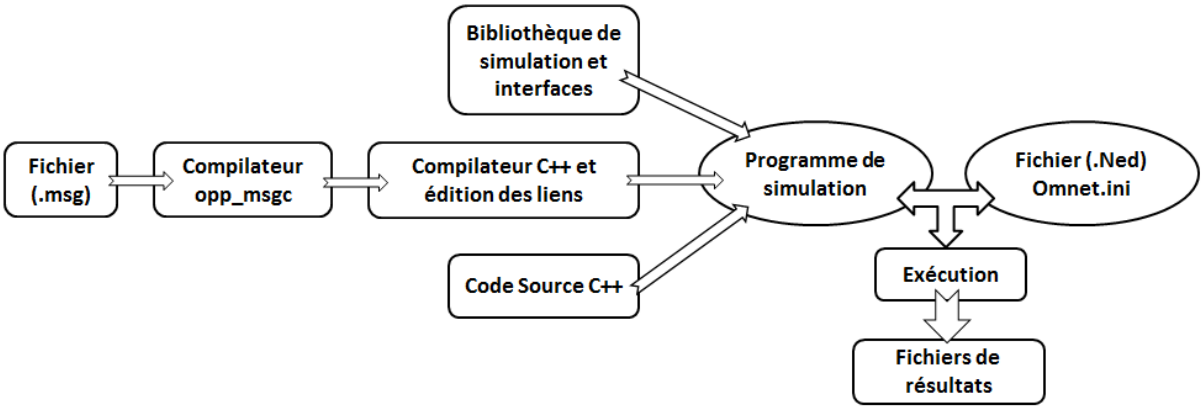


Figure V-2 : Les différentes étapes d'exécution d'une simulation sous OMNet++

V.1.2. Les différentes extensions (frameworks) de OMNet++

OMNeT ++ fournit un environnement de base et des extensions sous forme de frameworks pour simuler différent types de réseaux (ad-hoc, peer-to-peer, IP, etc.), les plus connus sont : Mobility Framework [118], MiXiM [119], Castalia [120]-[121] et INET Framework [122]. Seuls MiXiM et Castalia sont adaptés à la simulation complète d'un réseau de capteurs et ont pratiquement les mêmes fonctionnalités. Dans ces travaux, MiXiM est utilisé étant donné que Castalia requiert le système d'exploitation Linux, non adapté à notre environnement de travail. La version utilisée de MiXiM dans ces travaux est la version 2.3.

V.2. Description du Framework MiXiM

MiXiM [119] est un framework créé pour la modélisation des réseaux sans fil fixes et mobiles (réseaux de capteurs sans fil, réseaux BAN : Body Area Netwoks, réseaux VANet : Vehicular Ad-Hoc Network, réseaux cellulaires, etc.). Il propose des modèles détaillés de propagation d'ondes radio, d'estimation d'interférences, de consommation d'énergie et plusieurs protocoles pour la couche MAC (e.g. Zigbee). MiXiM est le fruit de la fusion de plusieurs frameworks développés pour OMNeT++ :

- ChSim développé par l'université de Paderborn.
- MAC Simulator développé par l'université technique de Delft.
- Mobility framework développé par l'université technique de Berlin.
- Positif framework développé par l'université technique Delft.

Outre les avantages de chacun de ces simulateurs, MiXiM introduit des extensions uniques comme le support complet de la 3D et la possibilité de simuler des réseaux comptant jusqu'à 1000 nœuds tout en ayant une faible utilisation de la mémoire.

Dans une communication entre deux produits, chaque paquet émis passe à travers les différentes couches OSI de l'émetteur et du récepteur où des événements sont créés à chaque passage. Malgré que

BY-NC-ND

MiXiM soit un framework puissant, il ne bénéficie pas d'un support adéquat de la communauté de recherche et la documentation disponible est difficile à comprendre. Aussi, il existe peu de tutoriels et la modélisation est assez complexe et requiert une excellente maîtrise du langage C++. Dans ce qui suit, nous allons décrire quelques-uns des principaux modules qui composent un réseau modélisé sur MiXiM.

V.2.1. Le module « Node »

Un exemple de module Node est illustré dans la Figure V-3. Sur MiXiM, toutes les couches OSI d'un nœud peuvent être modélisées. Dans notre cas, seules les couches permettant de modéliser les réseaux WSN nous intéressent, à savoir : la couche d'application (appl), la couche réseau (netw), la couche liaison (MAC) et la couche physique (PHY). La couche physique et la couche MAC sont regroupées dans un seul module appelé Network Interface Card (NIC). Les couches sont reliées entre elles par deux paires de ports OMNet, la première véhicule les messages de données et la deuxième véhicule les messages de contrôles. Le module de mobilité est responsable des mouvements des nœuds. Le module de batterie est utilisé pour modéliser la consommation d'énergie. Le module « arp » gère la résolution d'adresses (ARP), à savoir la traduction entre les adresses réseau et les adresses MAC. Le module « Stats » fournit une interface générale pour la collecte des données statistiques d'une simulation.

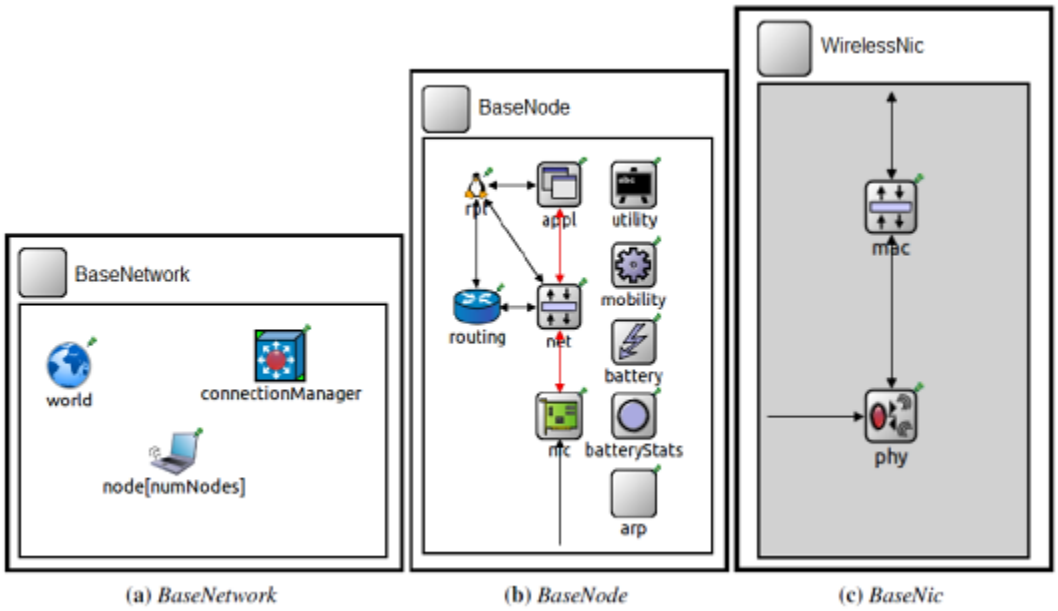


Figure V-3 : La structure générale d'un réseau, d'un nœud et de son NIC sur OMNet++

V.2.2. Le module NIC (Network Interface Card):

Ce module contient la couche MAC et la couche PHY, et c'est la partie la plus complexe de MiXiM.

BY-NC-ND

V.2.2.1. La couche Physique

La couche PHY est la partie centrale d'un nœud sans fil dans MiXiM. Elle est responsable de la transmission et la réception des messages, la détection de collision, le calcul d'erreur binaire, et de la commutation de l'état de la radio (Rx, Tx, Sleep, etc.). Elle est en outre responsable de l'application des modèles de canal de propagation utilisées dans les simulations. La couche physique MiXiM est divisée en trois parties :

- **Base-PhyLayer:** fournit les interfaces avec la couche MAC et les couches physiques des autres nœuds.
- **AnalogueModels:** est responsable de la simulation des atténuations appliquées sur le signal, comme le Shadowing, le Fading et les atténuations en espace libre (Path Loss). Une couche physique peut contenir un nombre arbitraire d'AnalogueModels. La classe AnalogueModel contient la fonction appelée **filterSignal()** qui prend comme argument le signal à traiter [123] et s'applique à la réception du signal. Les modèles de "AnalogueModels" sont spécifiés dans des fichiers de configuration appelés « config.xml ».
- **Decider:** est responsable de l'évaluation et de la classification du signal reçu. En effet, il détermine si le signal doit être considéré comme un signal utile, un signal d'interférence ou juste du bruit. Il est également responsable de la démodulation des messages reçus et du calcul d'erreurs binaires. Le décideur fournit des informations sur l'état actuel du canal (libre ou occupé) grâce au RSSI. Un ou plusieurs décideurs peuvent être définis dans le même fichier config.xml.

Les différentes classes qui constituent le module de la couche physique MiXiM et les modules qui en héritent sont détaillées dans l'Annexe 2.

V.2.2.2. La couche MAC

Concernant la couche MAC, elle s'occupe de fixer la puissance, le débit et le préambule du signal à transmettre avant de l'envoyer vers la couche physique. Elle récupère également l'état du canal en utilisant la fonction **phy->getChannelState( )** qui détermine si le canal est IDLE ou pas. Cette fonction retourne la valeur du RSSI calculé par le décideur (Decider) de la couche physique.

Plusieurs protocoles MAC ont déjà été implémenté sur MiXiM, notamment les protocoles B-MAC, L-MAC, T-MAC et les couches MAC des deux protocoles IEEE 802.15.4 et IEEE 802.11.

V.2.2.3. Le processus d'émission et de réception dans le module NIC

Les paquets arrivent de la couche supérieure, la couche réseau, et entrent dans la couche MAC. C'est au niveau de cette couche que la puissance de transmission (TX-power) et le débit de

BY-NC-ND

transmission sont définis. Ensuite, ces paquets sont encapsulés pour devenir des « Macpkt ». En descendant vers la couche physique, les Macpkt sont encapsulés dans ce que l'on appelle des trames aériennes "Airfraimes" en faisant appel à la fonction **CreateSignal( )** qui définit la représentation physique du signal qui sera transmis sur le canal de propagation radio. Ce signal va contenir en plus des informations sur le début de la trame et la durée de transmission, sa puissance et son débit.

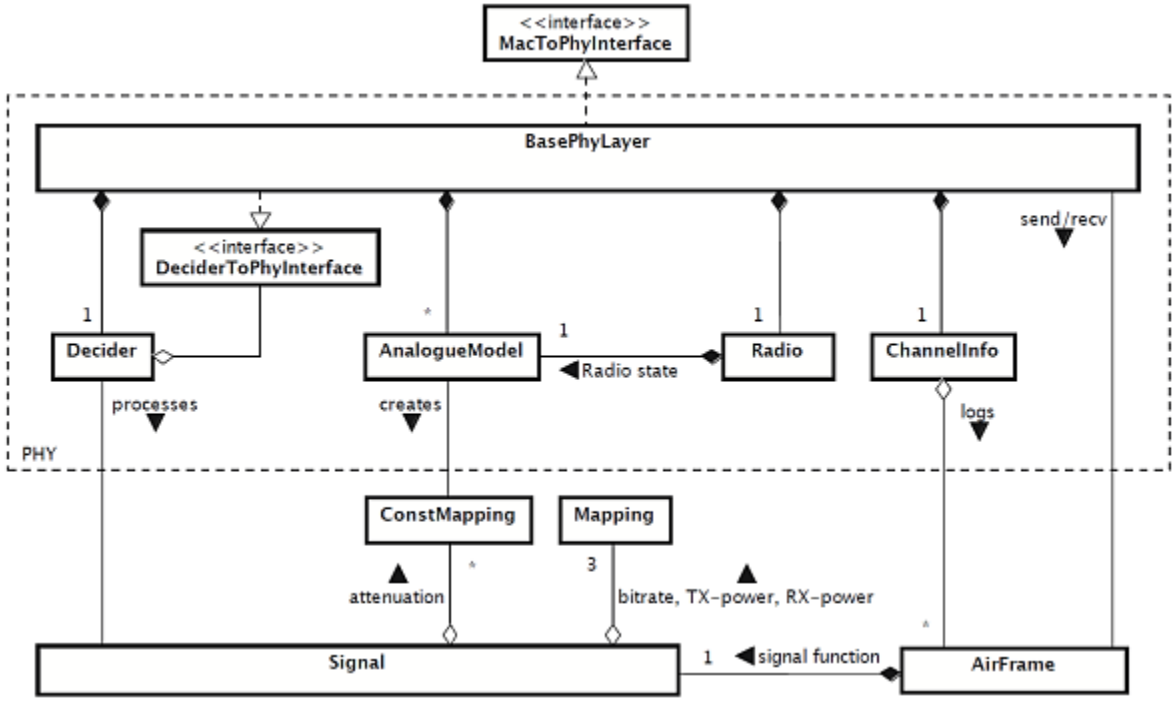


Figure V-4 : La procédure d'émission et de réception au niveau de NIC

Un clone de la trame AirFrame est envoyé à chaque nœud se trouvant à la portée de l'émetteur. Les couches physiques de ces nœuds reçoivent le signal qui sera traité par AnalogueModels pour simuler les effets du canal de propagation (e.g. atténuations, fading). Dans un modèle, il peut y avoir plusieurs AnalogueModels qui s'appliquent à la fois sur un signal. La puissance de réception (RX-power) est alors calculée en multipliant les modèles de propagation par la puissance de transmission (TX-power). En fonction de la puissance de réception résultante, le décideur (Decider) de la couche physique peut distinguer un signal d'un bruit, et peut calculer le SNR et donc le taux d'erreurs binaires selon la modulation utilisée.

V.2.3. Le module « Mobility »

MiXiM peut modéliser le mouvement de tout objet que ce soit un nœud ou un obstacle. Chaque fois que la position d'un objet change, tous les objets du réseau en sont informés pour mettre à jour les paramètres physiques comme la distance entre les nœuds, la puissance du signal reçu, etc. La mobilité est un processus continu, cependant un ajustement de l'intervalle de mouvement doit être fait pour avoir un bon compromis entre le temps de calcul et l'exactitude des résultats. Une collision des objets peut avoir lieu et change la trajectoire de l'objet de plusieurs façons en fonction du modèle de mobilité

BY-NC-ND

choisit (angle réfléchis, angle aléatoire, etc.). Dans ces travaux, le modèle de mobilité utilisé est le modèle statique, ce qui signifie que les nœuds ne changent pas de position pendant la simulation.

V.2.4. Le module « Battery »

Le module Battery s'occupe de la modélisation de la consommation d'énergie induite par l'activité du nœud. Le module permet de spécifier les caractéristiques de la batterie (capacité, tension, nombre de piles, etc.) pour chaque nœud et de déterminer périodiquement son état en utilisant les fonctions **estimateResidual()** et **getVoltage()**. La version courante de MiXiM propose seulement un modèle linéaire de la consommation de la batterie en utilisant le module SimpleBattery. Ce module maintient une table en mettant à jour la capacité résiduelle du nœud au fur et à mesure que la simulation se déroule et ce en utilisant l'équation :

$$C = C - \sum_d I_d \,.\, \Delta t . V_{nominal} \qquad \text{(V-1)}$$

Où C est la capacité résiduelle de la batterie, Δt l'intervalle de temps depuis le dernier update, I_d le courant consommé et $V_{nominal}$ la tension d'alimentation qui est assumée constante jusqu'à la décharge de la batterie. Dans ces travaux, la consommation de la batterie des nœuds KNX-RF n'a pas été simulée avec MiXiM car cela sort du cadre de cette thèse.

V.2.5. Le module « Connection Manager »

Le module responsable de l'établissement des connexions entre les nœuds s'appelle "ConnectionManager". La perte de la connectivité peut être due à la mobilité (par exemple des nœuds se déplacent et s'éloignent trop) ou due à un changement de puissance de transmission ou une panne de nœud. Afin de réduire la complexité de calcul dans MiXiM, les nœuds sont connectés seulement quand ils sont à l'intérieur d'une distance appelée Distance Maximale d'Interférence (DMI), une fois ils dépassent cette distance les connexions sont rompues. La DMI correspond à la distance maximale dans laquelle un nœud peut encore éventuellement perturber un nœud voisin. A noter que la distance maximale d'interférence ne détermine pas la portée maximale du produit. En effet, le fait que deux produits soient connectés par le ConnectionManager ne garantit pas que tous les signaux reçus par le récepteur soient correctes (limite de portée).

$$Distance\ Minimum\ d'Interférénce = \left(\frac{\lambda^2 * P_{max}}{16 * \pi^2 * P_{reçue\ Minimum}}\right)^{1/\alpha} \qquad \text{(V-2)}$$

Où : α : Coefficient de Path Loss minimal, λ : Longueur d'onde et

$P_{reçue\ Minimum}$: Le niveau minimal pour recevoir le signal

Les informations récupérées sur la connexion des nœuds sont transmises à la couche Physique (BasePhyLayer) car elles sont nécessaires à la transmission des signaux AirFarme sur le canal radio.

BY-NC-ND

V.3. Implémentation du protocole KNX-RF danx MiXiM

Dans cette section, les principales modifications et contributions qui ont permis de modéliser le protocole KNX-RF-Multi sur OMNet++/MiXiM sont détaillées.

V.3.1. Présentation générale du modèle simulé

Plusieurs classes de MiXiM ont été réutilisées et de nouvelles ont été rajoutées comme illustré dans le digramme UML de la Figure V-5. Conformément au standard KNX-RF, le modèle développé suit une topologie en étoile. Le protocole MAC implémenté pour modéliser les produits KNX-RF est une version modifiée du protocole Berkeley-MAC (ou B-MAC) qui est dédié aux réseaux de capteurs sans fil et qui avait déjà été modélisé par la communauté scientifique sur MiXiM. Dans le protocole B-MAC, les nœuds sont en veille la plupart du temps et se réveille à un intervalle régulier pour scanner les canaux radio. Ce fonctionnement correspond bien à un produit KNX-RF de type Slow, mais pas à un produit de type Fast. Pour adapter B-MAC à KNX-RF Fast, la phase de veille est supprimée. En effet, cela permet d'avoir un scanne permanent des fréquences Fast et évite d'avoir deux couches MAC différentes (Fast et Slow) pour le modèle simulé. Chaque nœud/produit KNX-RF représenté sur MiXiM intègre les quatre couches OSI nécessaires à son fonctionnement : la couche Application, la couche Réseau, la couche Liaison (MAC) et la couche Physique. Chaque produit active l'écoute de canal avant transmission (Listen-Before-Talk) et exploite plusieurs fréquences : F1, F2 et F3 pour les produit Multi-Fast et S1, S2 pour les produits Multi-Slow. Le changement de fréquences en cas d'échec de transmission combiné à un mécanisme d'acquittement est également modélisé conformément à ce qui est spécifié dans la norme KNX. En réception, les processus de scan de fréquences Fast et Slow sont également modélisés. Par ailleurs, toutes les durées spécifiées dans la norme KNX-RF ont été respectées dans cette modélisation, comme par exemple la durée des trames, des inter-trames, la durée du LBT, la durée des scannes en réception, etc. Dans les sections qui suivent, les modifications apportées aux couches OSI (en particulier PHY et MAC) ainsi qu'à d'autres modules de MiXiM seront décrites.

V.3.2. Le scénario de simulation

Un scénario de collision entre les trames Fast et les trames Slow est simulée sur OMNet++/MiXiM. Le modèle est alors constitué de trois types de nœuds : des nœuds périphériques Fast, des nœuds périphériques Slow et un nœud central qui est capable de traiter aussi bien du Fast que du Slow. C'est au niveau de ce dernier nœud que les collisions se produisent.

BY-NC-ND

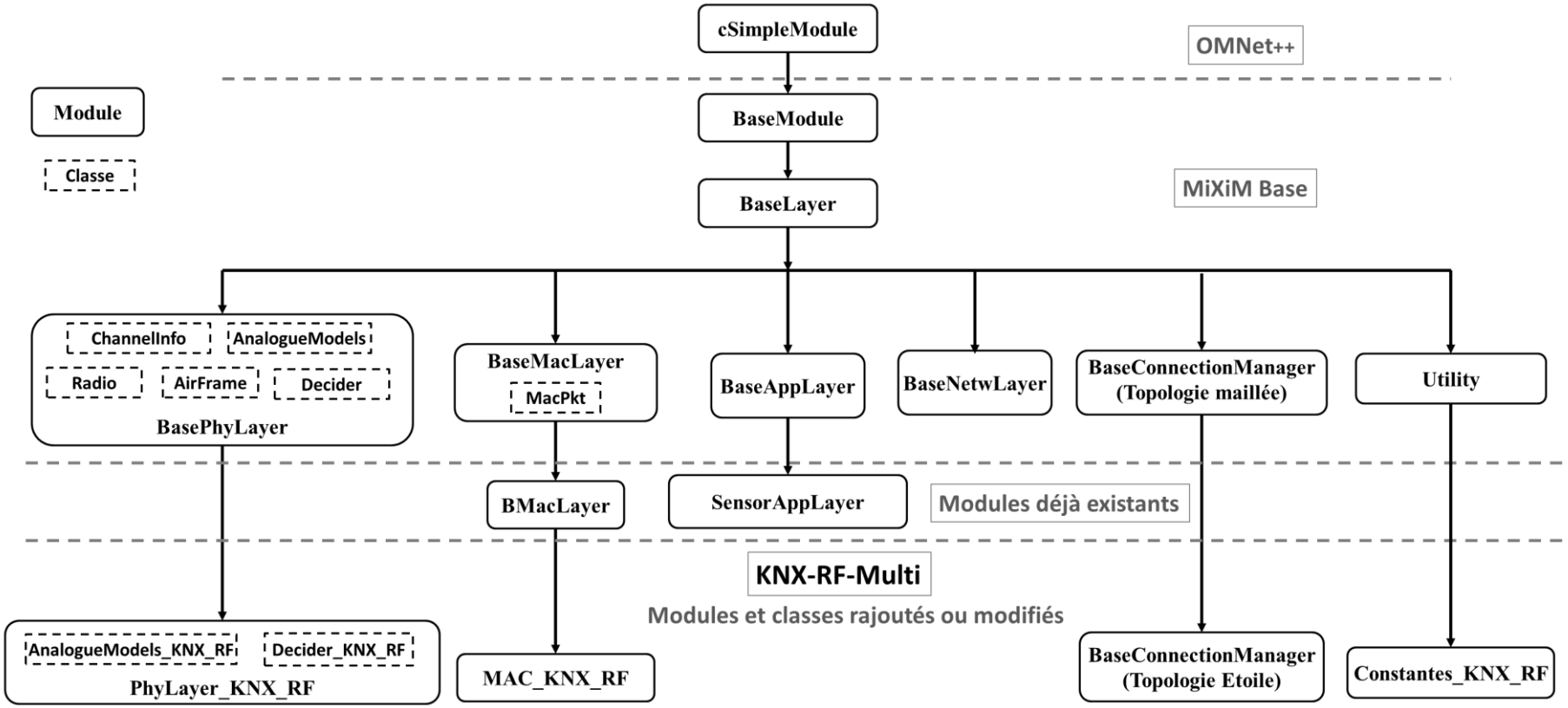


Figure V-5 : Diagramme représentant les relations les modules de OMNet++, MiXim et KNX-RF-Multi

BY-NC-ND

V.3.3. La couche Physique

V.3.3.1. Les paramètres génériques

Les paramètres génériques de la couche physique ont été paramétrés comme suit :

```
# Le bruit thermique
**.node[*].nic.phy.useThermalNoise = true
**.node[*].nic.phy.thermalNoise = -100dBm
# Les temps de transitions entre Rx, Tx et Sleep
**.node[*].nic.phy.timeRXToTX = 0.0000192s
**.node[*].nic.phy.timeRXToSleep = 0s
**.node[*].nic.phy.timeTXToRX = 0.0000192s
**.node[*].nic.phy.timeTXToSleep = 0s
**.node[*].nic.phy.timeSleepToRX = 0.00001792s
**.node[*].nic.phy.timeSleepToTX = 0.00001791s
# La sensibilité du récepteur
**.node[*].nic.phy.sensitivity = -95 dBm
# L'état initial de la radio (0=RX, 1=TX, 2=Sleep)
**.node[*].nic.phy.initialRadioState = 0
# Le nombre de canaux radio utilisés pour ce modèle. Ce nombre comprend les séries de
changement de canaux pendant la transmission et la réception pour KNX-RF Fast et pour
KNX-RF Slow. Ces séries de fréquences seront détaillées plus tard dans la section Couche
MAC.
**.node[*].nic.phy.nbRadioChannels  = 20
```

V.3.3.2. Le modèle de propagation

Concernant le modèle de propagation, le modèle choisit pour le module « AnalogueModels» est le modèle « SimplePathlossModel » qui est décrit par l'équation (V-2), avec un coefficient d'atténuation égale à α=3.75 qui permet d'avoir une portée de ~65 mètres pour une puissance d'émission de 100mW (+8 dBm). Dans ce même module, la fréquence d'opération du réseau KNX-RF « carrierFrequency » est fixée à 868,3 MHz.

V.3.3.3. Le décideur

Concernant les décisions prises en réception, une nouvelle classe Decider_KNX_RF a été créée qui hérite de la classe MiXiM BaseDecider. Le mapping utilisé pour les signaux KNX-RF se fait dans le domaine temps-fréquence **(DimensionSet::timeFreqDomain)**, contrairement à BaseDecider qui n'utilise que le domaine temporel. Ceci est nécessaire car une agilité en fréquence est implémentée pour le modèle KNX-RF et le décideur doit en tenir compte.

Etant donné que c'est la couche MAC qui est responsable du changement de canaux en émission et en réception, la couche PHY doit être avertie de chaque changement pour adapter son décideur à la nouvelle fréquence. Ceci est réalisé par la fonction : **decider->channelChanged(newRadioChannel).**

BY-NC-ND

Par ailleurs, Decider_KNX_RF implémente une modulation 2-FSK grâce à la fonction : **Decider_KNX_RF::getBERfromSNR** avec **BER = 0.5 * ERFC(sqrt(0.5 * SNR))**.

En outre, quand un signal KNX-RF est reçu par le récepteur pendant la phase de scanne, le récepteur vérifie que la fréquence scannée est bien égale à la fréquence du signal reçu par la condition **: if(result->isSignalCorrect() && Center_Frequencies[frame->getChannel()]**

= = Center_Frequencies[phy->getCurrentRadioChannel()]).

La fonction **frame->getChannel()** retourne la fréquence du signal reçu, et phy->getCurrentRadioChannel() retourne la fréquence du canal scanné. Dans le cas où cette condition n'est pas valide, la trame est perdue.

V.4. La couche MAC

V.4.1. Description de la couche B-MAC disponible sur MiXiM

Le protocole B-MAC a été développé par l'université de Berkeley et a été pour la première fois présenté dans [124]. C'est le protocole MAC le plus utilisé pour les applications de réseaux de capteurs sans fil et il fait partie de la catégorie des protocoles à échantillonnage de préambule (Figure V-6). Un des grands avantages de B-MAC est qu'il ne nécessite pas de synchronisation entre les nœuds. Le principe est de garder le produit le maximum de temps en veille, sans dégradation sensible de la réactivité du système. En effet, le produit est en veille pendant de longues périodes, et se réveille régulièrement pour scanner le canal radio et vérifier s'il y a une communication qui lui est destinée.

Dans le cas où le produit veut transmettre une trame, il commence par écouter le canal radio. Si celui-ci est libre, le produit transmet un préambule. Ce préambule doit être suffisamment long pour que tous les noeuds destinataires puissent l'entendre. Il doit par conséquent être d'une durée supérieure ou égale à la durée de veille. Ainsi, chaque produit dans le voisinage de l'émetteur va se réveiller et recevoir le préambule l'informant qu'il doit rester en réception active pour recevoir les données utiles.

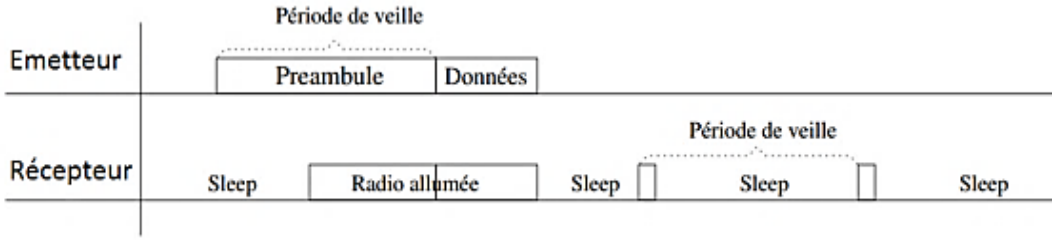


Figure V-6 : Protocole à échantillonnage de préambule

Sur MiXiM, B-MAC a été implémenté dans [125]. Il se trouve dans le module BMacLayer qui hérite du module BaseMacLayer. La machine à états qui représente son implémentation est décrite dans la Figure V-7.

BY-NC-ND

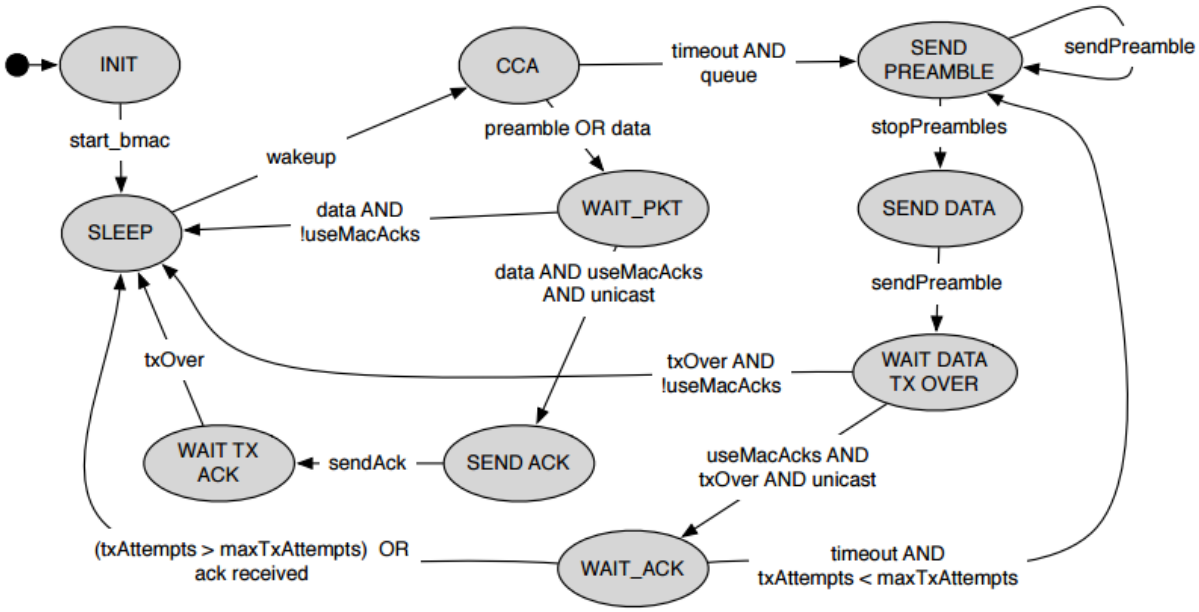


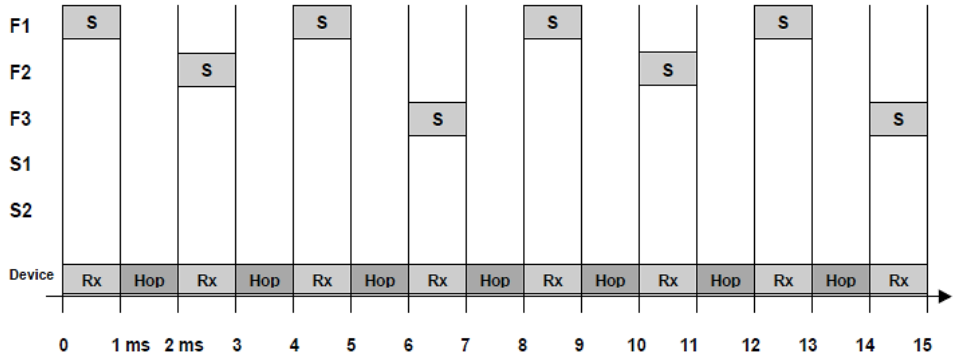
Figure V-7 : La machine à états du protocole B-MAC déjà existant sur MiXiM

Le protocole B-MAC implémenté sur MiXiM n'utilise qu'une seule fréquence. En outre, la fonction CCA (Clear Channel Assessment) est utilisée aussi bien pour scanner le canal pendant la veille, que pour l'écoute du canal avant transmission du signal (LBT). Or pour modéliser KNX-RF, il est nécessaire de dissocier ces deux types de CCA car, d'une part, ils n'ont pas la même durée, et d'autre part, ils subissent des séquencements de changement de fréquences différents selon le type du produit (Fast, Slow, etc). Par ailleurs, ce modèle implémente un acquittement de trame. Cependant, il ne supporte que du broadcast et de l'unicast. Il faudrait donc implémenter de l'multicast dans le modèle de simulation KNX-RF.

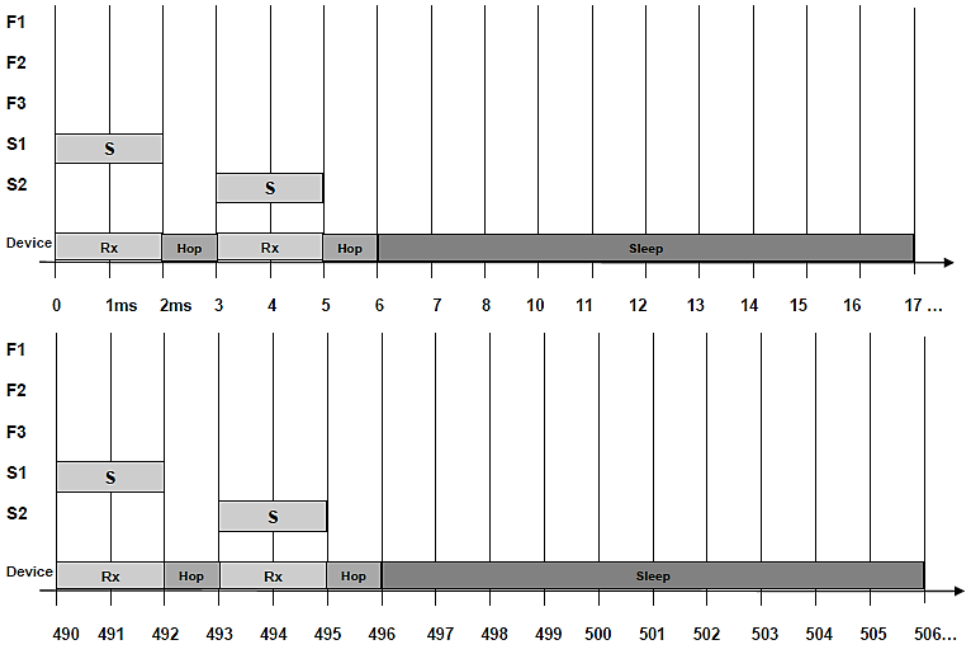
V.4.2. Description du module MAC_KNX_RF implémenté

Le module MAC_KNX_RF est dérivé du module B-MAC. C'est ici que débit est fixé, à 32,768 chip/s pour les nœuds Fast et 16,384 chip/s pour les nœuds Slow. La puissance d'émission est quant à elle fixée à 100mW (+8 dBm). Comme expliqué dans le Chapitre II, KNX-RF change de fréquence en transmission dans le cas où la trame n'aboutit pas à son destinataire, et en réception quand le produit est en mode stand-by. Pour modéliser les changements de fréquence une fonction appelée **void switchChannel(int channel)** est utilisée. Une table des fréquences utilisées est rajouté au module « Utility » dans un fichier appelé constantes_KNX_RF.h. Elle reprend les séquencements de changement de fréquence qui sont spécifiés dans la norme KNX-RF-Multi.

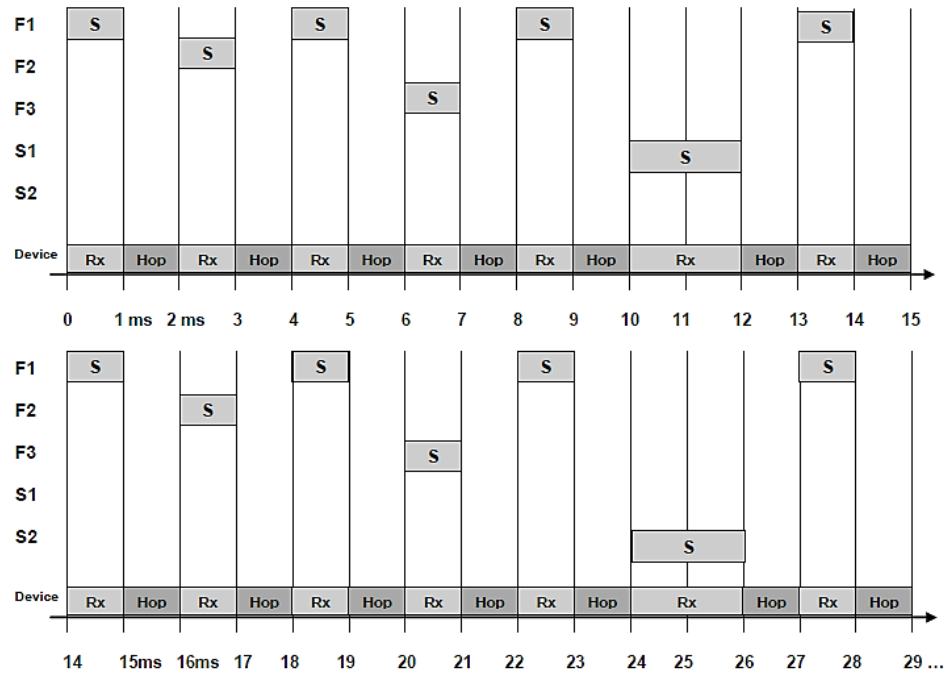
BY-NC-ND



a) Scanne des fréquences Fast



b) Scanne des fréquences Slow



c) Scanne mixte des fréquences Fast et Slow

Figure V-8 : Le séquencement de changement de fréquence pendant la période de stand-by dans KNX-RF

BY-NC-ND

Pendant la période de scanne (réception), les séquencements de scanne pour Fast et pour Slow sont illustrés Figure V-8 (a-b) et sont appelés **SCAN_Channels** dans notre modèle. Comme le modèle simulé contient un produit mixte Fast/Slow capable de traiter aussi bien du Fast que du Slow, ses séquencements sont également implémentés et correspondent à la Figure V-8 (c) et sont appelés **TX_Channels** dans notre modèle. Dans ce qui suit, on notera **CCA_SCAN** l'écoute des canaux pendant la phase de veille du produit. MAC_KNX_RF implémente également un LBT fixé à 5ms pour tous les types de produits. L'écoute des canaux avant transmission est quant à elle noté **CCA_LBT**.

En cas d'échec de transmission, le changement de fréquence se fait comme suit :

Pour le mode Fast, la transmission se fait d'abord sur le canal d'appel F1, et les retransmissions sur F2, F3 puis re F1. Pour le mode Slow la transmission se fait d'abord sur le canal d'appel S1, et les retransmissions sur S2 puis re S1.

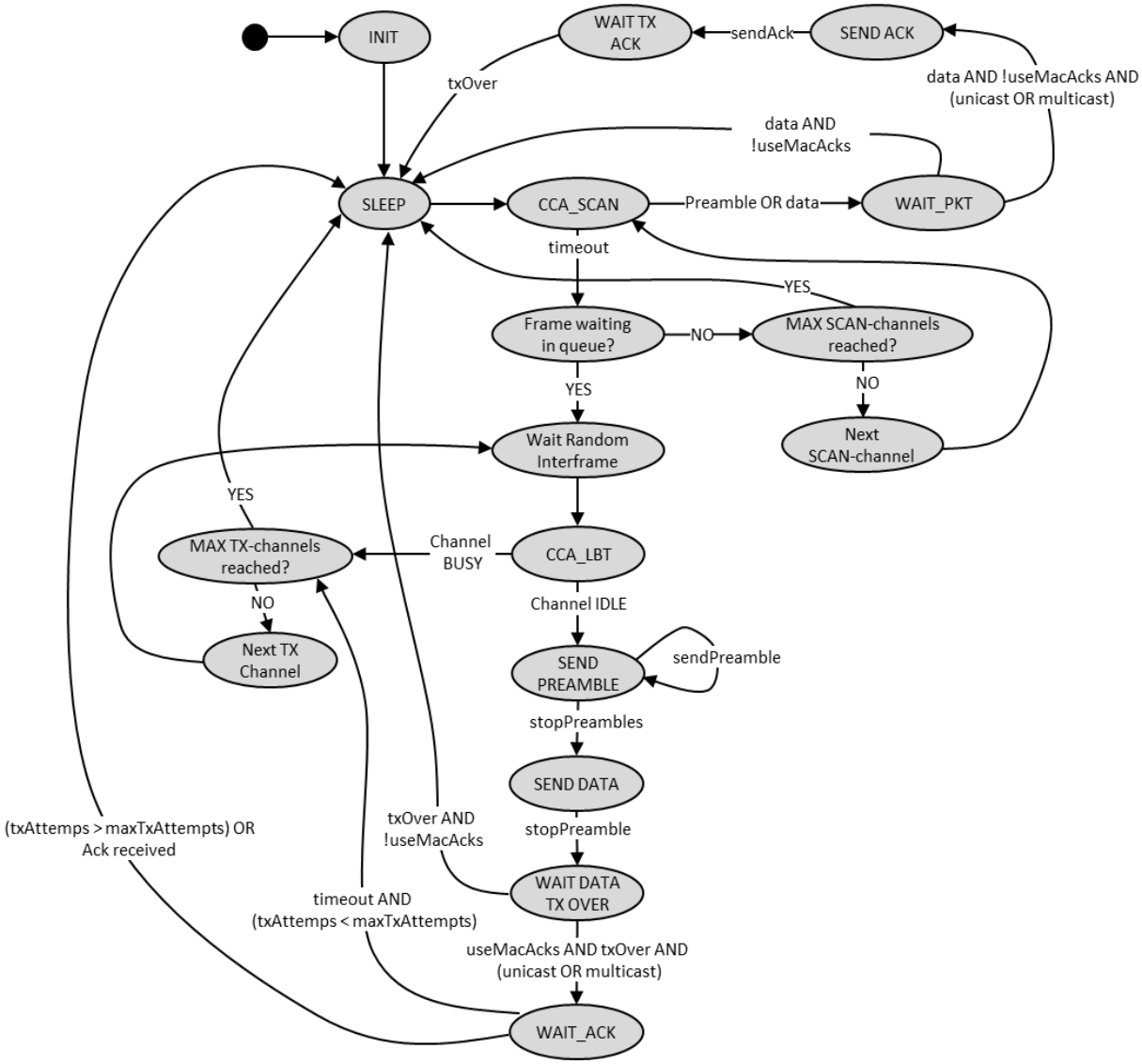


Figure V-9 : Machine à états de la couche MAC_KNX_RF implémenté sur MiXiM

BY-NC-ND

V.5. La topologie étoile

Pour modéliser un réseau connecté en étoile, des modifications ont été apportées au module BaseConnectionManager qui a par défaut une topologie maillée. Rappelons que ce module a pour tâche d'établir et de mettre à jour les connexions entre les nœuds qui se trouvent dans la distance maximale d'interférence les uns des autres. Pour KNX-RF, un nœud central est choisi et l'identifiant de son entité NIC est relevé. Les connections sont ensuite réalisées grâce, entre autres, à la fonction **isInRange(nic_central, nic_peripheral).** La Figure V-10 illustre le réseau KNX-RF en étoile ou les cercles représentent la DMI des différents nœuds.

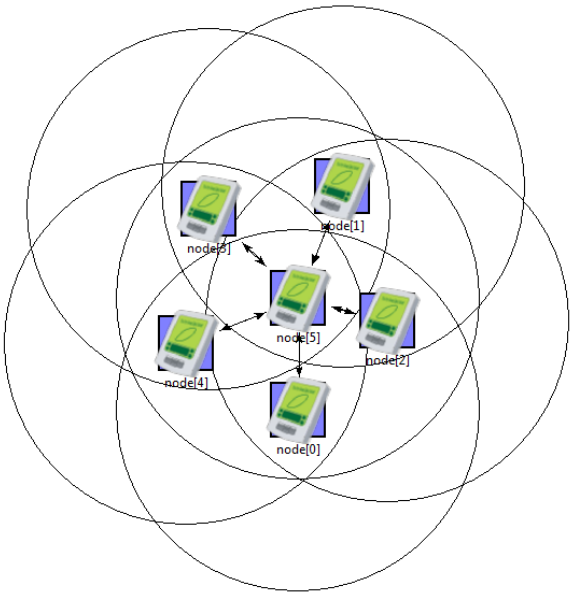


Figure V-10 : Illustration du modèle KNX-RF dans l'interface graphique Tkenv de MiXiM

V.6. Résultats de simulation d'un scénario de collision de trames KNX-RF

Un scénario de collision entre les trames Fast et les trames Slow a été simulé en utilisant le modèle développé sur OMNet++/MiXiM. Le modèle est constitué de trois types de nœuds : des nœuds périphériques Fast qui représente des produits de type bouton poussoirs ou thermostats, des nœuds périphériques Slow comme par exemple des vannes de chauffage radio et un nœud central qui est capable de traiter aussi bien du Fast que du Slow. C'est au niveau de ce dernier nœud que les collisions peuvent se produire. Ce genre de produits Fast/Slow n'existent pas aujourd'hui sur le marché et correspondrait par exemple à un coupleur de média radio Fast et Slow. Cela permettrait d'avoir un seul produit multi-profils au lieu d'en avoir deux de profil différents.

Pendant la simulation, le produit Fast/Slow initie une transmission d'une trame Slow de 524 ms vers le produit Slow. Alors même que cette transmission est encore en cours, le produit Fast transmet à son tour une trame vers le produit Fast/Slow, des collisions de trames se produisent alors. Ceci est illustré dans la Figure V-11.

BY-NC-ND

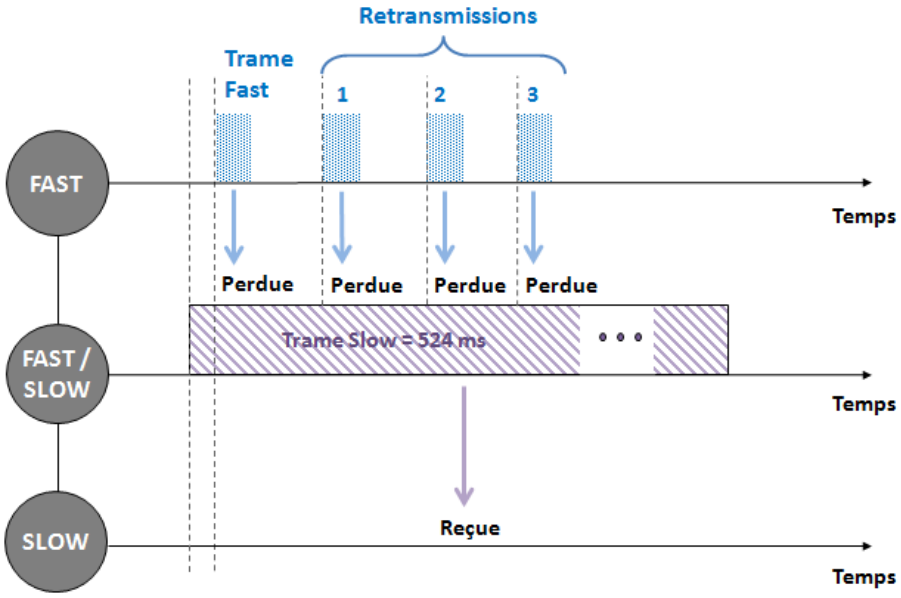


Figure V-11 : Scénario de collision de trames Fast et Slow

Les résultats de simulation MiXiM pour ce scénario sont présentés dans la Figure V-12. Les résultats montrent que le produit Fast a transmis 3 trames sans recevoir d'acquittement. Par ailleurs, notons que d'après ces résultats le nombre de trames transmises par le produit Fast est seulement de 3 et non pas 4 comme schématisé sur la Figure V 11. Ceci s'explique par le fait la 2ème retransmission en Fast se fait sur le canal F3. Quand le produit Fast fait un LBT sur ce canal avant de retransmettre la trame, il en déduit que le canal est occupé car la trame Slow en cours d'émission utilise le canal d'appel S1, qui se trouve avoir la même fréquence que F3, c'est-à-dire 869.85 MHz. Concernant la trame Slow transmise le produit Fast/Slow, on constate qu'elle a bien été reçue et acquitté par son récepteur Slow car les interférences Fast se produisant pendant la réception du préambule, le récepteur demeure en mode actif et les données utiles ne sont pas altérer.

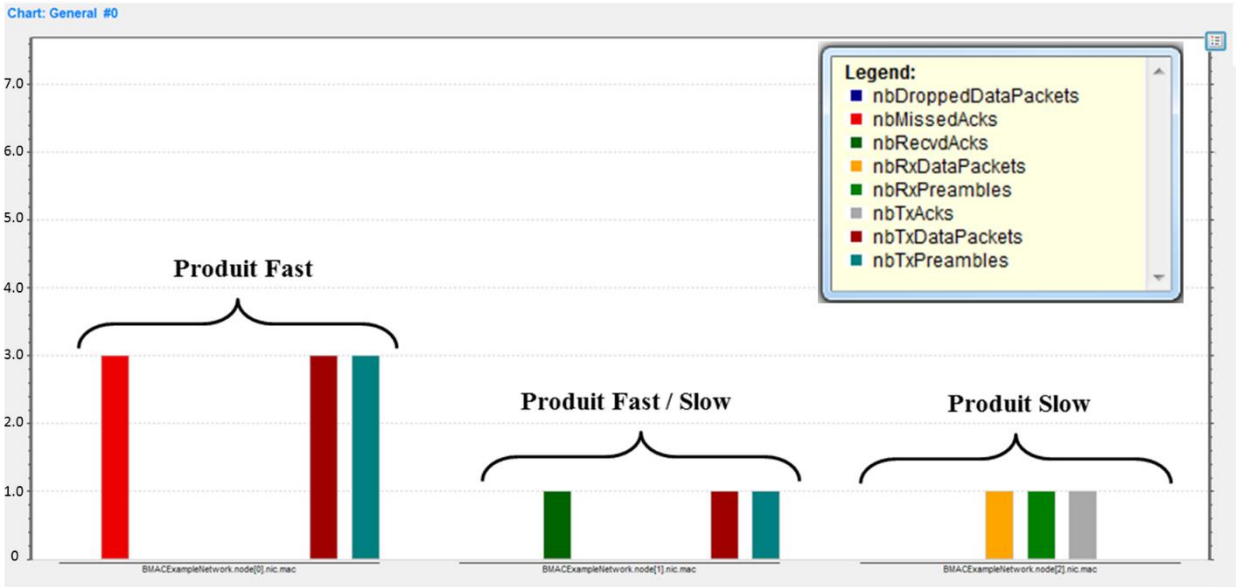


Figure V-12 : Résultats de simulation d'une collision de trames KNX-RF Fast et Slow

BY-NC-ND

V.7. Proposition d'amélioration et validation par le modèle MiXiM

Une façon d'améliorer KNX-RF en cas de collision de trames Fast et Slow serait de retarder la dernière retransmission Fast de 500 ms, comme illustré sur la Figure V-13. Ainsi, cette dernière trame sera envoyée quand la transmission Slow serait finit.

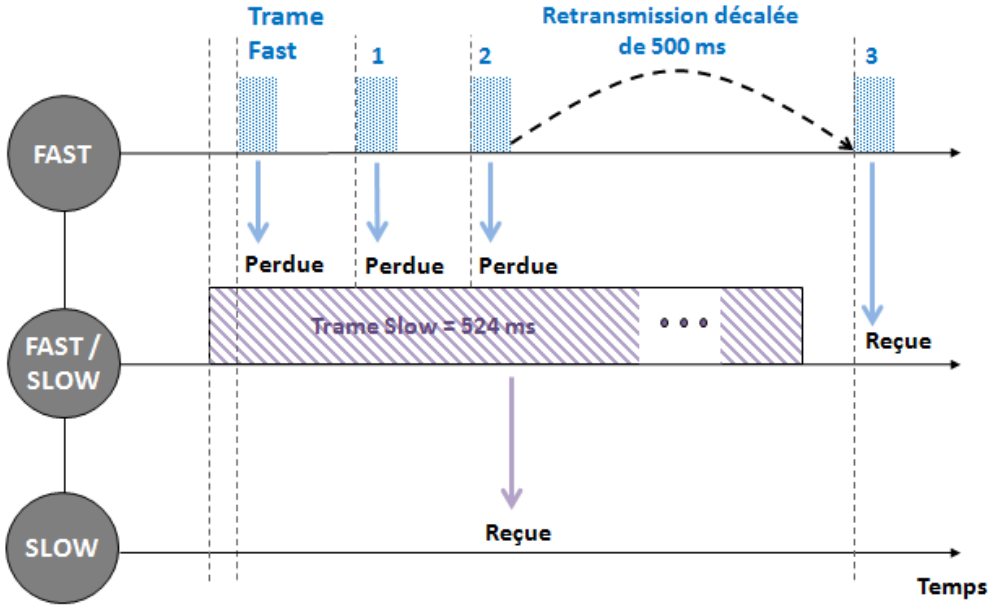


Figure V-13 : Le décalage temporel proposé en cas d'auto-interférence KNX-RF

L'implémentation de ce décalage temporel a été réalisée sur le modèle MiXiM. Les résultats de simulation Figure V-14 montrent qu'au niveau du produit Fast, 3 transmissions ont été faites, 2 transmissions ont échouées et un acquittement a été reçu au bout de la troisième retransmission.

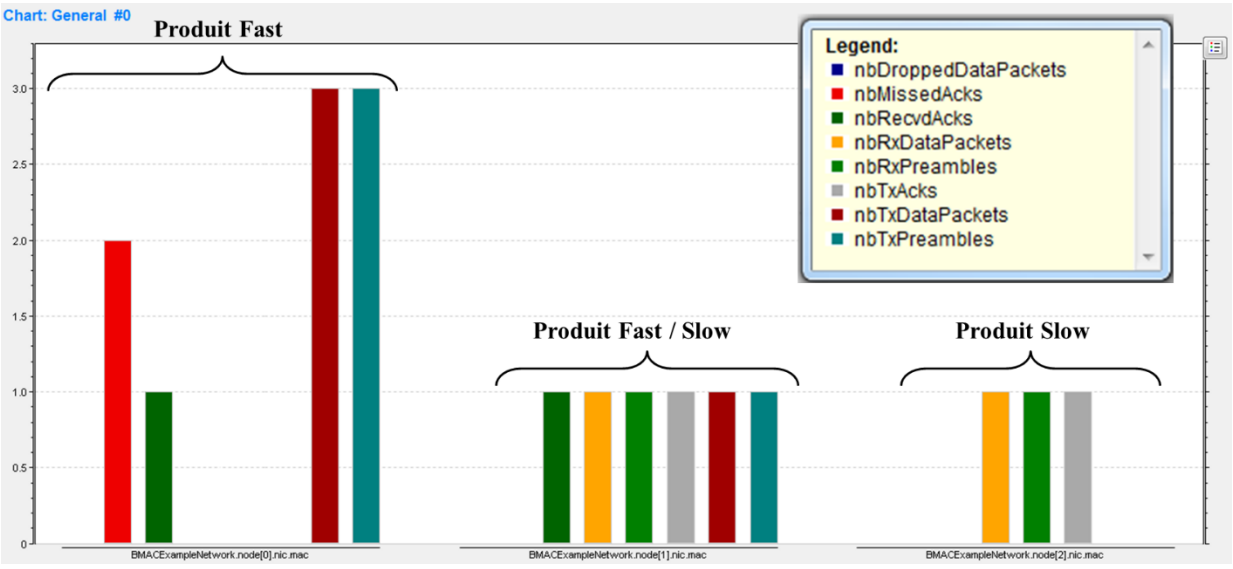


Figure V-14 : Résultat de simulation de la solution proposée sur le modèle

BY-NC-ND

V.8. Les propriétés potentiellement améliorables en KNX-RF

Bien que KNX-RF présente plusieurs bonnes caractéristiques adaptées aux applications de la domotique, certaines de ses caractéristiques peuvent être améliorées. Dans cette partie, les faiblesses constatées à travers les simulations et l'analyse globale du protocole KNX-RF vont être énumérées et des propositions d'amélioration seront faites afin d'augmenter la fiabilité des communications radio, mais aussi d'enrichir ce protocole avec de nouvelles fonctionnalités qui permettraient d'obtenir plus d'applications pour KNX-RF.

V.8.1. Les mécanismes de robustesse

Les mécanismes qui sont aujourd'hui implémenté dans KNX-RF pourraient être améliorés pour accroitre la fiabilité du système. Quelques pistes de recherche sont envisageables.

V.8.1.1. Mécanisme d'écoute de canal

Comme l'ont montré les simulations réalisées sur KNX-RF, le mécanisme d'écoute de canal LBT n'est pas suffisant pour éviter les collisions de trames dans un scénario ou au moins deux modules ne s'écoutent pas mutuellement (section V.6). Pour y remédier, il est intéressant de vérifier si un autre mécanisme comme le CSMA/CA avec réservation de canal (RTS-CTS) implémenté dans ZigBee serait en mesure d'améliorer la fiabilité du système. Le premier inconvénient qu'on pourrait relever de la méthode d'accès CSMA/CA avec RTS-CTS est qu'il ne serait pas judicieux de l'implémenter pour des systèmes utilisant des trames de courtes durées. De plus, bien que les trames de RTS et CTS supplémentaires soient courtes, elles introduiraient néanmoins de la latence supplémentaire au système, ce qui pourrait être inacceptable pour certaines applications. Plus important encore, cette technique semble plus adaptée pour les systèmes unicast ; or KNX-RF est principalement basé sur du multicast de données (e.g. fermeture des volets ou allumage des lampes en même temps). En effet, en multicast, les trames CTS qui seraient transmises par un groupe de produits en réponse à un RTS reçu en multicast, pourraient, elles aussi, subir des collisions. Ce problème a déjà été investigué dans les travaux de Kuri et al. [126] et des solutions ont été proposés.

Pour résumé, la technique du CSMA/CA avec RTS-CTS doit être transposée sur KNX-RF et son intérêt exploré par des simulations à l'aide d'outils comme OMNet++ ou NS2.

V.8.1.2. Délais d'accès au média et retransmissions

Avant de transmettre ou de retransmettre une trame, le protocole KNX-RF utilise une politique d'accès dynamique à allocation aléatoire (CSMA non-persistant) mais sur un intervalle de temps statique, c'est-à-dire qu'il tire une durée aléatoire sur un intervalle de temps [Tmin, Tmax] invariant. Les simulations réalisées ont montré que ce délai bien qu'aléatoire n'est parfois pas suffisant, car même après plusieurs retransmissions de la trame, celle-ci n'aboutit toujours pas à cause des collisions. Il serait donc intéressant d'implémenter un délai d'accès au média qui s'incrémente après

BY-NC-ND

chaque collision de façon linéaire (après K tentatives, $T_{max} = T_{init} + K*$incrément) ou de façon exponentiel ($T_{max} = 2^K$). Cependant, il faut veiller à ne pas dépasser les latences tolérer par les applications.

V.8.1.3. Agilité en fréquence adaptative et retransmissions

Quand les trames sont retransmises en KNX-RF, de nouvelles fréquences dans la bande 868 MHz sont utilisées. Le nombre de fréquence est limité à 3 en Fast et 2 en Slow et le nombre maximum de retransmissions dans les deux cas est limité à trois. Par conséquent, il serait intéressant de savoir si une augmentation du nombre maximum de retransmission de trames permettrait d'améliorer la fiabilité de KNX-RF.

Par ailleurs, prévoir de nouvelles fréquences pour les sauts de fréquences permettrait au système d'avoir plus de possibilités pour contourner les interférences. Dans la bande ISM, les quatre sous-bandes de 868 MHz à 870 MHz sont déjà utilisées par KNX-RF. Une méthode pour augmenter le nombre de fréquences utilisables est d'exploiter toute la bande 863-870 MHz en utilisant une technique de modulation à étalement de spectre. La technique du FHSS pourrait être utilisée tout en évitant les fréquences réservées à d'autres applications comme les alarmes et les communications audio. La norme ETSI 300-220 dédiée aux applications sub-GHz prévoit cette usage. Elle spécifie pour cela une puissance maximum de +14 dBm, un dwell time de 400 ms maximum et l'utilisation soit d'un LBT soit d'un duty-cycle inférieur à 0,1% pour chaque canal. En revanche, ce qui est contraignant, c'est que l'ETSI exige de faire une segmentation de la bande de 7 MHz de façon à obtenir 47 canaux minimum pour des canaux ayant une bande supérieure à 100 kHz. Cela nécessiterait donc d'utiliser de plus petites bandes pour les canaux KNX-RF (dont la bande varie aujourd'hui entre 250 kHz et 600 kHz) ; et pour cela il faudrait augmenter le débit de transmission. En outre, mettre en œuvre un FHSS qui fait du saut de fréquences adaptatif - qui consiste à mettre les canaux les plus perturbés dans une liste noire et de les réessayer plus tard - serait une solution plus efficace contre les interférences.

Par ailleurs, la norme ETSI 300-220 prévoit également l'utilisation d'autres techniques d'étalement de spectre comme le DSSS. Pour ces techniques, il faut utiliser soit une combinaison de LBT et d'agilité adaptative en fréquence (AFA) soit un duty cycle. Les détails sur les largeurs de bande préconisées, les puissances d'émission et les valeurs de duty-cycle sont détaillés dans Tableau V-1.

Tableau V-1 : Caractéristiques de la bande 863 – 870 MHz préconisées par La norme ETSI 300 220

Sous-bande	Bande maximum occupée	Puissance maximum E.R.P (dB)	Duty Cycle
De 863 MHz à 870 MHz	7 MHz	-4,5 dBm / 100 kHz	0,1 %

BY-NC-ND

Les techniques d'étalement de spectre que ce soit le FHSS ou le DSSS ont l'inconvénient d'être énergivores et nécessiteraient un développement hardware et software plus complexes que ce qui a été fait jusqu'à ce jour pour KNX-RF. Néanmoins, ces pistes présentent un intérêt non-négligeable et doivent être sujets à une recherche plus approfondie.

Une autre méthode pour disposer de plus de fréquences serait de prévoir des retransmissions sur de nouvelles bandes de fréquences, en plus de la bande 868 MHz.

La première solution en ce sens, serait de faire du bi-bande 868 MHz/433 MHz. Les deux bandes disponibles en 433 MHz font 990 kHz et 750 kHz chacune et la puissance d'émission (PIRE) est limitée à +10 dBm avec un duty cycle de 10%. Les caractéristiques de ces bandes sont donc adaptées pour des communications en KNX-RF. D'autant plus, que la portée est plus élevée en 433 MHz. Concrètement, si l'on prend l'exemple d'un récepteur en mode FAST, un nouveau séquencement des sauts de fréquences serait le suivant : F1→F2→F1 →F3→F1→ 1ère fréquence en 433 MHz→ F1 puis 2éme fréquence en 434 MHz. Le changement de bande nécessiterait quelques millisecondes de plus pour le synthétiseur, mais cela dépend des performances du chip radio.

La deuxième solution serait de faire du bi-bandes 868 MHz/2,4 GHz. Cette dernière bande étant beaucoup plus large (83,6 MHz), cela serait très énergivore que d'exploiter toutes ses fréquences. Une idée serait de faire un premier scanne de toute la bande 2,4 GHz au lancement du réseau pour identifier les deux canaux les moins perturbés, puis les utiliser les pour les sauts de fréquences 868 MHz/ 2,4 GHz. Un exemple de séquencement de ces sauts dans le cas d'un récepteur FAST serait : F1→F2→F1 →F3→F1→ 1ère fréquence en 2,4 GHz → F1 puis 2éme fréquence en 2,4 GHz. Idem, le changement de bande nécessiterait quelques millisecondes de plus pour le synthétiseur, mais cela dépend des performances du chip radio.

V.8.1.4. La correction d'erreur

Dans le protocole KNX-RF, seule la détection d'erreur est possible à travers des blocs de CRCs. Pour un système plus fiable, un algorithme de correction d'erreur (code en bloc ou code convolutif) pourrait être implémenté. Cependant, l'amélioration des performances se fera au détriment de la consommation d'énergie, de la latence et de l'espace mémoire occupé. Des codes de correction suffisamment simples et rapides doivent ainsi être privilégiés.

Dans les travaux [127], les codes en blocs BCH et Reed Solomon, ainsi que les codes convolutifs sont comparés pour différents taux de codage. L'étude montre que les codes BCH sont les moins complexes et les moins énergivores. Elle montre aussi que pour un BER supérieur à 10-2, le code BCH est meilleur que le code RS, alors que pour BER inférieur à 10-2 les codes RS sont meilleurs. Le code BCH est donc plus adaptés pour KNX-RF car le BER maximum toléré peut aller jusqu'à 10-4.

BY-NC-ND

Dans d'autres travaux [128], une comparaison est réalisée entre l'ARQ (avec différents nombres maximum de retransmissions), le code BCH et le code RS et une autre technique de correction d'erreur appelé Hybrid-ARQ en termes de latence et de consommation d'énergie par rapport à la capacité de correction d'erreur. La technique de l'Hybrid-ARQ consiste à combiner le mécanisme d'ARQ avec un code de correction d'erreur ; ce qui pourrait être intéressant pour KNX étant donné qu'il utilise déjà un mécanisme d'ARQ. Il existe deux types de HARQ : le type I et le type II [129]. Les deux sont simulés avec comme code de correction d'erreur le code BCH grâce à ses avantages. Il ressort de cette étude que l'HARQ type II est la technique qui consomme le moins d'énergie et qui engendre le moins de latence. Il serait donc intéressant d'explorer ce type de code pour KNX-RF en réalisant des simulations sur MATLAB ; d'autant plus que cela permettrait d'augmenter un peu plus la portée de KNX.

V.8.1.5. Changement de topologie réseau

Changer la topologie étoile de KNX-RF en une topologie maillée tout en gardant la même bande de fréquences 868 MHz pourrait être utile. En effet, aujourd'hui seuls des produits KNX-RF dédiés exclusivement à faire de la répétition sont vendus sur le marché. L'idée est de faire en sorte que les produits radio puissent relayer eux même les trames en cas de limite de portée. Pour cela, on pourrait imaginer un réseau ou seuls certains produits, notamment ceux alimentés sur secteur, sont configurés pour router l'information en plus de leur tâche principale (éclairer, chauffer, etc.). Pour ce faire, un algorithme de routage / codage réseau sera nécessaire. En revanche, cela introduira une latence supplémentaire et une occupation plus importante de la mémoire.

V.8.2. Sécurité des données

Cette partie est déjà en court de développement par Hager Controls. Elle consiste à implémenter l'algorithme de cryptographie AES-128 pour l'authentification et la confidentialité des données véhiculées en KNX-RF. Comme cet algorithme nécessite une clé de 128 bits pour chaque 128 bits de données, les trames deviennent alors plus longues et la latence augmente. La longueur supplémentaire des trames induirait à une augmentation de la probabilité de collision. Une solution pour limiter ce problème et de n'implémenter l'algorithme de sécurité que sur certains produits les plus sensibles de l'installation domotique comme par exemple ceux gérant les accès (volets, portail, etc.).

V.8.3. Nouvelles applications potentielles pour KNX-RF

V.8.4. Le débit

La première caractéristique potentiellement améliorable et qui pourrait aboutir à de nouvelles applications pour KNX-RF est le débit. Certes, celui-ci est adapté pour les transmissions de faible quantité d'information, mais il serait intéressant d'avoir une version haut débit pour ce protocole. Cela permettrait, par exemple, d'effectuer des mis à jour par liaison radio au lieu de les faire en dur sur les

BY-NC-ND

produits et d'avoir de nouvelles applications multimédia. Par ailleurs, on pourrait imaginer une activation temporaire d'un mode KNX-RF haut débit qui répondrait à un besoin ponctuel de l'utilisateur. Le changement de débit peut se faire de plusieurs manières :

V.8.4.1. Augmentation du nombre de bit par symbole de la FSK

En effet, selon la formule de Nyquist : $Dt = 2B \log_2 (M)$ tel Dt est le débit transmis et $M=2^N$ le nombre de symboles dans la constellation, pour une largeur de bande passante fixe, le débit augmente avec le nombre de symboles (ou encore le nombre de bit par symbole) de la modulation utilisée. Si l'on veut donc augmenter le débit en gardant la même bande que celle utilisée en 2-FSK, il faut implémenter du 4-FSK, 8-FSK ou 16-FSK. Cependant, ces modulations impliquent une réduction de la déviation en fréquence qui se traduit par une perte de sensibilité en réception (portée plus faible). Il est donc important que le récepteur soit très stable et qu'il y est une faible déviation en fréquence entre l'émission et la réception. En outre, ces modulations M-aires pourraient impliquer plus de consommation d'énergie à cause de l'énergie supplémentaires nécessaires pour le synthétiseur de fréquence (PLL).

V.8.4.2. Changement du type de modulation

Il s'agit de changer la modulation en fréquence par une autre méthode de modulation en amplitude, en phase ou les deux combinés, tout en ayant un nombre de symboles M supérieur à deux. Contrairement à la FSK, ce sont des techniques de modulation linéaires car l'enveloppe du signal modulé n'est pas constante dans le temps et peuvent nécessiter l'utilisation d'amplificateurs linéaires. Cependant, elles ont une efficacité spectrale plus importante par rapport à la FSK. En outre, comme pour la FSK, les modulations M-aires ASK/PSK vont également impliquer une perte de sensibilité au niveau du récepteur. Par exemple pour une modulation d'amplitude avec M>2, les niveaux d'amplitudes vont se rapprocher et, en présence de bruit, la probabilité d'erreur va augmenter. De plus, les modulations d'amplitude sont plus sensibles aux interférences mais aussi au fading causé par les propagations par trajet multiples. Pour la modulation en phase, elle est plus robuste que la modulation en fréquence (en termes de BER pour un SNR donné), mais elle est plus compliquée à mettre en œuvre au niveau du récepteur car elle nécessite une détection cohérente (synchrone) du signal et impliquerait une consommation d'énergie plus importante en réception.

V.8.4.3. Changement de bande fréquences à 2,4 GHz

Les bandes passantes étant limitées dans les fréquences Sub-GHz, notamment les sous-bande 868 MHz, il serait intéressant de prévoir une version de KNX-RF fonctionnant dans la bande 2,4 GHz qui offre une bande passante beaucoup plus large permettant de monter en débit. Un module bi-bande 868 MHz/ 2,4 GHz est déjà en court de développement chez Hager Controls, mais le 2,4 GHz sera dédié à une autre technologie radio différente de KNX-RF. Néanmoins, ce module pourrait être utile pour tester une telle solution. Par ailleurs, le passage à une telle bande de fréquences présente certains

BY-NC-ND

challenges. La portée réduite caractéristique de la bande 2,4 GHz serait très contraignante pour les systèmes domotique et nécessiterait de remplacer une topologie en étoile par une topologie maillée à l'instar de ce qui est fait dans la technologie ZigBee. Cela impliquerait donc une complexité accrue en termes de développement software pour gérer tout ce qui relève du codage réseau (e.g. adaptation du chemin de routage) et une consommation d'énergie accrue pour les modules radio par rapport aux modules actuels. En outre, la bande 2,4 GHz est déjà occupé par plusieurs technologies très populaires comme le Wi-Fi, Bluetooth et ZigBee. Mettre en œuvre une version 2,4 GHz de KNX-RF nécessiterait d'imaginer de nouveaux mécanismes de robustesse pour éviter les interférences et coexister convenablement avec les autres protocoles radio.

V.8.5. KNX-RF en mode Energy Harvesting

Pour enrichir l'offre de produit avec des systèmes qui fonctionnent sans piles, il serait intéressant de se pencher sur la possibilité de créer un mode KNX-RF d'Energy Harvesting en s'appuyant sur les principes fondamentaux des technologies d'energy harvesting existantes (e.g. EnOcean).

Les formes les plus courantes d'énergie qui peuvent être récoltées par un capteur sans fil sont cinétique, solaire ou thermique. La quantité d'énergie récoltée grâce aux technologies d'energy harvesting est relativement petite, typiquement de l'ordre du microampère. La conception d'un système optimisé en termes de consommation d'énergie est donc essentielle pour permettre aux capteurs de fonctionner correctement.

Trois fonctions principales définissent le budget énergétique d'un capteur sans fil : la mesure (température, humidité, etc), la transmission radio de données et la phase de veille. Il faut donc concevoir un système où l'énergie récoltée est répartie équitablement entre ces fonctions en tenant compte des exigences de chacune.

Cette répartition peut être réalisée de deux manières : soit les fonctionnalités du système sont fixées (et donc la puissance nécessaire pour les réaliser) et la technologie utilisée est dimensionnée pour fournir la quantité d'énergie nécessaire, soit la puissance fournit par la technologie utilisé est fixée et les fonctionnalités du système doivent alors être optimisées. Le deuxième scénario est le plus commun.

Pour illustrer ces exigences et pouvoir définir un système d'energy harvesting pour KNX-RF, considérons le cas d'un module intégrant une technologie basée sur une cellule solaire photovoltaïque. Ses principales tâches consistent à mesurer la température et/ou l'humidité dans une pièce et de les comparer avec les consignes définis par l'utilisateur.

La quantité d'énergie fournit par la cellule est limitée par sa taille et le niveau d'éclairement minimal attendu. Pour notre étude, la taille assumée est de 5 cm² et l'éclairement est de 200 LUX

BY-NC-ND

(niveau de lumière ambiante typique dans une pièce de vie) pendant six heures (moyenne d'heures d'ensoleillement en France). La densité de puissance équivalente à 200 LUX est d'environ 29 µW/cm² pour une longueur d'onde de 550 nm. Cependant, la densité de puissance typique produite par les cellules solaires standards disponibles dans le marché n'est que de 5 µW/cm² dans un environnement indoor [130]-[131].

Cela signifie que pour une taille de 5 cm², la cellule produit 50 µW, et ce pendant 6 heures. Par souci de simplicité, nous considérons que la tension d'alimentation est de 3 volts. Le calcul du courant moyen nous indique alors que nous avons besoin de concevoir un système qui consommerait moins de 2 µA en courant moyen. Pour évaluer les exigences en puissance de chaque fonction, nous allons allouer l'énergie disponible de façon égalitaire en donnant environ 600 nA de courant à chaque fonction : mesure, transmission radio et phase de veille + perte de puissance (décharge).

Pour la mesure, l'échange de données entre le capteur et le processeur (via le bus I2C) et le traitement des données initiales d'un capteur optimisée de température ou d'humidité nécessiterait un courant moyen d'environ 1 mA pour une durée de 10 ms. On peut alors calculer le nombre maximal de mesures par jour en divisant l'énergie disponible par jour (600 nA x de 86400 s) par l'énergie requise par la mesure (1 mA x 10 ms). Il en résulte que le capteur peut faire jusqu'à 5184 mesures par jour.

Etant donné que la température et l'humidité varient lentement dans le temps et qu'il faut conserver l'énergie, nous considérerons dans ce qui suit que le capteur fait une mesure toutes les 1 minutes ; ce qui donne un total de 1440 mesures par jours.

Considérons maintenant l'énergie liée à la transmission radio de données. Afin d'optimiser au maximum la consommation énergétique, tant le protocole radio que l'énergie dépensée en transmission doivent être optimisés. La charge utile associée à un capteur est souvent de petite taille (quelques octets). Par ailleurs, un protocole optimisé doit limiter les overheads de transmission (contrôle de trame, préambule, synchronisation, contrôle d'erreur) autant que possible, tout en maintenant une communication fiable.

Le contenu de la trame KNX-RF doit donc être optimisé pour avoir des trames plus courtes. Pour ce faire, la trame ne sera limitée qu'à deux blocs maximum au lieu des quatre prévus par la norme. Le préambule et le postambule doivent être supprimés. De plus, pour réduire la consommation d'énergie et optimiser la bande passante, l'encodage Manchester ne sera plus appliqué sur les données. Les bits de violation Manchester seront donc aussi supprimés. Ainsi, la trame complète sera composée de 22 octets intégrant une payload de 1 octet (Figure V-15).

BY-NC-ND

Sync word	L-field Length	C-field Control	ESC	CTRL	Serial number	FCS CRC 16
8 b	8 b	8 b	8 b	8 b	48 b	16 b
Sync	PHY	MAC				

a) Structure du premier bloc

CI-Field Control information	Source address	Destination address	L/NPCI	TPCI	APCI	Frame Payload	FCS CRC 16
8 b	16 b	16 b	8 b	8 b	8 b	8 b	16 b
MAC							MAC

b) Structure du deuxième bloc

Figure V-15 : Structure optimisée d'une trame KNX-RF pour des applications d'Energy Harvesting

Dans ce qui suit nous allons déterminer le débit nécessaire pour transmettre une telle trame tout en respectant l'exigence en consommation d'énergie pour la fonction de transmission. Le transceiver SEMTECH utilisé dans les modules KNX-RF consomme 30 mA en émission. En tenant compte du budget énergétique disponible sur une journée (600 nA x de 86400 s), ainsi que le courant nécessaire à l'émission, on peut calculer la durée totale de transmission possible par jour, qui est égale à 1,728 ms par jour. En faisant le lien avec le nombre de mesures possibles par jour, nous pouvons calculer le nombre total d'octets qui peuvent transiter par jour : 31680 octets. De là on peut déduire le débit nécessaire pour que le protocole KNX-RF soit adapté à faire de l'energy harvesting et qui est égale à environ 147 kbit/s.

Concernant la robustesse radio, la trame KNX-RF de 22 octets aurait une durée totale de 1,2 ms. La probabilité de collision avec d'autres trames serait par conséquent réduite. Par ailleurs, une stratégie de transmission intelligente est nécessaire pour fiabiliser les communications radio dans un tel system faible en énergie. Pour ce faire, une trame radio ne sera transmise qu'en cas de changement significatif de la valeur analogique mesurée comparée à la dernière mesure. Cela permettrait d'utiliser l'énergie pour retransmettre la même trame un certain nombre de fois (à définir par simulation/ test et calculs de probabilité de collisions) pour augmenter la fiabilité du système.

Par ailleurs, une modulation spectralement efficace et simple doit être choisie. La 2-FSK étant moins efficace que le 2-ASK et la 2-PSK en terme de largeur de bande, et la PSK étant plus compliqué à décodé, c'est la modulation 2-ASK qui semble la plus adaptée.

Concernant la fréquence d'opération, la fréquence 868,85 MHz (qui correspond au canal Fast F2) semble un choix judicieux pour éviter les interférences, d'un côté, avec les systèmes EnOcean dont la fréquence est 868,3 MHz, et de l'autre, avec les autres systèmes KNX-RF Fast qui ont tous pour canal d'appel 868,3 MHz (F1). En revanche, l'écoute de canal n'étant pas possible dans un tel mode, le duty cycle sur la fréquence 868,85 MHz sera limité à 0,1%. Par ailleurs, sur la fréquence 868,3 MHz, KNX-RF dispose d'une largeur de bande maximum de 500 kHz. En reprenant le débit de 147 kbit/s et en considérant une modulation 2-ASK, la largeur de bande maximum nécessaire serait de 294 kHz. La bande choisie est donc largement suffisante pour ce nouveau mode.

BY-NC-ND

Au niveau du récepteur, un scanne des trames KNX-RF en mode Energy Harvesting doit également être prévu. Les différences entre ce scanne et le scanne de la fréquence FAST F2 sont, entre autres, le débit, l'absence de préambule et la durée plus courte du scanne.

Pour la dernière fonction qui regroupe la phase de veille et la décharge, 600 nA sont alloués. Les capteurs d'energy harvesting doivent être en mode veille pendant 99,99 % du temps. Il est donc absolument essentiel que la consommation dans cette phase soit ultra basse. Le budget total de 600 nA doit couvrir la consommation du processeur en mode veille (incluant les phases de réveils cycliques), ainsi que les pertes dues aux fuites dans l'accumulateur d'énergie. Un tel niveau de faible consommation d'énergie est difficile à atteindre, même avec les derniers processeurs, et est probablement le plus grand défi de conception. Personnalisé conceptions à signaux mixtes et l'architecture de système optimisé sont nécessaires pour relever ces défis.

Un tel niveau de faible consommation d'énergie est difficile à atteindre, même avec les processeurs les plus récents, et c'est probablement là le plus grand défi de conception. Par conséquent, une conception customisée du circuit intégré à signaux mixtes (analogique et numérique) ainsi qu'une architecture optimisée de système sont nécessaires pour relever ces défis.

V.8.6. KNX-RF en mode Long Range

La faculté de certaines technologies à avoir des portées de l'ordre de plusieurs kilomètres et défiant toute concurrence repose principalement sur des techniques des modulations plus performantes. L'Ultra Narrow Band (UNB) et le Chip Spread Spectrum (CSS) utilisés respectivement dans SigFox et LoRa en sont quelques exemples. Implémenter de telles modulations en KNX-RF pour disposer d'un nouveau mode Long Range pour KNX-RF serait un vrai plus pour les systèmes nécessitant par exemple de la supervision à distance pour des besoins de sécurité ou de metering. Par ailleurs, pour mettre en œuvre un tel mode, un débit de l'ordre de 5 à 10 kbit/s est nécessaire.

V.9. Conclusion

Dans ce chapitre le modèle développé pour KNX-RF sous OMNET++/MiXiM est décrit. Il intègre tous les mécanismes aujourd'hui disponibles sur la version Multi de KNX. Le modèle serait utile pour simuler de nouveaux mécanismes et justifier leurs valeurs ajoutées sur nos systèmes. Un exemple de collision de trames a été simulé pour une première validation du modèle. Une idée d'amélioration pour cet exemple a également été simulée et s'avère concluante.

Par ailleurs, ce chapitre aborde de façon exhaustive les possibilités qui existent pour améliorer ce protocole (Tableau V-2) que ce soit au niveau de la couche physique, de la couche MAC ou de la couche applicative. Ces améliorations ont pour objectif, soit d'augmenter la fiabilité de KNX-RF, soit d'aboutir à de nouvelle applications.

BY-NC-ND

Tableau V-2 : Résumé des faiblesses et propriétés améliorables de KNX-RF et quelques propositions d'améliorations

Faiblesses ou propriétés à améliorer en KNX-RF	Améliorations possibles	Intérêts	Elaboration	Points de vigilances / Risques	Complexité
Listen Before Talk	Implémenté du CSMA/CA avec RTS/CTS	Diminuer les collisions de trames	Mécanisme d'écoute avec réservation de canal (Hand Shake mechanism)	Latence ↗ Utile surtout en cas de longues trames Collisions des trames CTS en multicast	++
Agilité en fréquence adaptative	Prévoir plus de fréquences	Augmenter la fiabilité du système	Sauts vers des fréquences de la bande 433 MHz	Module Bi-bande	+
			Sauts vers des fréquences de la bande 2,4 GHz	Module Bi-bande Portée ↘ Complexité Hardware ↗	++
			Technique d'étalement de spectre sur la toute la bande 863-870 MHz	Complexité Hardware et Software ↗ Débit ↘ Consommation d'énergie ↗	+++
			Changement de la bande 868 MHz à la bande 2,4 GHz	Portée ↘ Complexité Hardware ↗ Mécanismes anti-fading et anti-interférences avec Wi-Fi, ZigBee, Bluetooth (exemple : étalement de spectre)	++
Délais d'accès au média et retransmission	Augmenter le délai aléatoire d'accès au média avec le nombre de tentatives	Augmenter la fiabilité du système	Augmenter l'intertrame aléatoire avec les tentatives + Augmenter le nombre de retransmission	Le trafic plus élevé peut mener à une probabilité de collision de trame plus élevée Latence ↗	-
	Augmenter le nombre de retransmission				-
Topologie étoile	Topologie maillée	Porter encore plus loin en utilisant des produits déjà existants dans l'installation	Implémenter du routage / codage réseau dans les produits alimentés par secteur	Occupation de la mémoire ↗ Complexité software ↗	+++
Correction d'erreur	Implémenter un algorithme de FEC	Augmenter la fiabilité du système	Code convolutif (BCH, Reed solomon, etc), turbo code, etc.	Latence (temps de calcul) ↗ Consommation d'énergie ↗ Complexité Software ↗ Occupation de la mémoire ↗	+

BY-NC-ND

Faiblesses ou propriétés à améliorer en KNX-RF	Améliorations possibles	Intérêts	Elaboration	Points de vigilances et Risques	Complexité
Sécurité	Implémenter un algorithme de sécurité	Protection contre les interceptions du signal et les lectures non autorisées	Cryptage de donnée en AES-128	Latence ↗ (temps de calcul + trames plus longue) Consommation d'énergie ↗ Occupation de la mémoire ↗	++
Latence variable	Implémenter un wake-up variable pour les produits alimentés par pile	Adapter la consommation de chaque produit	Changer le wake-up	Compatibilité entre les produits	++
Faible débit	Prévoir une version KNX-RF haut débit	Pour des mises à jour de produits via média radio ou des applications multimédia	Augmentation du nombre de symbole M-FSK (M-aire>2)	Sensibilité diminuée (Portée ↘)	-
			Autre type modulation M-aire>2	Moins robuste Complexité Hardware ↗	+
			Changement de la bande 868 MHz à la bande 2,4 GHz car plus large	Module Bi-bande Portée ↘ Complexité Hardware ↗ Mécanismes anti-interférences avec Wi-Fi, ZigBee, Bluetooth, etc. (exemple : étalement de spectre)	++
Energy Harvesting	Prévoir une version KNX-RF en energy harvesting	Enrichir le système de produits radio sans piles	Implémenter des systèmes de récupération d'énergie (piezoéléctrique/ cellule photovoltaïque, etc.)	Nécessite des produits sur secteur	+
			Augmenter le débit pour diminuer la durée de trame (~ 1-2 ms)		-
			Optimiser le contenu de la trame		-
			Modulation plus simple et spectralement plus efficace		-
Long Range	Prévoir une version KNX-RF très longue portée	Répondre aux besoins de l'IoT	Choisir une modulation de type UNB ou CSS Diminuer le débit	Signal perdurable par d'autres technologies à proximité opérant dans la même bande	++

BY-NC-ND

Conclusion générale

L'évaluation des protocoles développés pour les réseaux RadioFréquences est indispensable avant de pouvoir les déployer, en particulier dans les environnements indoor. Cette évaluation est nécessaire à la fois pour vérifier que le protocole fonctionne correctement dans divers scénarios et de valider son architecture système, mais aussi et surtout pour mesurer ses performances, le comparer avec d'autres protocoles existants et l'améliorer avec de nouveaux mécanismes et fonctionnalités.

La simulation est couramment utilisée pour mesurer ces performances. Elle est nécessaire quand les tests expérimentaux sont trop couteux, l'étude théorique trop complexe ou pour valider des hypothèses ou de nouveaux concepts. Dans ces travaux, il s'agit d'étudier les interférences radio dans le canal de propagation indoor ; il s'agit donc d'étudier des phénomènes complexes qui sont typiquement évalués à l'aide de simulateur. Néanmoins, certains aspects peuvent être l'objet d'analyses théoriques approfondies.

Dans ce manuscrit, après une introduction du contexte de l'étude et un état des lieux du marché de la domotique, les directives des normes en vigueur et les paramètres qui ont un impact direct sur les interférences et le dimensionnement de tels réseaux ont été identifiés. Comme l'étude concerne le protocole KNX-RF (868-870 MHz), une comparaison a été réalisée entre ce protocole et les protocoles radio domotiques les plus utilisés actuellement par les industriels et les chercheurs. Un point d'attention particulier a été porté aux mécanismes de robustesse qui sont exploités par chacun de ces protocoles. Il ressort de cette étude comparative que KNX-RF se positionne très bien par rapport aux autres technologies, avec beaucoup plus d'applications possibles, une capacité à fournir un réseau radio entièrement alimenté par pile et une bonne portée radio.

Pour évaluer la robustesse radio de KNX-RF au niveau système, des modèles de simulation d'interférences ont été développés. Un modèle a été construit dans l'environnement MATLAB/Simulink qui permet de simuler la couche physique. Il permet notamment d'estimer à quelle distance il faut mettre des produits issus de divers protocoles les uns des autres sans qu'il y ait de dégradation dues aux interférences. Les simulations réalisées dans ces travaux, traitent en particulier les interférences dans une box domotique multi-profils, permettant l'interaction de produits sur secteur Fast et de produits sur piles Slow, et multi-protocoles, permettant l'intégration d'autres technologies radio. Dans notre cas d'étude, un protocole d'alarme propriétaire bi-bandes (869-434 MHz) est considéré. Néanmoins, la box peut être étendue à d'autres types de protocoles domotiques. Des tests expérimentaux en LOS et NLOS ont été réalisés en indoor dans une grande maison composée d'un étage et d'une cave et les résultats obtenus par simulation sont bien corrélés avec les mesures.

BY-NC-ND

Un autre modèle a été développé en utilisant le simulateur à évènement discret OMNet++ et son framework MiXiM. Cet outil permet de modéliser les différentes couches OSI, en particulier la couche MAC qu'on ne peut pas modéliser avec MATLAB/Simulink. MiXiM a été choisi car il offre une boîte à outils puissante et riche en fonctionnalités et permet l'analyse des performances de réseau de capteurs tout en proposant des modèles détaillés de propagation radio, d'estimatios d'interférences, de consommation d'énergie émetteur-récepteur et de mécanisme de robustesse. Un modèle pour la norme KNX-RF a donc été développé comme il n'en existe aucun aujourd'hui. Dans ce travail, le modèle a été construit conformément à la dernière version de KNX-RF appelée «Multi». Chaque module KNX-RF représenté sur OMNet++ intègre les quatre couches OSI nécessaires, qui sont : la couche Application, la couche Réseau, la couche Liaison (MAC) et la couche Physique. Chaque module peut exploiter plusieurs fréquences selon qu'il est Multi-Fast ou du Multi-Slow en conjonction avec un mécanisme d'acquittement. En réception, le processus de scan de fréquences selon le mode KNX utilisé a également été implémenté. La modélisation MAC implémentée pour KNX-RF est dérivée du protocole à échantillonnage de préambule appelé "Berkeley-MAC" déjà disponible sur MiXiM. Un scénario d'interférences reprenant le cas d'étude de la box multi-protocoles a été simulé, à savoir une collision entre une réception de trame Slow et une transmission simultanée d'une trame Fast. La simulation montre que dans ce cas, la trame Fast n'aboutit pas au destinataire malgré l'ARQ et l'agilité en fréquence. Une solution serait donc de décaler la dernière retransmission de trame de 500 ms, ce qui signifie que la dernière tentative sera faite une fois la transmission Slow terminée. Cette astuce a été simulée et le résultat est concluant. Plusieurs autres scénarios peuvent être simulés avec ce modèle et permettraient la validation des solutions avant de les intégrer dans la vrai stack du produit.

En conclusion, la possibilité de rajouter davantage de modules radio dans la box sans être perturbé, ou d'avoir un environnement indoor où plusieurs technologies différentes coexistent à petite ou grande échelle constituent certes de véritables challenges, mais si ces challenges sont relevés, de vrais leviers s'offrent à nous pour développer de nouvelles applications et enrichir l'offre de produits vendus sur le marché. Des protocoles intéressants à rajouter dans la box seraient par exemple le protocole SigFox ou le protocole Lora qui permettrait l'un comme l'autre d'élargir le domaine d'application de KNX-RF à l'internet des objets (IoT). Cependant, SigFox et Lora opèrent respectivement sur les fréquences 868.13 MHz (up-link) et 868 MHz. Ils partagent donc la bande de fréquences 868MHz avec KNX-RF et opèrent même quasiment sur la même fréquence. Par conséquent, les modèles de simulation pourraient servir à évaluer les risques d'interférences avec ces protocoles. Ceci fait partie des perspectives de ces travaux.

Dans cette thèse, une analyse des propriétés physiques et du comportement système de KNX-RF dans un environnement radio contraignant avec interférences a été réalisé grâce, d'une part, à une étude comparative avec les autres protocoles concurrents, et d'autre part, à des simulations et des tests sur le terrain. Suite à cette analyse, les paramètres qui peuvent être améliorés ont été identifiés et des

BY-NC-ND

propositions d'améliorations ont été faites. Elles concernent, entre autres, les mécanismes d'accès au média, la correction d'erreurs, la sécurité, mais aussi la possibilité d'implémenter de nouveau modes KNX-RF permettant de proposer de nouvelles applications sur le marché comme la récupération d'énergie (Energy Harvesting), le Long Range pour l'IoT ou encore le multimédia.

Les perspectives de ces travaux incluent la simulation d'autres types d'interférences, de protocoles et de transceivers radio pour statuer davantage sur la robustesse radio de KNX-RF. Une autre perspective serait d'utiliser les modèles développés, notamment le modèle OMNet++/MiXiM, pour connaitre le nombre de produits KNX-RF à partir duquel le système global présente des dysfonctionnements critiques. En outre, il faudrait simuler d'autres astuces à caractère temporel et de nouveaux mécanismes de la couche MAC qui permettraient de s'affranchir des problèmes d'interférences persistants. Avec MiXiM, il est également possible de réaliser une estimation de la consommation des produits dans des scénarios d'activité typique pour les produits KNX-RF Slow alimentés par piles. Enfin, il serait intéressant d'investiguer (par simulation, test radio et/ou calculs probabilistes) les possibilités d'amélioration de KNX-RF présentés dans la dernière partie de ce manuscrit afin d'évaluer leur pertinence et leur impact global sur le système.

BY-NC-ND

Références bibliographiques

[1] "Smart Home - Europe | Statista Market Forecast," *Statista*. [Online]. Available: https://www.statista.com/outlook/279/102/smart-home/europe. [Accessed: 14-Jun-2016].

[2] M. R. Alam, M. B. I. Reaz, and M. A. M. Ali, "A Review of Smart Homes #x2014;Past, Present, and Future," *IEEE Trans. Syst. Man Cybern. Part C Appl. Rev.*, vol. 42, no. 6, pp. 1190–1203, Nov. 2012.

[3] R. Harper, Ed., *Inside the Smart Home*. London: Springer-Verlag, 2003.

[4] XPair, "Gestion Technique du Bâtiment," *XPair*. [Online]. Available: http://conseils.xpair.com/consulter_savoir_faire/gestion_technique_batiment.htm. [Accessed: 14-Jun-2016].

[5] D. Gann, J. Barlow, and T. Venables, "Digital Futures: Making Homes Smarter. 1999," *Chart. Inst. Hous. Coventry*.

[6] J. Barlow and D. Gann, *A changing sense of place: are integrated IT systems reshaping the home?* University of Sussex, SPRU, 1998.

[7] "Synthèse de l'étude sur la Maison Connectée," *Fédération Française de Domotique*, 27-Oct-2015.

[8] Xerfi, "Le marché de la domotique." [Online]. Available: http://www.xerfi.com/presentationetude/Le-marche-de-la-domotique_3EEE16. [Accessed: 14-Jun-2016].

[9] R. Prasad, *OFDM for Wireless Communications Systems. Norwood, MA, USA: Artech House*. Inc, 2004.

[10] Electronic Communications Committee (ECC) within the European Conference of Postal and Telecommunications Administrations (CEPT), "The European table of frequency allocations and applications in the frequency range 8.3 kHz to 3000 GHz (ECA table)." 2015.

[11] ETSI EN 300 328 V1.9.1, "Electromagnetic compatibility and Radio spectrum Matters (ERM); Wideband transmission systems; Data transmission equipment operating in the 2,4 GHz ISM band and using wide band modulation techniques;Harmonized EN covering the essential requirements of article 3.2 of the R&TTE Directive." 2015.

[12] ETSI EN 300 220-1 V2.4.1, "Electromagnetic compatibility and Radio spectrum Matters (ERM); Short Range Devices (SRD); Radio equipment to be used in the 25 MHz to 1 000 MHz frequency range with power levels ranging up to 500 mW; Part 1: Technical characteristics and test methods." 2012.

[13] Agence Nationale des Fréquences, "Tableau National de Répartition des Bandes de Fréquences." 2012.

[14] ARCEP, "Décision n° 2014-1263 de l'Autorité de régulation des communications électroniques et des postes en date du 6 novembre 2014 fixant les conditions d'utilisation des fréquences radioélectriques par des dispositifs à courte portée." 2014.

BY-NC-ND

[15] European Commission, “2011/829/EU: Commission Implementing Decision of 8 December 2011 amending Decision 2006/771/EC on harmonisation of the radio spectrum for use by short-range devices (notified under document C(2011) 9030) Text with EEA relevance.” 2011.

[16] S. Gowrishankar, T. G. Basavaraju, D. H. Manjaiah, and S. K. Sarkar, “Issues in wireless sensor networks,” in *Proceedings of the World Congress on Engineering*, 2008, vol. 1, pp. 978–988.

[17] IEEE Computer Society, LAN/MAN Standards Committee, Institute of Electrical and Electronics Engineers, and IEEE-SA Standards Board, *IEEE recommended practice for information technology: telecommunications and information exchange between systems-- local and metropolitan area networks-- specific requirements. Part 15.2, Part 15.2,*. New York, NY: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2003.

[18] IEEE Computer Society, IEEE Standards Coordinating Committee 41 on Dynamic Spectrum Access Networks, Institute of Electrical and Electronics Engineers, and IEEE-SA Standards Board, *IEEE recommended practice for the analysis of in-band and adjacent band interference and coexistence between radio systems*. New York, N.Y.: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2008.

[19] M. Haenggi and R. K. Ganti, “Interference in Large Wireless Networks,” *Found. Trends Netw.*, vol. 3, no. 2, pp. 127–248, 2008.

[20] E. Dreina, “Conception, optimisation et intégration RF d’un système d’antennes miniatures multicapteurs utilisant la diversité en vue d’augmenter les performances radio d’un terminal mobile 4G,” Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG, 2010.

[21] A. El-Zooghby, *Smart Antenna Engineering*. Boston: Artech House, 2005.

[22] D. J. Carey, “Statistical modelling and reduction of multiple access interference power in wideband DS-CDMA and MC-CDMA communications systems,” 2006.

[23] A. P. Subramanian, M. M. Buddhikot, and others, “Interference aware routing in multi-radio wireless mesh networks,” in *2006 2nd IEEE Workshop on Wireless Mesh Networks*, 2006, pp. 55–63.

[24] N. Pradhan and T. Saadawi, “Adaptive distributed power management algorithm for interference-aware topology control in mobile ad hoc networks,” in *Global Telecommunications Conference (GLOBECOM 2010), 2010 IEEE*, 2010, pp. 1–6.

[25] B. Benmammar and F. Krief, “Game theory applications in wireless networks: a survey,” in *Proceedings 13th International Conference on Software Engineering, Parallel and Distributed Systems (SEPADS ‘14), Gdansk, Poland*, 2014, pp. 15–17.

[26] M. Elaoud and P. Ramanathan, “Adaptive use of error-correcting codes for real-time communication in wireless networks,” in *INFOCOM’98. Seventeenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings. IEEE*, 1998, vol. 2, pp. 548–555.

[27] Strata Resource Inc, “Investigating Open Systems – Comparing LonWorks and BACnet,” Market Report, 2006.

[28] P. Winkelman, “Sustainable Design of Building Automation Systems.” Distech Controls, 2011.

[29] KNX Association, “KNX System Specifications v3.0.” 2009.

[30] ISO, “ISO/IEC 14908-1:2012 - Information technology -- Control network protocol -- Part 1: Protocol stack,” *ISO*. [Online]. Available:

BY-NC-ND

http://www.iso.org/iso/iso_catalogue/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=60203. [Accessed: 19-Jun-2016].

[31] ANSI/ASHRAE 135, "BACnet – a data communication protocol for building automation and control networks." 2004.

[32] W. Kastner, G. Neugschwandtner, S. Soucek, and H. M. Newman, "Communication systems for building automation and control," *Proc. IEEE*, vol. 93, no. 6, pp. 1178–1203, 2005.

[33] Echelon, "Introduction to the LonWorks® Platform." 2009.

[34] Toshiba Corporation, "Neuron® Chip TMPN3150/3120, pp. 91." 2006.

[35] CENELEC, "BS EN 50090-5-2:2004 - Home and building electronic systems (HBES). Media and media dependent layers. Network based on HBES Class 1, Twisted Pair." 2004.

[36] CENELEC, "BS EN 50090-5-1:2005 - Home and building electronic systems (HBES). Media and media dependent layers. Power line for HBES Class 1." 2005.

[37] M. A. Zamora-Izquierdo, J. Santa, and A. F. Gómez-Skarmeta, "Integral and Networked Home Automation Solution towards Indoor Ambient Intelligence."

[38] BACnet International, "Introduction to BACnet For Building Owners and Engineers." 2014.

[39] G. Thomas, "Raising BACnet to the next level - Conencting BACnet devices to an IP infrastructure." Contemporary Controls, 2009.

[40] KNX Association, "KNX and BACnet – Two Complementary Open Standards." 2006.

[41] A. Kell and P. Colebrook, "Open systems for homes and buildings: Comparing lonworks and knx," *Watford UK Ii Ltd.*, 2004.

[42] W. Granzer, W. Kastner, and C. Reinisch, "Gateway-free integration of bacnet and knx using multi-protocol devices," in *2008 6th IEEE International Conference on Industrial Informatics*, 2008, pp. 973–978.

[43] Distech Controls, "Distech Network Guide, pp. 10-35." 2011.

[44] "ISO - International Organization for Standardization," *ISO*. [Online]. Available: http://www.iso.org/iso/home.html. [Accessed: 20-Jun-2016].

[45] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, "Wireless sensor networks: a survey," *Comput. Netw.*, vol. 38, no. 4, pp. 393–422, 2002.

[46] CENELEC, "BS EN 50090-5-3:2016 Home and Building Electronic Systems (HBES). Media and media dependent layers. Radio Frequency for HBES Class 1." 2016.

[47] J. G. Proakis, *Digital Communications By John G. Proakis*, 4th edition. McGrawHill, 2000.

[48] "System Specifications Communication Media Radio Frequency v1.6.00." 2012.

[49] Konnex Association, "KNX System Architecture." 2004.

[50] T. Weinzierl, "The KNX Easy Push Button Mode." WEINZIERL ENGINEERING GmbH, 2007.

[51] F. Shahin, *ZigBee Wireless Networks and Transceivers*, PAP/COM edition. Amsterdam ; Boston: Newnes, 2008.

BY-NC-ND

[52] "IEEE Standard for Local and metropolitan area networks–Part 15.4: Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs)," *IEEE Std 802154-2011 Revis. IEEE Std 802154-2006*, pp. 1–314, Sep. 2011.

[53] C.-J. M. Liang, N. B. Priyantha, J. Liu, and A. Terzis, "Surviving wi-fi interference in low power zigbee networks," in *Proceedings of the 8th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, 2010, pp. 309–322.

[54] ZigBee Alliance, "ZigBee 3.0 : The Foundation for the Internet of Things is now Available!" .

[55] C. Links, "The Power of ZigBee 3.0 All about the new and improved ZigBee 3.0," *GM of Qorvo Low Power Wireless*, Jun-2016.

[56] X. Chen, W. Guo, and Y. Zheng, "Frequency domain interference suppression in a DSSS system," in *IEEE 2002 International Conference on Communications, Circuits and Systems and West Sino Expositions*, 2002, vol. 1, pp. 247–251 vol.1.

[57] C. Wang, T. Jiang, and Q. Zhang, Eds., *ZigBee® Network Protocols and Applications*, 1 edition. Boca Raton: Auerbach Publications, 2014.

[58] M. Gast, *802.11 wireless networks: the definitive guide*. O'Reilly Media, Inc., 2005.

[59] Y.-C. Tseng, S.-Y. Ni, and E.-Y. Shih, "Adaptive approaches to relieving broadcast storms in a wireless multihop mobile ad hoc network," *IEEE Trans. Comput.*, vol. 52, no. 5, pp. 545–557, 2003.

[60] Bluetooth SIG, "Bluetooth Specification version Bluetooth 4.0." 2010.

[61] N. Gupta, *Inside Bluetooth Low Energy*. Artech House, 2013.

[62] ISO/IEC 14543-3-10, "Information technology — Home Electronic Systems (HES) — Part 3-10: Wireless Short-Packet (WSP) protocol optimized for energy harvesting — Architecture and lower layer protocols." 2012.

[63] Enocean, "EnOcean Technology – Energy Harvesting Wireless." 2011.

[64] Enocean Alliance, "EnOcean Equipment Profiles (EEP)." 06-Feb-2003.

[65] D. C. Paetz, *Z-Wave Basics: Remote Control in Smart Homes*. S.l.: CreateSpace Independent Publishing Platform, 2013.

[66] "Z-Wave Plus™ Certification," *Z-Wave Alliance*. [Online]. Available: http://z-wavealliance.org/z-wave_plus_certification/. [Accessed: 21-Jun-2016].

[67] Sigfox, "Sigfox Ready, P1 Ultra Narrow Band Requirement Specification for RZ1." 2016.

[68] J. C. Zuniga and B. Ponsard, "Sigfox System Description." 2016.

[69] LoRa Alliance, "LoRaWAN Specification V1.0." 2015.

[70] nanotron Technologies, "nanoLOC TRX Transceiver (NA5TR1) Version 1.02." 2007.

[71] L. De Nardis and M.-G. Di Benedetto, "Overview of the IEEE 802.15. 4/4a standards for low data rate Wireless Personal Data Networks," in *2007 4th Workshop on Positioning, Navigation and Communication*, 2007, pp. 285–289.

[72] A. Springer, W. Gugler, M. Huemer, L. Reindl, C. C. W. Ruppel, and R. Weigel, "Spread spectrum communications using chirp signals," in *EUROCOMM 2000. Information Systems for Enhanced Public Safety and Security. IEEE/AFCEA*, 2000, pp. 166–170.

[73] Semtech Corporation, "LoRa-FAQs." 2015.

BY-NC-ND

[74] B. Razavi and R. Behzad, *RF microelectronics*, vol. 1. Prentice Hall New Jersey, 1998.

[75] S. Zabre, "Amplification non-linéaire d'un multiplex de porteuses modulées à fort facteur de crête," *These Dr. Univ. Rennes I*, 2007.

[76] B. Razavi, "A study of injection pulling and locking in oscillators," in *PROCEEDINGS OF THE IEEE CUSTOM INTEGRATED CIRCUITS CONFERENCE*, 2003, pp. 305–312.

[77] A. A. Abidi, "Direct-conversion radio transceivers for digital communications," *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 30, no. 12, pp. 1399–1410, 1995.

[78] J. C. Rudell *et al.*, "Recent developments in high integration multi-standard CMOS transceivers for personal communication systems," in *International Symposium on Low Power Electronics and Design: Proceedings of the 1998 international symposium on Low power electronics and design*, 1998, vol. 10, pp. 149–154.

[79] H. Darabi and A. A. Abidi, "A 4.5-mW 900-MHz CMOS receiver for wireless paging," *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 35, no. 8, pp. 1085–1096, Aug. 2000.

[80] M. Choi and S. Choi, "Performance analysis on the self-mixed interference cancellation in direct conversion receivers," *IEEE Trans. Consum. Electron.*, vol. 59, no. 2, pp. 310–315, 2013.

[81] P. R. Gray, *Analysis and design of analog integrated circuits*, 5. ed., Internat. student version. Hoboken, NJ: Wiley, 2010.

[82] D. Dessales, "Conception d'un réseau de capteurs sans fil, faible consommation, dédié au diagnostic in-situ des performances des bâtiments en exploitation," Poitiers, 2011.

[83] H. Hashemi, "The indoor radio propagation channel," *Proc. IEEE*, vol. 81, no. 7, pp. 943–968, 1993.

[84] H. T. Friis, "A Note on a Simple Transmission Formula," *Proc. IRE*, vol. 34, no. 5, pp. 254–256, May 1946.

[85] Z. Ren, G. Wang, Q. Chen, and H. Li, "Modelling and simulation of Rayleigh fading, path loss, and shadowing fading for wireless mobile networks," *Simul. Model. Pract. Theory*, vol. 19, no. 2, pp. 626–637, 2011.

[86] COST Action 231 (Project), European Commission, and I. M. DGXIII "Telecommunications and Exploitation of Research. ., *Digital mobile radio towards future generation systems: final report*. Luxembourg: European Commission, Directorate-General Telecommunications, Information Society, Information Market, and Exploitation of Research, 1999.

[87] International communication Union, "Propagation data and prediction methods for the planning of indoor radiocommunication systems and radio local area networks in the frequency range 900 MHz to 100 GHz," *Recomm. ITU-R*, pp. 1238–7, 2012.

[88] V. Erceg, L. Schumacher, P. Kyritsi, and others, *TGn Channel Models, IEEE 802.11-03/940r4, May 10, 2004*. .

[89] W. Wiesbeck and miniWattII Project Consortium, "Minimizing the Exposure of Future Communication Systems. - miniWATT II -." 2006.

[90] N. Langhammer, *Analysis and Optimization of Wireless Control Networks for Smart Home Applications*. Shaker Verlag, 2012.

BY-NC-ND

[91] J. Lloret, J. J. Lopez, C. Turro, and S. Flores, “A fast design model for indoor radio coverage in the 2.4 GHz wireless LAN,” in *1st International Symposium on Wireless Communication Systems, 2004*, 2004, pp. 408–412.

[92] S. Y. Seidel and T. S. Rappaport, “914 MHz path loss prediction models for indoor wireless communications in multifloored buildings,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 40, no. 2, pp. 207–217, 1992.

[93] C. Tornevik, J.-E. Berg, F. Lotse, and M. Madfors, “Propagation models, cell planning and channel allocation for indoor applications of cellular systems,” in *Vehicular Technology Conference, 1993., 43rd IEEE*, 1993, pp. 867–870.

[94] W. S. Lee and S. H. Hong, “Implementation of a KNX-ZigBee gateway for home automation,” in *2009 IEEE 13th International Symposium on Consumer Electronics*, 2009, pp. 545–549.

[95] Y. Ni, F. Miao, J. Liu, and J. Chai, “Implementation of Wireless Gateway for Smart Home,” *Commun. Netw.*, vol. 5, no. 1, pp. 16–20, 2013.

[96] J. Zhang, G. Song, H. Wang, and T. Meng, “Design of a Wireless Sensor Network Based Monitoring System for Home Automation,” 2011, pp. 57–60.

[97] S. B. Wibowo, G. D. Putra, and B. S. Hantono, “Development of embedded gateway for Wireless Sensor Network and Internet Protocol interoperability,” in *Information Technology and Electrical Engineering (ICITEE), 2014 6th International Conference on*, 2014, pp. 1–4.

[98] M. Dillon and T. Winters, “Virtualization of home network gateways,” *Computer*, vol. 11, no. 47, pp. 62–65, 2014.

[99] Y. Royon, S. Frénot, and F. Le Mouël, “Virtualization of service gateways in multi-provider environments,” in *International Symposium on Component-Based Software Engineering*, 2006, pp. 385–392.

[100] L. Mainetti, V. Mighali, and L. Patrono, “An android multi-protocol application for heterogeneous building automation systems,” in *Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM), 2014 22nd International Conference on*, 2014, pp. 121–127.

[101] S. Q. Hu, X. L. Zhang, and W. Dang, “A Semantic Gateway for Home Automation Networks,” *Adv. Mater. Res.*, vol. 1061–1062, pp. 916–920, Dec. 2014.

[102] J. Kaur and M. Singh, “Multiprotocol Gateway for Wireless Communication in Embedded Systems,” *Int. J. Comput. Appl.*, vol. 72, no. 18, 2013.

[103] M. Götze, W. Kattanek, and R. Peukert, “An extensible platform for smart home services,” in *Systems, Signals and Devices (SSD), 2012 9th International Multi-Conference on*, 2012, pp. 1–6.

[104] Schneider-Electric, “Wiser Home Management, welcome to your smart home.” 2012.

[105] Orange, “Orange lance ‘Homelive’ pour piloter sa maison depuis son mobile.” 2014.

[106] SFR, “SFR lance la box Home de SFR, l’offre la plus complète du marché intégrant contenus premium et contrôle intelligent du domicile.” 2014.

[107] Fibaro, “Fibaro Home intelligence.” 2015.

[108] ARCHOS, “ARCHOS annonce la disponibilité de sa Smart Home et entre sur le marché de la maison connectée.” 2014.

BY-NC-ND

[109] SEMTECH, “The SX1211 Transceiver Datasheet.” 2013.

[110] Texas Instruments, “CC1120 High Performance RF Transceiver for Narrowband Systems.” 2012.

[111] MathWorks, “SimRF, design and simulate RF systems.” 2013.

[112] TEMEX, “TMX W331, Low Loss SAW Bandpass Filter – Remote Control – RF.” 2005.

[113] O. Hersent, D. Boswarthick, and O. Elloumi, *The internet of things: Key applications and protocols*. John Wiley & Sons, 2011.

[114] enedis, “Linky, le compteur communicant d’Enedis | Enedis.” [Online]. Available: http://www.enedis.fr/linky-le-compteur-communicant-derdf. [Accessed: 17-Jul-2016].

[115] A. Varga and OpenSim Ltd, “OMNeT++ user manual Version 4.6.” 2014.

[116] Q. I. Ali, “Simulation framework of wireless sensor network (WSN) using matlab/simulink software,” *Ed. Vasilios N Katsikis*, vol. 263, 2012.

[117] X. Xian, W. Shi, and H. Huang, “Comparison of OMNET++ and other simulator for WSN simulation,” in *2008 3rd IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*, 2008, pp. 1439–1443.

[118] W. Drytkiewicz, S. Sroka, V. Handziski, A. Köpke, and H. Karl, “A Mobility Framework for OMNeT++. 3rd International OMNeT++ Workshop, at Budapest University of Technology and Economics,” *Dep. Telecommun. Bp. Hung.*, 2003.

[119] A. Köpke *et al.*, “Simulating wireless and mobile networks in OMNeT++ the MiXiM vision,” in *Proceedings of the 1st international conference on Simulation tools and techniques for communications, networks and systems & workshops*, 2008, p. 71.

[120] National ICT Australia, “Castalia,” 2012. [Online]. Available: https://castalia.forge.nicta.com.au/index.php/en/. [Accessed: 17-Jul-2016].

[121] A. Boulis, “Castalia: revealing pitfalls in designing distributed algorithms in WSN,” in *Proceedings of the 5th international conference on Embedded networked sensor systems*, 2007, pp. 407–408.

[122] OMNeT++ Community., “INET Framework for OMNeT++ Manual.” 2012.

[123] K. Wessel, M. Swigulski, A. Köpke, and D. Willkomm, “Mixim: the physical layer an architecture overview,” in *Proceedings of the 2nd International Conference on Simulation Tools and Techniques*, 2009, p. 78.

[124] J. Polastre, J. Hill, and D. Culler, “Versatile low power media access for wireless sensor networks,” in *Proceedings of the 2nd international conference on Embedded networked sensor systems*, 2004, pp. 95–107.

[125] A. Forster, “Implementation of the B-MAC Protocol for WSN in MiXiM,” in *4th international workshop to be held in conjunction with Simutools*, 2011.

[126] J. Kuri and S. K. Kasera, “Reliable multicast in multi-access wireless LANs,” *Wirel. Netw.*, vol. 7, no. 4, pp. 359–369, 2001.

[127] G. Balakrishnan, M. Yang, Y. Jiang, and Y. Kim, “Performance analysis of error control codes for wireless sensor networks,” in *Information Technology, 2007. ITNG’07. Fourth International Conference on*, 2007, pp. 876–879.

BY-NC-ND

[128] M. C. Vuran and I. F. Akyildiz, “Error control in wireless sensor networks: a cross layer analysis,” *IEEEACM Trans. Netw.*, vol. 17, no. 4, pp. 1186–1199, 2009.

[129] M. El Aoun, “Optimisation des techniques de codage pour les transmissions radio avec voie de retour,” Télécom Bretagne, Université de Bretagne Occidentale, 2012.

[130] EnOcean, “Application Note: Motion sensor based on EnOcean STM 300/400.” Sep-2015.

[131] GCell, “GCell by G24: Smart, Sustainable, Solar.,” *G24*. [Online]. Available: http://gcell.com/knowledge-hub/faqs. [Accessed: 27-Oct-2016].

BY-NC-ND

Annexes

Annexe 1. Caractéristiques des champs électromagnétiques 181
Annexe 1.1. Caractéristiques générales 181
Annexe 1.2. Composantes du champ 181
Annexe 1.3. Champ lointain 181
Annexe 1.3.1. Densité de puissance 182
Annexe 1.3.2. Champ 184
Annexe 1.4. Champ proche 185
Annexe 1.4.1. Densité de puissance et champ 185
Annexe 2. Les différents modules et classes qui constituent la couche Physique de MiXiM 186

BY-NC-ND

Annexe 1. Caractéristiques des champs électromagnétiques

Annexe 1.1. Caractéristiques générales

Le présent paragraphe s'intéresse aux caractéristiques particulières des champs électromagnétiques présentant un intérêt pour la présente Recommandation, et fait en particulier la distinction entre champ proche et champ lointain. Des équations simples sont données pour calculer la densité de puissance et le champ dans la région de champ lointain. Les termes de polarisation et de diagrammes de brouillage sont définis à la fin du paragraphe.

Annexe 1.2. Composantes du champ

Le champ électromagnétique rayonné par une antenne comprend diverses composantes de champ électrique et magnétique dont les valeurs diminuent en fonction de la distance, r, par rapport à la source du rayonnement. Les principales composantes sont les suivantes :

– le champ lointain (Fraunhofer), appelé également champ de rayonnement, dont la valeur diminue de façon inversement proportionnelle à la distance, $1/r$;

– le champ proche rayonnant (Fresnel), appelé également champ inductif. Sa structure dépend beaucoup de la forme, des dimensions et du type de l'antenne, même si divers critères ont été définis et sont couramment utilisés pour caractériser ce comportement ;

– le champ proche réactif (Rayleigh), appelé également champ quasi statique, dont la valeur diminue dans un rapport de $1/r^3$.

Etant donné que les valeurs du champ inductif et du champ quasi statique diminuent rapidement au fur et à mesure que la distance par rapport à la source de rayonnement augmente, ces champs ne sont significatifs qu'à proximité de l'antenne d'émission, c'est-à-dire dans la région dite de *champ proche*.

Par ailleurs, le champ de rayonnement est l'élément dominant dans la région dite de champ lointain. C'est en effet ce champ que traverse un signal radiophonique ou un signal de télévision depuis l'émetteur jusqu'à un récepteur distant.

Annexe 1.3. Champ lointain

Dans la région de champ lointain, le champ électromagnétique présente essentiellement la forme d'une onde plane, c'est-à-dire que le champ électrique et le champ magnétique sont en phase et que le rapport de leurs amplitudes est constant. En outre, le champ électrique et le champ magnétique sont en angle droit l'un par rapport à l'autre et sont situés dans un plan perpendiculaire au sens de la propagation.

On considère souvent que les conditions propres au champ lointain s'appliquent à des distances supérieures à $2D^2/\lambda$, où D est la dimension linéaire maximale de l'antenne.

BY-NC-ND

Toutefois, il faut être prudent si on applique ce critère à une antenne de radiodiffusion pour les raisons suivantes :

– Ce critère découle de considérations relatives à des antennes plans ;

– On suppose que *D* est grande par rapport à λ.

Lorsque les conditions susmentionnées ne sont pas remplies, il convient d'utiliser pour le champ lointain une distance supérieure à 10 λ.

Annexe 1.3.1. Densité de puissance

Le vecteur densité de puissance, vecteur de Poynting ***S***, d'un champ électromagnétique est donné par le produit vectoriel de la composante électrique ***E*** et de la composante magnétique ***H*** du champ :

$$\boldsymbol{S = E \times H} \qquad \textbf{(1)}$$

Pour la région de champ lointain, dans des conditions idéales, c'est-à-dire lorsqu'il est important que le sol ou d'autres obstacles n'aient pas d'influence, cette équation peut être simplifiée car le champ électrique, le champ magnétique et le sens de propagation sont perpendiculaires entre eux. Par ailleurs, le rapport des amplitudes du champ électrique, *E*, et du champ magnétique, *H*, est une constante Z_0, appelée impédance caractéristique de l'espace libre[5], égale à environ 377 Ω (ou 120π Ω).

Ainsi, dans la région de champ lointain, la densité de puissance, *S*, en espace libre est donnée par l'équation non vectorielle suivante :

$$\boldsymbol{S = E^2/Z = H^2\, Z_0} \qquad \textbf{(2)}$$

La densité de puissance – quelle que soit la distance et quelle que soit la direction – peut être calculée dans la région de champ lointain à l'aide de l'équation suivante:

$$\boldsymbol{S = P\, G_i/(4\pi\, r^2)} \qquad \textbf{(3)}$$

où:

S: densité de puissance (W/m^2) dans une direction donnée

P: puissance (W) fournie à la source de rayonnement, dans l'hypothèse d'un système sans perte

G_i: facteur de gain de la source de rayonnement dans la direction considérée, rapporté à un élément rayonnant isotrope

r: distance (m) par rapport à la source de rayonnement.

---

[5] En général, l'impédance caractéristique d'un milieu est donnée par la formule $z = \sqrt{(\mu / \varepsilon)}$ où μ est la perméabilité magnétique (= 1,2566.. × 10^{-6} F/m en espace libre) et ε est la permittivité (= 8,85418 × 10^{-12} H/m en espace libre).

BY-NC-ND

Le produit PG_i dans l'équation (3) est appelé p.i.r.e. et représente la puissance qu'un élément rayonnant isotrope fictif devrait émettre pour produire la même intensité de champ au point de réception.

Il faut tenir compte du diagramme d'antenne pour des densités de puissance dans d'autres directions.

Pour utiliser l'équation (3) avec une antenne dont le gain G_a est rapporté à une antenne de référence de gain isotrope G_r, par exemple un doublet demi-onde ou une antenne unipolaire courte, il faut remplacer le facteur de gain G_i par le produit $G_r \cdot G_a$ comme dans l'équation (4). Le facteur G_r pertinent est donné dans le Tableau 1:

$$S = P\, G_r\, G_a/(4\pi\, r^2) \qquad (4)$$

TABLEAU 1 : Facteurs de gain isotrope pour différents types d'antenne de référence

Type d'antenne de référence	**Facteur de gain isotrope, G_r**	**Applications types concernées par le type d'antenne de référence**
Elément rayonnant isotrope	1,0	Radar, liaison radioélectrique par satellite ou de Terre
Doublet demi-onde	1,64	Télévision, radiodiffusion en ondes métriques et parfois en ondes décamétriques
Antenne unipolaire courte	3,0	Radiodiffusion en ondes kilométriques, hectométriques et parfois décamétriques

Ainsi, lorsque le gain d'antenne G_d ($G_a = G_d$) est rapporté à celui d'un doublet demi-onde :

$$S = 1{,}64\, PG_d/(4\pi\, r^2) \qquad (5)$$

où:

G_d : gain de l'antenne rapporté à un doublet demi-onde.

De même, lorsque le gain de l'antenne $G_a = G_m$ est rapporté à celui d'une antenne unipolaire courte:

$$S = 3{,}0\, PG_m/(4\pi\, r^2) \qquad (6)$$

où:

G_m : gain de l'antenne rapporté à une antenne unipolaire courte.

BY-NC-ND

Annexe 1.3.2. Champ

Dans les équations (2) à (10) on suppose que les conditions sont celles propres à la région de champ lointain où le champ se présente sous forme d'une onde plane; elles ne concernent pas les calculs pour la région de champ proche.

Si on insère l'équation (2) dans l'équation (3) pour éliminer *S* et si on introduit un facteur *C* pour tenir compte de la caractéristique de direction de la source de rayonnement, on obtient alors l'équation (7) qui permet de calculer le champ électrique (E), dans la région de champ lointain, d'une source de rayonnement:

$$E = \sqrt{\frac{Z_0}{4\pi}} \ \frac{\sqrt{PG_i}}{r} \ C = \frac{C}{r}\sqrt{30PG_i} \qquad \textbf{(7)}$$

où:

E: champ électrique (V/m)

$Z_0 = 377\ \Omega$, impédance caractéristique de l'espace libre

P: puissance fournie à la source de rayonnement (W), dans l'hypothèse d'un système sans perte

C: facteur $(0 \le C \le 1)$ qui tient compte de la caractéristique de direction de la source de rayonnement (dans la direction principale du rayonnement, $C = 1$).

Si le gain de l'antenne est rapporté à celui d'un doublet demi-onde ou d'une antenne unipolaire courte et non à celui d'un élément rayonnant isotrope, il convient d'utiliser en lieu et place de G_i, les facteurs G_d et G_m respectivement dans les équations (8) et (9).

$$E = \sqrt{\frac{Z_0}{4\pi}} \ \frac{\sqrt{1{,}64PG_d}}{r} \ C = \frac{C}{r}\sqrt{49{,}2PG_d} \qquad \textbf{(8)}$$

$$E = \sqrt{\frac{Z_0}{4\pi}} \ \frac{\sqrt{3PG_m}}{r} \ C = \frac{C}{r}\sqrt{90PG_m} \qquad \textbf{(9)}$$

Pour calculer le champ magnétique, dans la région de champ lointain, d'une source de rayonnement, on utilise l'équation (10):

$$\boldsymbol{H = E/Z_0} \qquad \textbf{(10)}$$

où:

E: champ électrique (V/m)

H: champ magnétique (A/m)

$Z_0 = 377\ \Omega\ (120\pi)$, impédance caractéristique de l'espace libre.

BY-NC-ND

Annexe 1.4. Champ proche

La structure du champ dans la région de champ proche est plus complexe que celle décrite ci-dessus pour la région de champ lointain. Dans la région de champ proche, il y a une relation de phase et d'amplitude arbitraire entre le vecteur champ électrique et le vecteur champ magnétique et les valeurs de champ varient considérablement d'un point à un autre. Par conséquent, pour déterminer la nature du champ proche il faut calculer ou mesurer la phase et l'amplitude du champ électrique et du champ magnétique, ce qui, dans la pratique peut s'avérer très difficile.

Annexe 1.4.1. Densité de puissance et champ

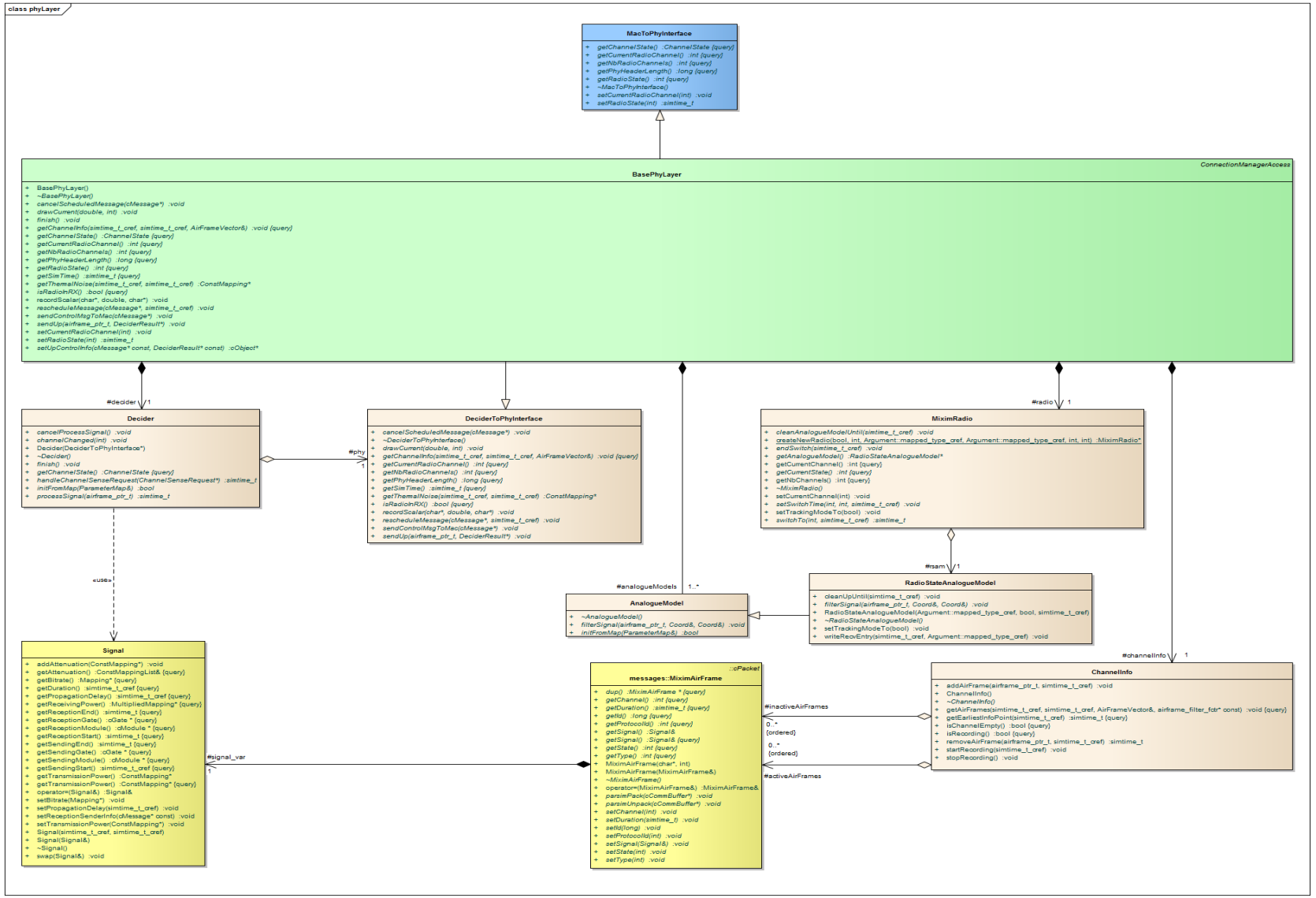
Il n'est pas facile de déterminer le vecteur de Poynting dans la région de champ proche en raison de la relation de phase et d'amplitude arbitraire dont on vient de parler. Il faut mesurer ou calculer séparément en chaque point les amplitudes *E* et *H* ainsi que leur relation de phase, ce qui rend la tâche particulièrement complexe et longue.

En utilisant des formules analytiques, on ne peut faire une estimation du champ dans la région de champ proche que pour des éléments rayonnants parfaits simples comme une antenne doublet élémentaire. Dans le cas de systèmes d'antennes plus complexes, il faut utiliser d'autres techniques mathématiques pour estimer les niveaux du champ dans la région de champ proche. Ces autres techniques permettent de faire des estimations relativement précises du champ, de la densité de puissance et d'autres caractéristiques utiles du champ, même dans la région de champ proche qui est complexe.

Il est encore plus difficile de faire des mesures du champ dans la région de champ proche étant donné qu'il n'existe aucune méthode d'étalonnage pouvant servir de référence. La Commission électrotechnique internationale travaille actuellement à l'élaboration d'une norme sur les mesures du champ électromagnétique aux fréquences comprises entre 9 kHz et 300 GHz, en particulier dans la région de champ proche [1]. En outre, la Norme EN 61566 (Mesures d'exposition aux champs électro-magnétiques à RadioFréquences – intensité du champ dans la gamme de fréquences 1 kHz-1 GHz, § 6.1.4) donne davantage d'informations sur ce sujet.

BY-NC-ND

Annexe 2. Les différents modules et classes qui constituent la couche Physique de MiXiM



BY-NC-ND

Glossaire

ACK Acknowledgement

ACPR Adjacent Channel Power Ratio

ADC Analog to Digital Converter

AEL Atténuation en Espace Libre

AFA Adaptive Frequency Agility

AFH Adaptive Frequency Hopping

AGC Automatic Gain Control

AM Amplitude Modulation

ANSI American National Standards Institute

APP Application

ARCEP Autorité de Régulation des Communications Électroniques et des Postes

ARP Address Resolution Protocol

ARQ Automatic Repeat Request

ASHRAE American Society of Heating, Refrigerating and Air- Conditioning Engineers

ASK Amplitude Shift Keying

AWGN Additive white Gaussian Noise

BAN Body Area Networks

BAW Bulk Acoustic Wave

BLE Bluetooth Low Energy

B-MAC Berkeley Medium Access Network

BPSK Binary Phase Shift Keying

BT Bandwidth Time Product

BTL BACnet Testing Laboratories

BW Bandwidth

CCA Clear Channel Assessment

CDMA Code-Division Multiple Access

CENELEC European Committee for Electrotechnical Standardization

CMOS Complementary Metal Oxide Semiconductor

CPL Courants Porteurs en Ligne

CRC Cyclic Redundancy Check

CSMA-CA Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance

CTS Clear to Send

DAC Digital to Analog Converter

BY-NC-ND

DC Direct Curent

DMI Distance Maximale d'Interférence

DSSS Direct Sequence Spread Spectrum

EEP EnOcean Equipment Profil

EHS European Home System

EIB European Installation Bus

EIRP Effective Isotropic Radiated Power

EOA End Of ACK

ERP Effective Radiated Power

ETS (Engineering Tool Software)

ETSI European Telecommunications Standards Institute

EVM Error Vector Magnitude

FDD Frequency-division duplexing

FEC Forward Error Correction

FHSS Frequency Hopping Spread Spectrum

FSK Frequency Shift Keying

HAN Home Automation Networks

HBA Home and Building Automation

HVAC Central Heating Ventilation and Air-Conditioning

IDE Integrated Development Environment

IEC International Electrotechnical Commission

IF Intermediate Frequency

IHM Interface Homme Machine

IIP Input Intercept Point

IM Inter-modulation

IoT Internet of Things

IP Intercept Point

IP Internet Protocol

IQ In-phase and Quadrature

ISM Industrial, Scientific and Medical

ISO International Organization for Standardization

LAN Local Area Network

LBT Listen before Talk

LLC Logical Link Control

LNA Low Noise Amplifier

LP-WPAN Low Power - Wireless Personal Area Network

MAC Medium Access Control

BY-NC-ND

MIMO Multiple-Input Multiple-Output

MRNP Mode de Réception Non-Permanent

MS/TP Master-Slave / Token-Passing

MWM Multi-Wall Model

NAK Negative Acknowledgment

NED Network Description

NF Noise Figure

NIC Network Interface Card

NRZ Non-Return-to-Zero

OFDM Orthogonal Frequency Division Multiplexing

OIP Output Intercept Point

OL Oscillateur Local

OMNet Objective Modular Network

O-QPSK Offset Phase Shift Keying

OSI Open Systems Interconnection

PAN Personal Area Network

PDBT Power Difference at BER Threshold

PER Packet Error Rate

PIRE Puissance Isotropique Rayonnée effectivement

PL Power Line

PLL Phase Locked Loop

PN Pseudo Noise

PTP Point-to-Point

QAM Quadrature Amplitude Modulation

RF Radio Frequency

RTS Request to Send

RX Réception

SAW Surface Acoustic Wave

SDN Software-Defined Networking

SIG Special Interest Group

SINR Signal to Interference plus Noise Ratio

SMD Signal Minimum Détectable

SNR Signal to Noise Ratio

SRD Short Range Devices

TDD Time Division Duplexing

TDMA Time Division Multiple Access

TEB Taux d'Erreur Binaire

BY-NC-ND

TEB Taux d'Erreur Binaire

TP Twisted Pair

TX Transmission

UML Unified Modeling Language

VANet Vehicular Ad-Hoc Network

WSN Wireless Sensor Networks

BY-NC-ND

Table des illustrations

Figure 0-I-1 : Evolution du chiffre d'affaire du secteur de la domotique en Europe. Source [1]. 10
Figure I-1 : Evolution de la domotique dans le temps [4] 16
Figure I-2 : Les réseaux sans fil WPAN (personnels), WLAN (locaux), WMAN (métropolitains), WWAN (étendus) et leurs zones de couverture. 19
Figure I-3 : Cadre analytique regroupant les paramètres ayant une influence sur la coexistence radio 26
Figure I-4 : Les différents types d'interférences radio dans le domaine fréquentiel 27
Figure I-5 : Atténuation en espace libre en fonction de la distance et de la fréquence 31
Figure II-1 : Hiérarchie des trois protocoles domotiques filaires au niveau application et système 39
Figure II-2 : Classement des protocoles RF selon leurs techniques de modulation et d'accès au média 40
Figure II-3 : Modèle OSI (Emission / Réception) 41
Figure II-4 : La stack du protocole KNX-RF 41
Figure II-5 : La composition d'une trame KNX-RF 42
Figure II-6: Algorithmes d'acquittement KNX (Rx / Tx) 46
Figure II-7 : Fenêtres de réception des acquittements (Fast-ACK) 46
Figure II-8 : Algorithmes d'accès au média pour les canaux KNX-RF 47
Figure II-9 : Algorithme de gestion de perte de trame dans KNX-RF 49
Figure II-10 : Historique des normes ZigBee et 802.15.4 49
Figure II-11 : La stack du protocole ZigBee 50
Figure II-12 : La structure générale d'une trame radio ZigBee 50
Figure II-13 : La répartition des canaux ZigBee sur la bande 2,4 GHz et leur coexistence avec le Wi-Fi 51
Figure II-14 : Les types de nœuds dans un réseau maillé ZigBee 52
Figure II-15 : La technique d'étalement de spectre DSSS 53
Figure II-16 Algorithme du CSMA-CA non-slotté 54
Figure II-17 : Diagramme de Markov décrivant l'algorithme du mécanisme CSMA-CA en ZigBee .. 55
Figure II-18 : Illustration du problème du nœud caché 56
Figure II-19 : La stack du protocole Bluetooth Low Energy 58
Figure II-20 : La répartition des canaux BLE sur la bande 2,4 GHz et leur coexistence avec le Wi-Fi 59
Figure II-21 : Les différents profils d'un périphérique BLE 59
Figure II-22 : La structure globale d'une trame Bluetooth Low Energy 60

BY-NC-ND

Figure II-23 : Les différentes opérations réalisées pendant une séquence d'Advertising 60
Figure II-24 : Le scan actif et le scan passif en Bluetooth LE 61
Figure II-25 : Etablissement de la connexion et les échange de données entre le Master et le Slave ... 62
Figure II-26 : La technique d'étalement de spectre FHSS en Bluetooth LE 63
Figure II-27 : La stack du protocole EnOcean 65
Figure II-28 : Exemple d'une trame EnOcean avec une payload allant jusqu'à 14 octets 65
Figure II-29 : Illustration du télégramme EnOcean composé de 3 sous-télégrammes espacés d'un temps de veille 67
Figure II-30 : Composition de la période d'échéance TX de EnOcean 68
Figure II-31 : La stack du protocole Z-wave 69
Figure II-32 : La structure globale d'une trame Z-wave (unicast / multicast) 70
Figure II-33 : Représentation de la stack du protocole SigFox 71
Figure II-34 : Architecture du réseau SigFox 73
Figure II-35 : La composition d'une trame SigFox en liaison montante et en liaison descendante 73
Figure II-36 : Communication SigFox en mode unidirectionnel 74
Figure II-37 : Communication en mode bidirectionnel 75
Figure II-38 : La stack du protocole LoRa 77
Figure II-39 : La structure globale d'une trame LoRa 79
Figure II-40 : L'architecture du réseau LoRa 79
Figure II-41 : La largeur de bande d'un signal modulé en CSS en fonction du facteur d'étalement de spectre 81
Figure III-1: Etapes d'une chaîne de transmission numérique 87
Figure III-2 : Architecture typique d'un émetteur Homodyne rajout additioneur 91
Figure III-3 : Architecture typique d'un émetteur Super-Hétérodyne 91
Figure III-4 : Architecture typique d'un récepteur Super-Hétérodyne 92
Figure III-5 : Problème de haute et basse fréquence intermédiaire dans un récepteur Super-Hétérodyne 93
Figure III-6 : Architecture typique d'un récepteur Homodyne 94
Figure III-7 : Problème de la fuite de l'oscillateur local et auto-interférence dans un récepteur Homodyne 94
Figure III-8 : L'importance de la distance par rapport au récepteur dans un scénario d'interférence ... 95
Figure III-9 : Le mélange réciproque causé par l'oscillateur harmonique (Reciprocal Mixing) 97
Figure III-10 : Le point de compression à -1 dB 99
Figure III-11 : Les produits d'intermodulation (IM) jusqu'à l'ordre 7 (trait plein) associés aux fréquences fondamentales (trait pointillé) 102

BY-NC-ND

Figure III-12 : Le point d'interception d'ordre 102
Figure III-13 : La propagation dans le canal indoor 104
Figure III-14 : Les variations de la puissance reçue en fonction de la distance [82] 105
Figure III-15 : L'impact de la fréquence sur l'affaiblissement de puissance dans un environnement indoor en utilisant le modèle miniWATT II 110
Figure IV-1 : Le modèle de simulation de robustesse RF construit sous MATLAB/Simulink 117
Figure IV-2 : Diagramme-bloc de génération de la trame KNX sur Simulink 118
Figure IV-3 : Structure du bloc de réception Homodyne 119
Figure IV-4 : Illustration du test de Rx Blocking 119
Figure IV-5 : Mesures du paramètre S_{21} du filtre SAW 120
Figure IV-6 : BER du signal F1 avec et sans filtre SAW en présence d'une porteuse pure à -2 MHz de la F1 121
Figure IV-7 : BER du signal F1 avec et sans filtre SAW en présence d'une porteuse pure à -10 MHz de la F_1 121
Figure IV-8 : La composition du banc de test conduit 122
Figure IV-9 : Spectre du signal KNX-RF et du signal d'interférence modulé en 2-FSK 123
Figure IV-10 : Cas d'interférence de KNX-RF avec un signal modulé en 2-ASK 123
Figure IV-11 : Les courbes de BER des deux interférences 124
Figure IV-12 : Structure matérielle de la box domotique multi-protocole étudiée 125
Figure IV-13 : Les équipements HBA et les systèmes de sécurité en interaction avec la box domotique 125
Figure IV-14 : Exemple de scénario d'utilisation de la box domotique 126
Figure IV-15 : Composition de la box domotique muli-protocoles étudiée 127
Figure IV-16 : Diagramme de rayonnement ERP de l'antenne utilisée à 868 MHz 127
Figure IV-17 : Le nombre des trames Fast perdues lors d'une transmission Slow simultanée 128
Figure IV-18 : Support physique de la box domotique utilisée dans les tests expérimentaux 132
Figure IV-19 : Portée de KNX-RF à l'intérieur d'une maison sans interférences 134
Figure IV-20 : Portée de KNX-RF Fast lorsqu'il est perturbée par des signaux Slow émis par la box 135
Figure IV-21 : Portée de KNX-RF Slow lorsqu'il est perturbée par des signaux Fast émis par la box 136
Figure IV-22 : Portée de KNX-RF lorsqu'il est perturbée par un signal INOVA 434 MHz émis par la box 137
Figure IV-23 : Portée de KNX-RF lorsqu'il est perturbée par un signal INOVA 869 MHz émis par la box 137
Figure V-1 : Module simple et module composé 141

BY-NC-ND

Figure V-2 : Les différentes étapes d'exécution d'une simulation sous OMNet++ 143
Figure V-3 : La structure générale d'un réseau, d'un nœud et de son NIC sur OMNet++ 144
Figure V-4 : La procédure d'émission et de réception au niveau de NIC 146
Figure V-5 : Diagramme représentant les relations les modules de OMNet++, MiXim et KNX-RF-Multi 149
Figure V-6 : Protocole à échantillonnage de préambule 151
Figure V-7 : La machine à états du protocole B-MAC déjà existant sur MiXiM 152
Figure V-8 : Le séquencement de changement de fréquence pendant la période de stand-by dans KNX-RF 153
Figure V-9 : Machine à états de la couche MAC_KNX_RF implémenté sur MiXiM 154
Figure V-10 : Illustration du modèle KNX-RF dans l'interface graphique Tkenv de MiXiM 155
Figure V-11 : Scénario de collision de trames Fast et Slow 156
Figure V-12 : Résultats de simulation d'une collision de trames KNX-RF Fast et Slow 156
Figure V-13 : Le décalage temporel proposé en cas d'auto-interférence KNX-RF 157
Figure V-14 : Résultat de simulation de la solution proposée sur le modèle 157
Figure V-15 : Structure optimisée d'une trame KNX-RF pour des applications d'Energy Harvesting 165

BY-NC-ND

Table des tableaux

Tableau 0-I-1 : Les différences entre la domotique (Home Automation) et l'immotique (Building Automation)..... 11

Tableau I-1 : Les exigences réglementaires applicables aux bandes 433/868 MHz et 2,4 GHz en Europe [15]..... 20

Tableau I-2 : Topologie des réseaux de capteurs sans fil..... 23

Tableau I-3 : Les variables et mécanismes ayant un impact sur les interférences et la coexistence RF 29

Tableau II-1 : Les différents débits disponibles dans le standard BACnet..... 37

Tableau II-2 : Les caractéristiques des trois protocoles filaires étudiés dédiés au HBA..... 38

Tableau II-3 : Les différences entre KNX Ready et KNX Multi [48]..... 42

Tableau II-4 : Les caractéristiques physiques des différents canaux de KNX-RF [48]..... 43

Tableau II-5 : Les mécanismes de robustesse de KNX-RF-Multi et leurs fonctions..... 44

Tableau II-6 : Les temps d'accès au média en émission et la durée du time-out en réception..... 48

Tableau II-7 : Timing des trois sous-télégrammes EnOcean visant à réduire les collisions de trames. 68

Tableau II-8 : Les canaux utilisés en LoRa..... 78

Tableau II-9 : Les différentes classes de produits en LoRa..... 80

Tableau II-10 : Comparaison des protocoles RadioFréquences étudiés adaptés des spécifications des protocoles et de la littérature..... 84

Tableau III-1 : Expressions des symboles pour certaines modulations..... 88

Tableau III-2 : Valeurs mesurées des paramètres d'atténuations d'un bâtiment typique [89]..... 109

Tableau IV-1 : Résultats de simulation du Rx Blocking pour le canal KNX-RF Fast F1..... 120

Tableau IV-2 : Les équipements de test utilisés et leurs références..... 122

Tableau IV-3 : Les résultats du test Rx Blocking de KNX..... 122

Tableau IV-4 : Spectre du signal KNX-RF et du signal d'interférence modulé en 2-FSK..... 123

Tableau IV-5 : Cas d'interférence de KNX-RF avec un signal modulé en 2-ASK..... 124

Tableau IV-6 : Détails sur le nombre de trames, temps d'occupations du canal et nombre de trames perdues..... 130

Tableau IV-7 : Les résultats de simulation d'interférence entre les canaux Fast et Slow..... 131

Tableau IV-8 : Résultats expérimentaux des interférences entre signaux KNX-RF en outdoor..... 132

Tableau IV-9 : Résultats expérimentaux des interférences entre signaux KNX-RF et INOVA en outdoor..... 133

Tableau V-1 : Caractéristiques de la bande 863 – 870 MHz préconisées par La norme ETSI 300 220..... 159

BY-NC-ND

Tableau V-2 : Résumé des faiblesses et propriétés améliorables de KNX-RF et quelques propositions d'améliorations 167

BY-NC-ND

Liste des Publications

Publications dans des journaux internationaux à comité de lecture

[1] (Accepté 2017) S. Oudji, S. Courrèges, J.N. Paillard, V. Meghdadi, M. Pierre
« Radio interference challenges in a multi-protocol compact RF hardware platform for home and building automation applications »
International Journal of Communication Systems (IJCS).

[2] S. Oudji, S. Courrèges, J.N. Paillard, P. Magneron, V. Meghdadi, C. Brauers and R. Kays
« Radiofrequency Interconnection between Smart Grid and Smart Meters Using KNX-RF and 2,4 GHz Standard Protocols for Efficient Home Automation Applications »
Journal of Communications, Volume 10, Numéro 10, pages 812-820, Octobre 2015.

Communications internationales avec proceedings et a comité de lecture

[3] S. Oudji, S. Courrèges, J.-N. Paillard and V. Meghdadi,
« Radio Frequency Robustness Study of the KNX-RF-Multi Standard for Home and Building Applications »
11th Wireless Congress: Systems & Applications, Munich, 12-13 November 2014.

[4] S. Oudji, S. Courrèges, J.N. Paillard, P. Magneron, V. Meghdadi, C. Brauers and R. Kays
« Radiofrequency Interconnection between Smart Grid and Smart Meters Using KNX-RF and 2,4 GHz Standard Protocols for Efficient Home Automation Applications »
5th International Workshop on Communications and Smart Grid (IWCSG), Offenburg, 20-23 Octobre 2015.

[5] S. Oudji, S. Courrèges, J.-N. Paillard and V. Meghdadi
« High Lifetime Performances Of a Full RadioFrequency Battery-Powered System Using the ISO Standard KNX Multi for Home and Building Applications: Heating Systems and Alarms »
12th Wireless Congress: Systems & Applications, Munich, 17-18 November 2015.

[6] S. Oudji, S. Courrèges, J.-N. Paillard and V. Meghdadi
« Battery Lifetime Performances of Radiofrequency Systems Using the ISO Standard KNX-RF Multi and Bluetooth Low Energy for Home Automation Applications »

BY-NC-ND

IEEE International Conference on Consumer Electronics, Las Vegas, 8-11 Janvier 2016.

[7] S. Courrèges, S. Oudji, V. Meghdadi, C. Brauers and R. Kays

« Performance and Interoperability Evaluation of Radiofrequency Home Automation Protocols and Bluetooth Low Energy for Smart Grid and Smart Home Applications »

IEEE International Conference on Consumer Electronics, Las Vegas, 8-11 Janvier 2016.

Communications Nationales

[8] S. Oudji, S. Courrèges, J.-N. Paillard and V. Meghdadi,

« Etude de la Robustesse Radio Fréquences du Standard KNX RF-Multi Dédié à la Domotique »

19èmes Journées Nationales Micro-ondes (JNM), Bordeaux, 2-5 Juin 2015.

BY-NC-ND

Analyse de la robustesse et des améliorations potentielles du protocole radiofréquences Sub-GHz KNX utilisé pour l'IoT domotique

Résumé : Cette thèse aborde la performance du protocole KNX-RF utilisé dans les applications domotiques en termes de robustesse RadioFréquences dans un environnement multi-protocoles potentiellement sujet aux interférences. Dans ces travaux, le but est d'évaluer les problématiques d'interférences rencontrées par KNX-RF en utilisant des modèles de simulation qui permettraient d'augmenter sa fiabilité radio. Ainsi, un premier modèle a été développé sur MATLAB/Simulink et a permis de connaitre les performances et les limitations de ce protocole au niveau de la couche physique dans un scénario d'interférence se produisant à l'intérieur d'une box/gateway domotique multi-protocoles et multi-profils. Ces simulations ont été complétées par des essais expérimentaux sur le terrain qui ont permis de vérifier les résultats obtenus. Un deuxième modèle a été développé pour évaluer les mécanismes de la couche MAC, cette fois-ci, grâce au simulateur OMNet++/MiXiM. Ce modèle reprend tous les mécanismes d'accès au canal et d'agilité en fréquence spécifiés par la norme KNX. Un scénario de collisions de trames a été simulé et plusieurs propositions d'améliorations sont discutées dans ce manuscrit. Les modèles développés permettent d'analyser et de prédire en avance de phase le comportement de KNX-RF dans un environnement radio contraignant.

Mots-clés : communications sans fil, RadioFréquences, interférence, KNX-RF, réseaux de capteurs, home and building automation, mécanismes de robustesse, faible consommation.

Radiofrequency robustness and improvements analysis of the sub-GHz standard KNX used for IoT dedicated to Home & Building Automation

Abstract: This thesis addresses the performance of the KNX-RF protocol used in IoT devices dedicated to home/building automation applications in terms of radiofrequency robustness in a multi-protocol environment that is potentially subject to interferences. In this work, the aim is to assess the interference problems encountered by KNX-RF using simulation models that would increase its RF reliability. Thus, a first model was developed on MATLAB / Simulink and allowed to investigate the performance and limitations of this protocol at its physical layer in an interference scenario occurring inside a multiprotocol home and building automation box/gateway. These simulations were followed by field experimental tests in an indoor environment (house) to verify the results. A second model was developed to evaluate the MAC layer mechanisms of KNX-RF through the discrete event simulator OMNeT ++/Mixim. This model includes all the mechanisms of channel access and frequency agility specified by KNX-RF standard. A frame collision scenario was simulated and several improvement proposals are discussed in this manuscript. The developed models can be used to analyze and predict in advance phase the behavior of KNX-RF in a radio-constrained environment.

Keywords : wireless communication, radiofrequency, interference, KNX-RF, wireless sensor networks, home and building automation, robustness mechanisms, low-power.