



Rapport de Projet de Fin d'Etudes
Juin 2008

**Prise en compte réaliste des performances d'une
interface radio multi-antennes (MIMO) dans un
simulateur de réseaux de capteurs : WSNNet**

Xavier PORTA FICAPAL
Département Télécommunications, Services & Usages

Encadrant: Guillaume Villemaud
Relecteur: Antoine Fraboulet
Président: Nicolas Fournel

Remerciements

Avant de commencer, je souhaite remercier les personnes qui ont rendu ce PFE possible, toutes celles avec qui j'ai travaillé durant ces 12 semaines et celles qui ont accompagné et aidé à valoriser mon expérience.

Je remercie tout particulièrement :

Guillaume VILLEMAUD pour m'avoir accueilli dans son service et pour avoir suivi mon travail en tant que tuteur de PFE.

Je tiens à remercier également Guillaume CHELIUS et Elyes BEN HAMIDA qui m'ont accordé leur aide précieuse et qui m'ont suivi de façon très sérieuse, ce qui m'a permis d'avancer efficacement dans mon projet.

Eduardo MENDEZ: Pour m'avoir aidé avec les éventuels problèmes de codage et surtout pour l'humour qu'il a apporté au laboratoire pendant le déroulement de mon PFE.

Daniel BROUQUET: Pour avoir révisé l'orthographe et la syntaxe de mon rapport et pour avoir répondu à toutes mes questions pendant la rédaction de celui-ci.

Plus généralement, je remercie tous les collègues avec qui j'ai travaillé au sein du laboratoire CITI. Citer les noms serait trop exhaustif mais je remercie vraiment toutes ces personnes pour avoir été ouvertes à mes questions.

1.	Introduction	3
2.	Contexte du projet	4
2.1	Réseaux de capteurs.....	4
2.2	La Technologie MIMO.....	5
2.3	WSNet	6
3.	Organisation et gestion de projet	8
4.	Étude théorique de la technologie MIMO	9
4.1	Diversité spatial	9
4.2	Codage spatio-temporel	10
5.	Canal radio.....	11
5.1	Conclusion. Environnement.	12
6.	Performances du WSNNet	13
6.1	Scenario 1: SISO (single-input and single-output system).....	15
6.1.1	Conclusion. Puissance en réception.....	16
6.1.2	Conclusion. Traitement BER.....	16
6.1.3	Conclusion. Traitement bruit additif	17
6.2	Scenario 2: SIMO (single-input and multiple-output system)	18
6.2.1	Conclusion. BER et Modulation.....	19
6.2.3	Conclusion. Factor 1/M	21
6.3	Scenario 3 : MIMO (Multiple Input, Multiple Output).....	22
6.3.1	Conclusion. Résultats diversité spatiale	23
6.4	Scenario 4 : Simulation globale. BER moyen	24
7.	Rejection d'interférents	26
7.1	SIMO	26
7.2	MIMO.....	27
8.	Conclusion et perspectives	29
	BIBLIOGRAPHIE	30
	ANNEXES	31
	ANNEXE 1 : SIMULATION DES SCENARIOS	31
	ANNEX 2: MODIFICATIONS CODE C. COUCHE RADIO.....	36
	ANNEXE 3 : FICHER XML UTILISÉ. SIMULATION GLOBALE.....	40

1. Introduction

J'ai réalisé mon Projet de fin d'études au sein du laboratoire CITI de l'Insa de Lyon, sous l'encadrement de M. Guillaume Villemaud. L'objectif de mon projet était la prise en compte réaliste des performances d'une interface radio multi-antennes (MIMO) dans un simulateur de réseaux de capteurs.

Avant sa mise en place, le déploiement d'un réseau de capteurs a besoin d'une phase de simulations afin de s'assurer du bon fonctionnement de tous les dispositifs. Le déploiement d'un réseau de capteurs a un coût financier très important. C'est dans cette phase de simulations où interviennent un grand nombre de chercheurs du CITI. Ils sont ceux qui, en travaillant sur le simulateur WSNnet, améliorent ou créent les différents protocoles de communications, les différents environnements, modèles de propagation... ou toutes les autres modifications à réaliser sur les capteurs avant de les implémenter sur ces derniers pour la phase de tests.

Dans le cas particulier de mon PFE, mon travail a été de trouver une implémentation réaliste de l'interface radio en utilisant la technologie MIMO (multiple input, multiple output) sur les capteurs. WSNnet initialement n'était pas conçu pour simuler un système multi-antennes de capteurs, c'est pour ça qu'avant de commencer j'ai dû préparer des scénarios pour voir la manière dont le logiciel gérait l'échange des paquets entre plusieurs antennes. Ensuite, en étudiant les formulations analytiques et statistiques des liens radio il a fallu développer des nouveaux blocs de simulation de canal à intégrer au simulateur WSNnet pour modéliser cette nouvelle technologie.

Après une présentation du contexte dans lequel j'ai travaillé, je m'attacherai à décrire les divers aspects du travail effectué lors de ce PFE et ce qu'il m'a apporté.

2. Contexte du projet

2.1 Réseaux de capteurs

Les réseaux de capteurs sans fil sont une nouvelle technologie qui a surgit après les grands progrès technologiques concernant le développement des capteurs intelligents, des processeurs puissants et des protocoles de communication sans fil, leurs composants de base. Ce type de réseau, composé de centaines ou de milliers d'éléments, a pour but la collecte de données de l'environnement, leur traitement et leur dissémination vers le monde extérieur. Les éléments de réseau, nommés noeuds capteurs, ont de petites dimensions et de sévères contraintes de ressources, notamment énergie, traitement et communication.

Les capteurs sont utilisés dans plusieurs domaines d'application: la surveillance environnementale, le contrôle de la circulation, les opérations militaires et de sécurité, la médecine ... Les réseaux de capteurs doivent remonter une information détectée au niveau d'un capteur vers un noeud de collecte (un puits). La communication entre les capteurs se fait en mode ad-hoc multisautes.

En effet, la transmission d'information entre les capteurs ne peut être assurée directement entre tout couple de capteurs, vue leur batterie limitée (qui entraîne une limite des puissances de transmissions des capteurs). L'information est donc transmise de proche en proche. Les trois fonctions principales (mesure, traitement et communication de l'information) du capteur engendrent une consommation d'énergie. De ce fait, le capteur a une durée de vie limitée.

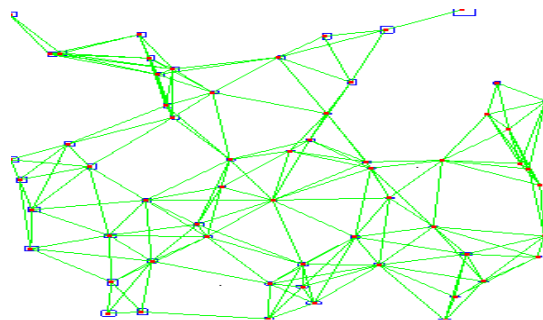


Figure 1 : réseaux de capteurs

Le fait que le déploiement de ces réseaux a un coût relativement important nous porte à l'intérêt des logiciels de simulation. Ces réseaux de capteurs seront simulés avant leur implantation afin d'assurer le bon fonctionnement de leurs dispositifs ou par exemple, du correct fonctionnement des protocoles de communication de ces capteurs. Dans le but de mon PFE, je devrai développer un bloc pour le simulateur WSNET afin de modéliser l'implantation de la technologie MIMO dans un réseau de capteurs.

2.2 La Technologie MIMO

Le MIMO est un protocole de la couche physique. Allié à d'autres technologies, il sera peut être la référence future en terme de communication mobile.

Le MIMO permet d'envoyer plusieurs signaux différents sur des antennes différentes à des fréquences proches pour augmenter le débit ou la portée du réseau. Sa particularité réside donc dans l'utilisation simultanée de plusieurs antennes, émettrices et réceptrices. Ainsi il permet d'améliorer les performances des appareils, qui aujourd'hui connaissent des problèmes liés à la nature des ondes et à leur comportement suivant l'environnement, ce qui diminue la qualité de transmission et donc le débit ainsi que la portée.

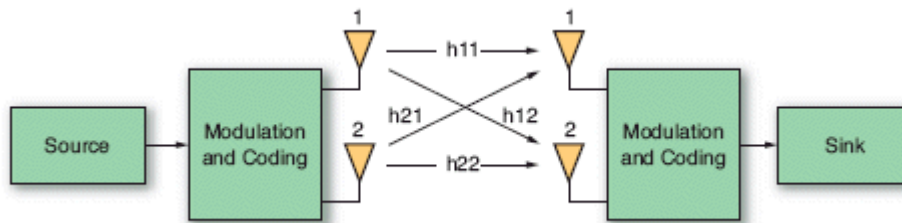


Figure 2 : canal MIMO avec deux antennes en émission et deux en transmission

Si les antennes sont multiples à l'émission, on parle de liaison MISO (Multiple-Input Single Output), et dans le cas inverse de liaison SIMO (Single Input Multiple-Output).

Plus concrètement, dans les cas spécifiques des réseaux de capteurs, à cause de la taille des capteurs il n'est pas possible de mettre un grand nombre d'antennes sur un capteur, mais des systèmes jusqu'à 3 ou 4 antennes en émission et réception semblent envisageables.

Les systèmes MIMO présentent un vaste champ d'étude. Dans la littérature, ces systèmes, pouvant exploiter soit la micro - diversité soit la macro- diversité, font l'objet de nombreux travaux dans le but d'améliorer la qualité de la transmission à travers les canaux radio. Parmi les problématiques existantes, nous allons essayer de traiter : l'estimation du canal, la modélisation des canaux, l'égalisation, le codage spatio-temporel, etc.

2.3 WSNNet

WSNet (*Wireless Sensor Network simulator*) est un simulateur de réseaux de capteurs sans fil créée par Guillaume Chelius en interne au laboratoire CITI . Ce simulateur a été développé en langage C. L'architecture de WSNNet est représentée sous forme de blocs modélisant les propriétés du médium radio et les caractéristiques des noeuds simulés.

On constate l'existence de trois blocs principaux dans WSNNet::

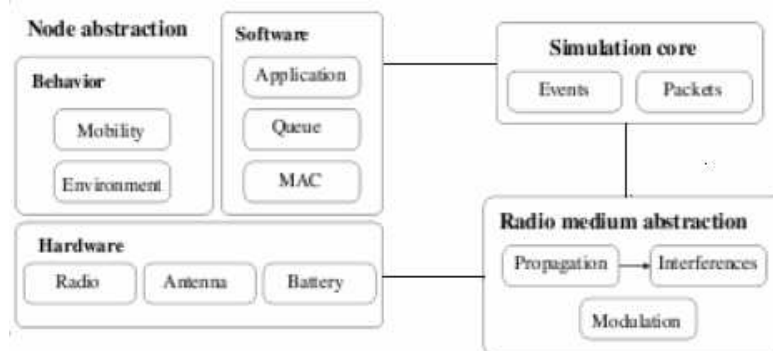


Figure 3 : Architecture de WSNNet

- Le cœur du simulateur, permet de générer et de traiter les événements et les paquets nécessaires lors d'une simulation. Ce composant est un élément clé de la performance d'un simulateur, en ce sens qu'il détermine le degré de rapidité et d'efficacité des simulations.
 - Le médium radio, lui même constitué de plusieurs blocs: propagation, interférences, et modulation.
 - Le nœud, défini par plusieurs blocs également:
 - un bloc comportemental décrivant sa mobilité et l'environnement dans lequel il peut évoluer (feu, obstacles, ...)
 - le hardware listant les propriétés physiques de nœud telle la fréquence d'émission ou réception, la puissance d'émission, ou l'énergie ...
 - la pile protocolaire donnant les couches MAC, routage et applicative utilisées.
- Lors d'une simulation sous WSNNet, le comportement d'un bloc est instancié à l'aide d'un modèle. Un modèle est une implémentation particulière des fonctionnalités d'un bloc.

Lors du lancement d'une simulation sous WSNNet, il est nécessaire de développer un fichier XML de configuration permettant de définir tous les paramètres de la simulation.

Ce fichier contiendra tout d'abord la durée simulée et le nombre de nœuds simulés. Il contiendra d'autres paramètres modélisant le réseau et les nœuds (on peut voir dans l'ANNEXE 3 un exemple de fichier .XML que j'ai utilisé pour réaliser quelques simulations):

- les entités: une entité (radio ou mobilité par exemple) est une instance d'un modèle qui possède sa propre mémoire privée.
- les *bundles*: un bundle est une description d'un ensemble d'entités qui définiront l'architecture interne d'un nœud.
- et les nœuds: un nœud est une instance d'un *bundle* qui possède également sa propre mémoire privée.

Dans le déroulement de mon PFE, j'ai travaillé principalement sur la couche radio. La modélisation de la couche radio est primordiale dans la conception d'un simulateur. Cette couche radio doit être assez précise pour ainsi représenter de manière réaliste les effets de propagation au sein des réseaux sans-fil. La couche radio doit pouvoir ainsi gérer les collisions entre paquets (causées par des transmissions concurrentes ou interférences). Les résultats obtenus lors d'une simulation dépendront forcément du modèle radio (*propagation, interférences, modulation*) choisi. Si le modèle radio est simpliste, ceci peut donner lieu des résultats de simulation complètement aberrants par rapport à la réalité.

Dans cette perspective, les simulateurs implémentent 3 principaux modules:

- Le module de transmission qui définit la puissance émise, la fréquence, le débit, ainsi que d'autres paramètres de transmission.
- Le module de propagation qui calcule la puissance de réception à partir des paramètres de transmission, de la distance et des modèles de propagation implémentés (**déterministe**: *freespace* ; ou **probabiliste**: en considérant les phénomènes de fading et de shadowing).
- Le module de réception qui décide ou non de la réception d'un paquet, de la présence d'erreurs, et de l'état du lien radio, en se basant sur la puissance de réception (filtre en réception, sensibilité de l'antenne ...) et les opérations de calcul du SINR (*Signal to Interference and Noise Ratio*) et du BER (*Bit Error Rate*).

3. Organisation et gestion de projet

Le planning que nous avons défini au départ a été globalement respecté. Mon projet de fin d'études a duré 12 semaines. Cependant, la phase de réalisation n'a pas pu être complétée comme elle avait été prévue. Voici le diagramme de Gantt, sur la figure 4, correspondant aux tâches et réalisations effectuées durant cette période :

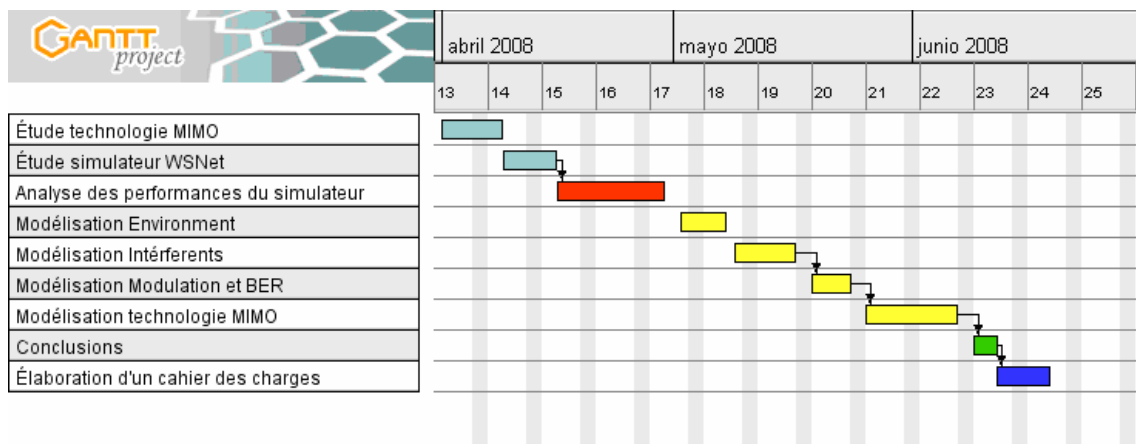


Figure 4 : Diagramme de Gantt

Le diagramme de GANTT ci-dessus présente la subdivision du PFE.

Durant ce travail de planification, plusieurs tâches principales ont été identifiées :
En gros on peut les découper en :

- Etude théorique
- Analyse des performances du simulateur
- Réalisation

4. Étude théorique de la technologie MIMO

Dû aux multiples antennes en émission et réception qu'on utilise avec la technologie MIMO, on peut bénéficier de la diversité spatiale pour améliorer le canal, avec un signal plus fort et des transmissions plus rapides. Au-delà de la diversité spatiale, les émetteurs MIMO utilisent différents signaux qui sont modulés et transmis simultanément par plusieurs antennes en émission en utilisant le même canal de fréquence.

Dans ce PFE nous parlerons particulièrement des systèmes MIMO de micro-diversité : étant donné que nous travaillons sur l'implantation de cette technologie dans des réseaux de capteurs, ce sont des systèmes à antennes multiples à l'émission et à la réception, contrairement aux systèmes MIMO de macro-diversité où les antennes émettrices et réceptrices sont localisées sur des terminaux distants.

4.1 Diversité spatiale

Dans cette étude théorique est expliqué comment mettre en relation le BER du paquet reçu en réception avec son SiNR (Signal to Interférence plus Noise Ratio). La durée de mon PFE m'a contraint à travailler principalement dans le cas de la diversité spatiale, sans application de codage. Voici l'étude théorique de ce cas de figure.

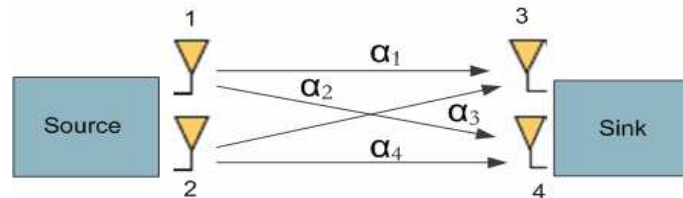


Figure 5 : Diversité spatiale avec deux antennes en réception

$$\begin{aligned}
 SiNR_{13} &= \frac{P_{13}}{N + P_{23} + I} \\
 SiNR_{14} &= \frac{P_{14}}{N + P_{24} + I} \\
 \Rightarrow SiNR_{1i} &= \frac{\sum P_{1,i}}{N + \sum P_{2,i} + I} \Rightarrow BER_1 = f(SiNR_{1i})
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 SiNR_{23} &= \frac{P_{23}}{N + P_{13} + I} \\
 SiNR_{24} &= \frac{P_{24}}{N + P_{14} + I} \\
 \Rightarrow SiNR_{2i} &= \frac{\sum P_{2,i}}{N + \sum P_{1,i} + I} \Rightarrow BER_2 = f(SiNR_{2i})
 \end{aligned}$$

Pour calculer le BER à partir de la SiNR il faudra appliquer l'expression adéquate en fonction de la modulation que l'on utilise. On obtient un BER total après la réception du paquet depuis les deux antennes en réception. A niveau du simulateur quand on aura calculé ses paramètres on va transmettre ce paquet avec les nouveaux paramètres de BER et SiNR au prochain node. Avec ça on obtiendra une première idée de comment modéliser une réception multi-antenne.

4.2 Codage spatio-temporel

Dans le cas où l'émetteur est muni de N antennes réceptrices, nous devons définir quel est le traitement mapping nécessaire à appliquer aux signaux avant de les émettre sur les antennes émission. Ce traitement supplémentaire de part et d'autre du canal radio, mappeur/démappeur, est spécifique aux systèmes MISO et plus généralement MIMO

Généralement les performances des codes ST se mesurent en terme de BER en fonction du SNR. Pour de grandes valeurs du SNR, la probabilité d'erreur moyenne d'une transmission de données à travers un canal de communication est donnée par (en utilisant une modulation BPSK) :

$$BER = G_c SNR^{(-G_d)}$$

où G_c et G_d désignent respectivement le gain de codage et le gain de diversité du système. Au niveau du simulateur WSNNet nous allons considérer le gain de diversité d'un système MIMO au meilleur des cas, ça veut dire égal à $M*N$ puisque $N \leq M$. Par rapport au gain de codage, dans le simulateur on utilisera un codage d'Alamouti.

Si nous traçons la courbe de variation du taux d'erreur BER en fonction du SNR dans une base logarithmique, l'ordre de diversité peut être expliqué par la pente de la courbe obtenue, alors que le gain de codage peut se lire dans la position horizontale de la courbe.

Dans une dernière étape il faudrait traiter le cas des codes spatio-temporels adaptés au système MIMO en utilisant la modulation OFDM. Même si je n'aurai pas le temps de le traiter pendant mon PFE, je présenterai une étude théorique. Les codes proposés tentent de profiter de la diversité fréquentielle dans un système utilisant la modulation OFDM afin de réduire le nombre d'antennes utilisées. Ce qui revient à remplacer la diversité spatiale par la diversité fréquentielle.

5. Canal radio

Le premier aspect à prendre en compte dans la modélisation est de définir les performances du canal de transmission.

Les systèmes de communication sans-fils, et par conséquent les réseaux de capteurs sont limités en performances et en capacité principalement à cause de deux facteurs liés au canal de transmission :

Bruit additif aussi appelé bruit thermique, il est l'un des problèmes les plus communément rencontrés dans tous les problèmes de transmission à travers des canaux physiques. Il est généré par les composants internes du système de communication, et principalement par le bloc radio fréquence RFFE (Radio Frequency Front-End) du récepteur.

Évanouissements et propagation à trajets multiples un signal émis par une antenne radio se propage soit dans toutes les directions (si l'antenne est omnidirectionnelle), soit dans un ensemble de directions bien précis, si l'antenne est directive. Le signal émis subit des réflexions, des réfractions, des diffusions autour des réflecteurs se trouvant dans l'environnement de propagation entre la source et la destination. Comme exemples des objets réflecteurs, nous citons les bâtiments, les arbres, les voitures, pour l'environnement d'extérieur, sinon pour l'intérieur, nous citons les meubles, les murs, les personnes. Ainsi, le récepteur voit des versions multiples du signal émis, de puissances atténuées et avec certains retards.

En comparant le retard de propagation global des trajets multiples vu par le récepteur du signal émis avec la période symbole, les canaux radio sont classés en deux types. Dans le cas où le retard de propagation des trajets multiples est inférieur à la période symbole, le récepteur est capable de distinguer un seul trajet de propagation, ainsi le canal est dit non-sélectif en fréquence, i.e. Toutes les composantes spectrales du signal émis sont affectées de la même façon par le canal. Puis la nature des atténuations vues des différentes antennes de réception sont supposées indépendantes et suivent une loi de Rayleigh. Cette distribution de Rayleigh est dû au fait que la somme des différents trajets de propagation (avec des retards de phase et des atténuations différentes), lorsque le nombre de trajets est très élevé, approche une variable aléatoire Gaussienne complexe, dont la partie réelle et la partie imaginaire sont indépendantes avec des moyennes nulles et des variances égales.

Nous avons fait une simulation en utilisant un modèle de propagation de shadowing, totalement aléatoire, pour voir l'atténuation avec laquelle on reçoit les différents paquets.

194091320, node 0, Tx end pkt 1, antenna 3, puissance en émission 10.000000 dBm

194277502, node 1, Rx end pkt 1, antenna_RX 3, antenna_TX 3, puissance en réception -53.383390 dBm

194287502, node 0, Tx end pkt 2, antenna 3, puissance en émission 10.000000 dBm

194450420, node 1, Rx end pkt 2, antenna_RX 3, antenna_TX 3, puissance en réception -44.267740 dBm

J'ai pris un échantillonnage de deux paquets pour montrer que l'atténuation avec laquelle on reçoit les paquets est importante. Ça veut dire qu'avec ces paramétrages d'atténuation, ce modèle de shadowing pourrait bien simuler les évanouissements et les trajets multiples qu'on vient de voir.

5.1 Conclusion. Environnement.

Afin de modéliser cet environnement (un environnement multi-trajet RAYLEIGH) pour WSNNet, il y a deux choses à prendre en compte. D'un côté, pour le calcul de la SiNR en réception on va s'intéresser seulement à l'atténuation du signal reçu. Ça veut dire qu'on pourrait bien utiliser le modèle de propagation de shadowing bien paramétré pour obtenir des atténuations importantes en réception. De l'autre côté, comme on peut le voir sur le graphique ci-dessous, pour calculer le BER il faudra appliquer l'environnement Rayleigh. Donc le BER obtient des valeurs différentes en fonction de l'environnement.

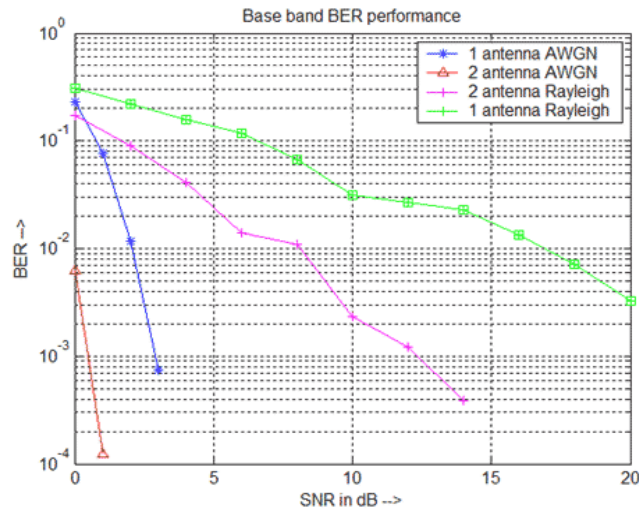


Figure 6 : Diversité spatiale avec deux antennes en réception

6. Performances du WSNNet

Afin que le simulateur WSNNet gère toutes ces situations, il faut introduire certaines modifications au logiciel. Le but de mon PFE a donc été de commencer à travailler sur celles là.

Dû au fait que le simulateur WSNNet n'avait pas été pensé pour mettre plusieurs antennes sur les capteurs, j'ai proposé plusieurs scénarios, d'abord pour pouvoir étudier son comportement et plus tard pour analyser les améliorations qu'il faut ajouter au simulateur afin de modéliser correctement la technologie MIMO. Dans ses différents scénarios, je vais faire spécial attention au calcul de la SNR/SINR des paquets au node de réception.

Pour faciliter les choses et à cause de l'impossibilité de modifier le cœur de WSNNet, les calculs et modifications sur le logiciel WSNNet effectués pour obtenir ses simulations ont tous été effectués à la couche radio, en modifiant le fichier halfd.c. Par exemple, j'ai calculé le BER totale du système multi-antennes directement dans la fonction de « réception de paquet » de la couche radio à la place de modifier le fichier noise.c auquel ce paramètre correspondait.

Avec ses simulations je prétends montrer les principaux problèmes rencontrés dans l'étude MIMO par rapport à WSNNet et les valeurs approximatives qu'on devra attendre de l'implémentation définitive qui sera prise en compte par Guillaume Chelius.

Considérations par rapport aux simulations :

Dans tous les cas je vais utiliser un modèle de propagation shadowing complètement aléatoire, qui va nous donner des puissances différentes en réception à chaque simulation. J'utilise également une puissance d'émission de 0 à 10 dBm, en accord avec le modèle de capteur que l'on utilise au simulateur le wsn430 dont le processeur est le C1100.

Dans les simulations où j'ai utilisé un système multi-antennes, afin de faciliter les calculs et la compréhension des résultats, j'ai fait toutes les simulations avec deux antennes en réception.

Toutes les simulations que je vous présente par la suite sont calculées pour l'envoi ou la réception d'une seule trame. C'est pour cela que parfois les valeurs que l'on trouve sont des valeurs extrêmes. Dans tous les cas où l'on utilise deux ou plus d'antennes, on va les considérer decorréliées entre elles.

Après chaque simulation, j'explique les résultats obtenus et je présente une petite conclusion pour voir le problème détecté en l'implémentation du système multi-antenne par rapport à WSNNet. et comment nous les avons résolu.

Le format avec lequel je présente les différentes simulations réalisées, est le suivant :

- **En émission :**

(1) 194091320, (2) node 0, (3) Tx end pkt 1, (4) antenna 3, (5) puissance en émission 10.000000

- (1) Instant de l'émission*
- (2) Node émetteur*
- (3) Paquet transmis*
- (4) Antenne émetteur*
- (5) Puissance d'émission.*

- **En réception :**

(1) 194450420, (2) node 0, (3) Rx end pkt 2, (4) antenna_RX 3, (5) antenna_TX 3, (5) puissance en reception - 46.266940, (6) noise 0.000000, (7) (BER 0.000000)

- (1) Instant de réception*
- (2) Node récepteur*
- (3) Id Paquet reçu*
- (4) Antenne/s récepteurs*
- (5) Puissance reçue en réception (à cause du modèle de shadowing aléatoire qu'on utilise)*
- (6) Bruit total ajouté au paquet reçu, et*
- (7) Éventuellement le BER, le PER et la SiNR totale du paquet.*

6.1 Scenario 1: SISO (single-input and single-output system)

Ce cas est le plus simple et il est déjà parfaitement géré par le simulateur Wsnet. Cependant, je vais l'expliquer de manière détaillée afin de mieux comprendre la réponse du simulateur quand on y ajoutera plusieurs antennes.

D'abord je vous montre une simulation (voir ANNEXE 1.1), une transmission entre deux nodes, avec une antenne en émission et une autre en réception. On considère dans ce cas initial un bruit par paquet égal à zéro.

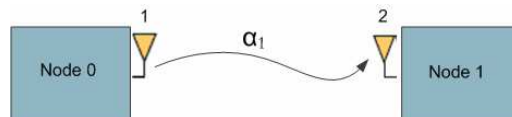


Figure 7 : Cas SISO. Une antenne en émission et une antenne en réception

194091320, node 0, Tx end pkt 1, antenna 3, puissance en émission 10.000000

194277502, node 1, Rx end pkt 1, antenna_RX 3, antenna_TX 3, puissance en reception -54.326390, noise 0.000000, (BER 0.000000)

194287502, node 1, Tx end pkt 2, antenna 3, puissance en émission 10.000000

194450420, node 0, Rx end pkt 2, antenna_RX 3, antenna_TX 3, puissance en reception -46.266940, noise 0.000000, (BER 0.000000)

Comme cette première simulation nous le montre, sans bruit et sans signal interférent, on obtient un BER = 0 et par conséquent un PER = 0 en réception.

6.1.1 Conclusion. Puissance en réception

Ce cas totalement idéal, nous permet juste de voir comment en appliquant un modèle de propagation de shadowing, totalement aléatoire, on obtient des puissances en réception très différentes. Par ailleurs, on obtient un BER = 0 comme on l'attendait.

Pour avancer dans cette première étude j'ai préparé deux fichiers XML, pour simuler d'un côté un scenario avec deux nodes et de l'autre côté un deuxième scenario avec plusieurs nodes pour noter l'influence des signaux interférents (voir ANNEXE 1.2):

Dans le premier cas, les paquets qui arrivent en réception ont seulement du bruit additif dans le champ noise. Cela nous permet de calculer la SNR directement comme P/N. Il faut noter qu'on utilise un modèle complètement aléatoire de propagation qui nous donne des puissances en réception aléatoires et par conséquent un BER aléatoire aussi.

*338545535, node 1, Tx end pkt 1, antenna 4, puissance en émission 0.000000 dBm
338731871, node 0, Rx end pkt 1, antenna_RX 4, antenna_TX 4, puissance en reception -74.735108dBm,
0.00000033612(mW), noise -80.000000dBm (0.00000010000mW), **BER 0.000122853653***

*338741871, node 0, Tx end pkt 2, antenna 4, puissance en émission 0.000000 dBm
338904943, node 1, Rx end pkt 2, antenna_RX 4, antenna_TX 4, puissance en reception -70.993932dBm,
0.000000079544(mW), noise -80.000000dBm (0.00000010000mW), **BER 0.00000008468***

6.1.2 Conclusion. Traitement BER

Ce cas, presque idéal aussi, nous permet de voir comment effectivement lorsque l'on ajoute du bruit additif le BER empire. Ça nous indique qu'avec la réception multiple d'un paquet, quand on calculera le SNR total il ne faudra comptabiliser le bruit qu'une seule fois si on veut obtenir une modélisation réaliste.

La simulation suivante nous montre comment répond le simulateur avec des signaux interférents. Comme dans un réseau de capteurs, nous utilisons des antennes omnidirectionnelles. Ça veut dire, que lorsqu'une antenne envoie, elle envoie à plusieurs nodes en même temps. À cause de ça, on aura régulièrement des interférents qui vont brouiller le signal utile.

Pour voir que je viens d'expliquer, dans le simulateur WSNNet, on présente un scénario avec 100 nodes, ces 100 nodes transmettent de façon aléatoire. On étudie le comportement sur le node 0 et en fonction du node qui transmet on aura un niveau d'interférence (noise) plus ou moins élevé qui s'ajoutera au bruit blanc (-85dBm):

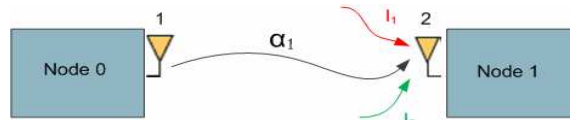


Figure 8 : SISO avec des interférents.

203756469, node 0, Rx end pkt 123, antenna_RX 4, antenna_TX 4, puissance en reception -73.516728, noise - 64.680325dBm, **BER 0.234803363984**

203765428, node 0, Rx end pkt 124, antenna_RX 4, antenna_TX 4, puissance en reception -69.112786, noise - 63.502807dBm, **BER 0.147224936947**

Même s'il n'est pas possible de comparer exactement les BER obtenus dans les deux derniers cas à cause du caractère aléatoire des puissances reçues en réception (on applique un modèle de shadowing aléatoire), on peut voir comment le BER a augmenté quand on y a ajouté le signal interférent.

6.1.3 Conclusion. Traitement bruit additif

Dans cette dernière simulation on peut déjà repérer un premier problème qu'on va trouver en l'implémentation d'un système multi-antenne en WSNNet. Par rapport au fonctionnement actuel du WSNNet, chaque paquet, quand il arrive en réception a un bruit totale. Ce bruit total est constitué à partir du bruit des signaux interférents et du bruit blanc additif.

Wsnnet présente ce bruit total dans le paquet en réception, de façon qu'on ne peut pas isoler le bruit blanc du bruit causé par les interférents. Ça va nous poser des problèmes dans le traitement multi-antennes, donc comme nous avons déjà avancé dans le calcul total du SiNR d'un paquet reçu par plusieurs antennes, nous ne devons comptabiliser qu'une seule fois le bruit additif.

Pour répondre à ce problème, il faudra enlever (N-1) fois le bruit additif du calcul total du signal interférent total d'un paquet, où N est le nombre d'antennes en réception c'est-à-dire que N est aussi le nombre de fois que l'on reçoit un même paquet.

6.2 Scenario 2: SIMO (single-input and multiple-output system)

La technologie SIMO est constituée par une antenne en émission et plusieurs antennes en réception.

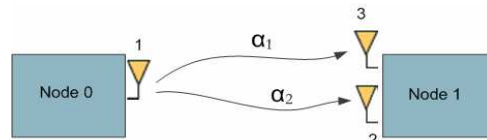


Figure 9 : SIMO avec deux antennes en réception

simulation 1:

462133492, node 0, Rx end pkt 339, antenna_RX 4, antenna_TX 4, puissance en reception -76.940513, noise -80.000000dBm

462133492, node 0, Rx end pkt 339, antenna_RX 5, antenna_TX 4, puissance en reception -70.633611, noise -80.000000dBm

SINR = 10,27973 dB

BER total packet 339 = 0,02344

simulation 2:

462267120, node 0, Rx end pkt 340, antenna_RX 4, antenna_TX 4, puissance en reception -77.319808, noise -75.195934dBm, **BER 0.058655508844**

462267120, node 0, Rx end pkt 340, antenna_RX 5, antenna_TX 4, puissance en reception -76.240466, noise -70.158108dBm, **BER 0.160375661388**

SINR = -4,40535 dB

BER total packet 340 = 0,68940

Si on regarde attentivement les résultats de la simulation que je vous ai affiché ci-dessus on peut constater que j'ai pris une valeur maximum et une valeur minimum de la valeur du BER. Si on regarde la simulation 1, on peut voir comment au moment de la réception du paquet aucun autre node n'est en train de transmettre de manière à ce que l'unique noise ajouté au paquet en réception soit le bruit additif. On trouve alors un BER total du paquet reçu très performant.

Par contre, la simulation 2 est prise quand la valeur des interférents sur le node où l'on étudie la réception est maximale. Cela nous donne un BER qui n'est pas du tout performant, car avec une valeur supérieure à 0.5. Pour obtenir une valeur réaliste il faudrait faire une moyenne de tous les BER obtenus sur l'envoi des plusieurs trames.

6.2.1 Conclusion. BER et Modulation

Dans ce deuxième scénario on se rend compte que WSNNet réalise le calcul du BER avant que le paquet soit reçu. Quand le paquet arrive en réception, on regarde la structure du paquet pour voir que le BER est déjà calculé en fonction de la modulation utilisée. Maintenant, pour notre traitement multi-antennes, on devra calculer le BER en fonction du SiNR total, une fois qu'on aura reçu tous les paquets.

Comme nous l'avons décidé avec Guillaume Chelius la solution proposée pour résoudre ce problème est la création d'une fonction `calcul_BER(modulation, SiNRtotale)`. Comme on le montre plus clairement dans l'étude théorique, une fois qu'on aura reçu tous les paquets, en fonction du nombre d'antennes en émission et en réception, on calculera le SiNR total pour le passer tout de suite à la fonction `calcul_BER` qui en appliquant la modulation adéquate va nous retourner la valeur totale de probabilité d'erreur par paquet en utilisant une multi-réception.

Il y a plusieurs aspects importants à prendre en compte dans le traitement des paquets en réception en utilisant la technologie SIMO et qui seront plus tard utilisés aussi dans la technologie MIMO. Je vais commencer par expliquer comment nous allons traiter les paquets reçus plusieurs fois au node de réception et je vais surtout remarquer les changements qu'il faut appliquer au le simulateur WSNNet.

L'idée est de fusionner les puissances des paquets reçus en réception, comme on peut le voir avec les calculs ci-dessous. On calculera le SINR total du paquet en réception, à partir de ce SINR et de la modulation utilisée on calculera le BER. Après, nous allons envoyer le paquet reçu avec le nouveau BER, qui sera meilleur que sans utiliser SIMO.

J'ai préparé un scénario pour montrer un peu comment le logiciel est capable de calculer un et un BER en réception à partir des deux paquets reçus. Ce scénario est constitué de 100 nodes. On va analyser la transmission des paquets entre deux nodes avec les interférences créées par les autres, qui vont éventuellement transmettre en même temps:

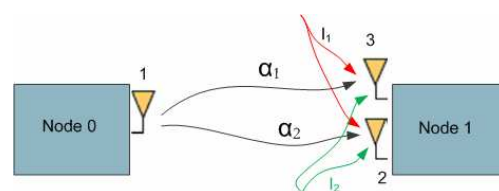


Figure 10 : SIMO avec des interférents

```
462267120, node 0, Rx end pkt 340, antenna_RX 4, antenna_TX 4, puissance en reception -77.319808, (
0.000000018536mW), noise -75.195934dBm 0.000000030228mW, B
462267120, node 0, Rx end pkt 340, antenna_RX 5, antenna_TX 4, puissance en reception -76.240466, (
0.000000023766mW), noise -70.158108dBm 0.000000096425mW, BER 0.160375661388
```

SIMO (même paquet envoyer plusieurs fois)

Un cas particulier de la technologie SIMO, c'est quand on a plusieurs antennes en émission mais toutes envoient le même paquet avec la même modulation. Ça veut dire qu'on obtient plusieurs fois le même paquet en réception.

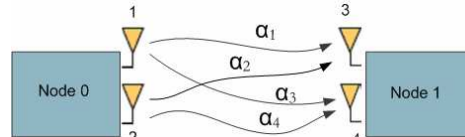


Figure 11 : SIMO. Plusieurs antennes envoient le même paquet

Au niveau analytique, comme on peut le voir dans les expressions ci-dessous, quand on envoie plusieurs fois le même paquet il faut faire attention, car la puissance d'émission de chaque paquet se divise entre le nombre total d'antennes en émission. Dans le cas que nous simulons $M=2$.

$$\begin{aligned}
 SiNR_3 &= \frac{P_{13} + P_{23}}{N + \sum I} \\
 SiNR_4 &= \frac{P_{14} + P_{24}}{N + \sum I}
 \end{aligned}
 \longrightarrow
 SiNR_{TOTAL} = \frac{\frac{1}{M} \sum P}{N + \sum I}$$

Par rapport au simulateur Wsnnet, pour prendre en compte cette particularité, il faudra introduire ce facteur $1/M$ (M est le nombre d'antennes en émission) au total de la puissance reçue utilisée pour calculer la SiNR. Pour entrer plus en détail, il faudrait regarder le champ identificateur de chaque paquet en réception et si les paquets envoyés ont le même id, introduire le facteur $1/M$ au totale de la somme des puissances reçues.

Voici une simulation avec WSNnet (voir la simulation complète dans l'ANNEXE 1.3) sans signal interférent, juste pour voir le comportement du simulateur quand les différentes antennes en émission envoient le même packet.

843556719, node 1, Tx end pkt 1, antenna 5, puissance en émission 0.000000 dBm
 843556719, node 1, Tx end pkt 1, antenna 4, puissance en émission 0.000000 dBm

843743050, node 0, Rx end pkt 1, antenna_RX 4, antenna_TX 5, puissance en reception -71.375337dBm,
 noise -85.000000dBm,
 843743050, node 0, Rx end pkt 1, antenna_RX 5, antenna_TX 5, puissance en reception -69.197453dBm,
 noise -85.000000dBm
 843743050, node 0, Rx end pkt 1, antenna_RX 4, antenna_TX 4, puissance en reception -74.374370dBm,
 noise -85.000000dBm
 843743050, node 0, Rx end pkt 1, antenna_RX 5, antenna_TX 4, puissance en reception -65.287303dBm,
 noise -85.000000dBm

SINR = 14.196756 dB

BER total packet 1 = 0.004756

On remarque que les paquets envoyés en transmission ont le même Id. Comme on s'y attendait on obtient des valeurs de BER très acceptables en utilisant cette technique.

6.2.3 Conclusion. Factor 1/M

Il faudra aussi que WNet soit capable de gérer ce cas particulier de SIMO lorsque l'on aura plusieurs antennes en émission envoyant le même paquet. Dans ce cas il faudra juste introduire un facteur $1/M$ (M est le nombre d'antennes en émission) qui multipliera la SiNR obtenue en réception.

6.3 Scenario 3 : MIMO (Multiple Input, Multiple Output)

Pour expliquer comment introduire la technologie SIMO/MIMO dans le simulateur Wsnet, je présente comment on applique les calculs théoriques que l'on a vu à la modélisation dans le simulateur.

On considère un système MIMO où chaque antenne d'émission envoie un paquet différent (avec un Id différent) aux antennes de réception. Une fois les différents paquets arrivés en réception, on calcule la SiNR de chaque paquet, ces paquets seront différents en fonction de l'antenne de transmission, par conséquent ils auront une SiNR différente. On considère les autres paquets comme signal interférent. A partir de cette SiNR on pourra calculer le BER et le PER en réception.

Pour adapter ça au Wsnet, pour transmettre un paquet, avec le nouveau BER, on devra modifier le champ PER du paquet (on peut voir la structure complète du paquet à l'ANNEXE 4) avant de le transmettre au node suivant. Avec ça on arrive à simuler le comportement de la technologie MIMO dans un réseau de capteurs. On envoie un paquet d'un capteur à l'autre avec un BER meilleur que sans utiliser cette technologie.

Dans le scénario suivant, on vous montre un exemple 2x2 pour voir d'une façon plus claire ce que je viens de présenter (On peut voir plus de simulations dans l'ANNEXE 1.4) :

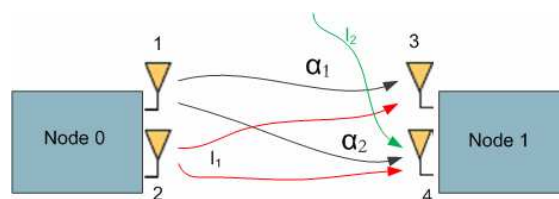


Figure 13 : Deux nodes envoient au même temps. BER moyen

804499575, node 0, Tx end pkt 2, antenna 5, puissance en émission 0.000000 dBm
 804499575, node 0, Tx end pkt 1, antenna 4, puissance en émission 0.000000 dBm

804685980, node 1, Rx end pkt 2, antenna_RX 4, antenna_TX 5, puissance en reception -66.982058,
 (0.000000200352mW), noise -65.393555dBm

804685980, node 1, Rx end pkt 2, antenna_RX 5, antenna_TX 5, puissance en reception -69.709563,
 (0.000000106916mW), noise -67.318290dBm

SINR total packet 2 = -1.884963 dB

BER total packet 2 = 0.385866

804685980, node 1, Rx end pkt 1, antenna_RX 4, antenna_TX 4, puissance en reception -65.441366
 (0.000000285669 mW), noise -66.914046dBm

804685980, node 1, Rx end pkt 1, antenna_RX 5, antenna_TX 4, puissance en reception -67.392994,
 (0.000000182264mW), noise -69.582975dBm

SINR total packet 1= 1,73817 dB

BER total packet 1 = 0,167541

6.3.1 Conclusion. Résultats diversité spatiale

Avec ce scénario nous avons terminé la première partie de la modélisation de la technologie MIMO dans le simulateur WSNNet. Nous avons seulement considéré la diversité spatiale, sans appliquer les calculs montrés au point 2 pour le codage spatio-temporel. En résumé, on calcule la SiNR de chaque paquet qui arrive depuis les deux (ou plus) antennes. En appliquant la modulation qu'on utilise (BPSK, QAM...) on pourra calculer le BER total du paquet. Avec les nouvelles valeurs de SiNR et de BER le paquet reçu sera envoyé au prochain node.

6.4 Scenario 4 : Simulation globale. BER moyen

Jusqu'à maintenant toutes les simulations présentées montraient la réception d'un paquet à un instant déterminé. Dans cette dernière simulation je veux vous montrer les valeurs moyennes du BER reçu par les paquets.

Pour faire ça j'ai préparé un scénario avec 15 nodes. Deux nodes vont transmettre presque simultanément des trames des paquets, de façon à ce que 5 paquets aient un signal interférent plus élevé. Comme ça nous aurons une approximation beaucoup plus réaliste, des interférents entre eux. Pour modéliser le traitement d'interférences en réception, je vais mettre une seule antenne pour l'émission des nodes 0 et 2. Avec ça, on suppose que le signal reçu depuis l'autre antenne est effacé (réjection d'interférence).

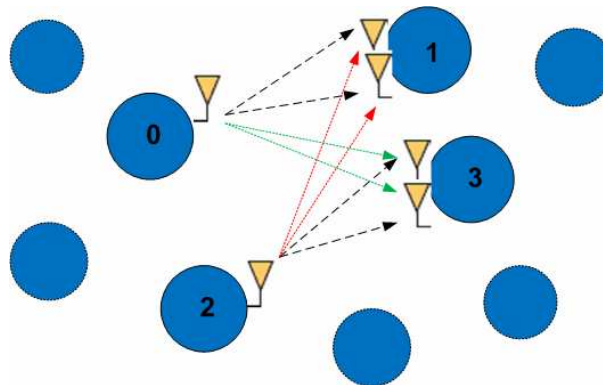


Figure 14 : Deux nodes envoient au même temps. BER moyen

Dans cette simulation j'essaie de montrer un cas réaliste. Le node 0 envoie 10 paquets au node 1. Quand le node 0 commence à envoyer, il s'aperçoit que le node 2 était aussi en train d'envoyer, ce qui crée des interférences importantes. Immédiatement le node 2 cesse son émission, et comme on peut voir avec la simulation totale que j'ai mise dans l'ANNEXE 1.5, le signal interférent diminue.

On peut voir ci-dessous, comment lorsque le node 2 cesse d'émettre le BER des paquets envoyés par le node1 devient meilleur.

Simulation 2 : le node 2 est en train de transmettre :

```
817242578, node 0, Tx end pkt 67287, antenna 4, puissance en Émission 0.000000 dBm
817428856, node 1, Rx end pkt 67287, antenna_RX 4, antenna_TX 4, puissance en reception -63.373242,
noise -72.791783dBm
817428856, node 1, Rx end pkt 67287, antenna_RX 5, antenna_TX 4, puissance en reception -67.900924,
noise -74.187499dBm
BER total packet 67287 = 0,036454
```

Simulation 1 : le node 2 ne transmet plus :

831140284, node 0, Tx end pkt 68428, antenna 4, puissance en Transmission 0.000000 dBm
837235618, node 1, Rx end pkt 68428, antenna_RX 4, antenna_TX 4, puissance en reception -63.194234
noise -85.000000dBm
837235618, node 1, Rx end pkt 68428, antenna_RX 5, antenna_TX 4, puissance en reception -66.462036,
noise -85.000000dBm
BER total packet 68428 = 0,00112

On note que lorsque le niveau d'interférence augmente le BER empire.
Pour voir la performance réelle de la technologie MIMO dans l'envoi de trames du node 0 au node 1, on fait la moyenne des BER obtenus pour la réception des 10 paquets. On obtient un BER de 0,03. À cause du modèle de propagation, il y a une trame qui arrive avec un BER de 0,24. C'est à cause de ce BER que la moyenne totale n'est pas bien meilleure.

J'ai mis dans l'ANNEXE 3 le fichier XML contenant toute la configuration utilisée pour réaliser cette simulation. Conjointement j'ai mis la simulation complète avec les valeurs de toutes les réceptions.

7. Rejection d'interférents

Un autre facteur à prendre en compte dans le simulateur est le traitement des interférences. De plus, les systèmes de brouillage deviennent de plus en plus intelligents. Les antennes adaptatives présentent une solution intéressante pour remédier aux brouillages ou interférences dans les systèmes de communion.

L'utilisation des antennes intelligentes (smart antenne) permet la rejection des interférents. Cela permet effacer des interférents afin d'augmenter la SiNR. L'utilisation de ces antennes, est un autre facteur qu'on veut modéliser conjointement à la technologie MIMO.

Ces antennes intelligentes permettent d'effacer un ou plusieurs signaux interférents. Dans le cas du simulateur Wsnet, afin de faciliter les choses on va enlever seulement l'interférent le plus élevé. Avec ça on pourra déjà obtenir une très bonne approximation de ce qu'il se passe en réalité.

7.1 SIMO

Dans le cas SIMO que nous sommes en train d'étudier, avec des antennes multiples en réception, pour choisir l'interférent le plus grand à enlever il faudra considérer la somme de ce signal interférent sur toutes les antennes en réception.

On présente le traitement de ce signal interférent en les calculs suivants:

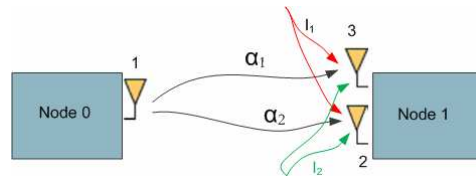


Figure 15 : SIMO avec des interferents

On considère dans les calculs ci-dessous que l'Interférent 1 est la maxime interférent sur le système.

$$SiNR_{TOTALE} = \frac{P_{13} + P_{12}}{N + I_1 + I_2} \xrightarrow{\text{avec rejection d'interferents}} \frac{P_{13} + P_{12}}{N + I_1 + I_2 - I_1} \Rightarrow \frac{P_{13} + P_{12}}{N + I_2}$$

Conclusion

Conjointement au traitement SIMO/MIMO on va appliquer au simulateur l'utilisation des antennes intelligentes. On va modéliser cet effet en enlevant les plus forts interférents sur les antennes en réception.

7.2 MIMO

Dans la suite j'ai traité la particularité de la gestion de ces interférents lorsque l'on utilise la technologie MIMO. L'idée est exactement la même que celle expliquée au-dessus mais avec la particularité que maintenant on considère le signal interférent le plus important, celui qui est envoyé par l'antenne du node qui a envoyé le signal utile.

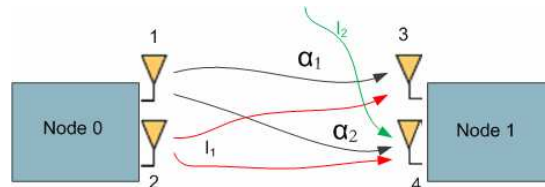


Figure 16 : MIMO avec des interférents

$$SiNR_{13} = \frac{P_{13}}{N + P_{23} + I} \Rightarrow \frac{P_{13}}{N + P_{23} + I - P_{23}} \rightarrow \frac{P_{13}}{N + I}$$

$$SiNR_{14} = \frac{P_{14}}{N + P_{24} + I} \Rightarrow \frac{P_{14}}{N + P_{24} + I - P_{24}} \rightarrow \frac{P_{14}}{N + I}$$

81625667, node 0, Tx end pkt 1213, antenna 5, puissance en émission 0.000000 dBm

81625667, node 0, Tx end pkt 1212, antenna 4, puissance en émission 0.000000 dBm

81811994, node 1, Rx end pkt 1213, antenna_RX 4, antenna_TX 5, puissance en reception -75.049076, noise -52.273555dBm

signal rejeté = -67.031389 SINR packet 1213 = dB

81811994, node 1, Rx end pkt 1213, antenna_RX 5, antenna_TX 5, puissance en reception -72.973170, noise -51.505899dBm

signal rejeté = -58.671472 SINR packet 1213 = dB

81811994, node 1, Rx end pkt 1212, antenna_RX 4, antenna_TX 4, puissance en reception -67.031389, (0.000000198089mW), noise -52.397600dBm 0.000005757580mW

signal rejeté = -75.049076 SINR packet 1212= dB

81811994, node 1, Rx end pkt 1212, antenna_RX 5, antenna_TX 4, puissance en reception -58.671472, (0.000001357853mW), noise -52.393948dBm 0.000005762424mW

signal rejeté = -72.973170 SINR packet 1212= dB



Conclusion

Dans le cas MIMO on considérera les interférents les plus importants comme ceux venant du même node.

8. Conclusion et perspectives

L'objectif de mon Projet de Fin d'Etudes était d'étudier l'implémentation de la technologie MIMO dans le simulateur WSNet. Les systèmes MIMO sont une technologie émergente dans la communication dans un réseau de capteurs.

Pour m'approcher de cet objectif, j'ai dû comprendre dans un premier temps la technologie MIMO et le comportement du simulateur WSNet par rapport à l'utilisation de multi antennes en émission et réception. L'analyse des performances des systèmes multi-antennes, effectué dans le cadre de ce PFE, peut constituer un travail préliminaire à la modélisation définitive de cette technologie au simulateur WSNet.

Dans le déroulement de mon PFE, j'ai intégré un laboratoire de recherche, le CITI, dans lequel j'ai pu découvrir le métier de chercheur en partageant des données, et en échangeant des idées. J'ai également pu approfondir mes connaissances dans les réseaux de capteurs et comprendre l'intérêt grandissant des chercheurs pour ce sujet. J'ai pu par ailleurs compléter mes compétences au niveau programmation en C et XML. J'ai acquis des connaissances dans un simulateur de réseaux de capteurs comme est le WSNet. Enfin, j'ai pu développer ma capacité à conduire un projet de bout en bout et ainsi évoluer en autonomie malgré les complications et les imprévus que j'ai pu avoir à chaque étape du projet, comme le fait que le simulateur WSNet initial n'avait pas été conçu pour travailler avec la technologie multi-antennes.

Par manque de temps, je n'ai pas pu finir l'implémentation totale du système multi-antennes. Je me suis spécialement concentré sur le traitement de la diversité spatiale dans la réception sans appliquer de codage spatio-temporel. Malgré tout j'ai essayé de donner les outils théoriques pour son implémentation, ce qui va faciliter les choses pour les futurs chercheurs qui travailleront sur WSNet.

Afin de compléter notre étude de modélisation réaliste de canaux MIMO pour le simulateur de réseaux des capteurs WSNet, il faudrait prendre en compte les corrélations entre les signaux reçus et/ou émis, le bloc RFFE, les vraies valeurs des retards du canal, et les angles de départs et d'arrivées. Ainsi, nous aurions une modélisation plus fine du canal qui prendrait en compte tous les paramètres pouvant influencer les performances des systèmes MIMO.

BIBLIOGRAPHIE

- 1] Andrea Goldsmith, « *Wireless Communications* »; Cambridge University 2005.
- [2] Savo Glisic « *Advanced Wireless Communications, 4G Technologies* », John Wiley & Sons, Ltd
- [3] <http://wsnet.gforge.inria.fr/>
- [4] www.lifl.fr/sensor/uploads/Main/GV-antennes.pdf
- [5] G.Chelius, A. Fraboulet and E. Fleury. "WSNet: a modular event-driven wireless network simulator", 2006. <http://www.worldsens.net/>.

ANNEXES

ANNEXE 1 : SIMULATION DES SCENARIOS

ANNEXE 1.1 :

SIMULATION SISO COMPLETE, DEUX NODES, SANS SIGNAUX INTERFERENT MAIS AVEC DU BRUIT :

338545535, node 1, Tx end pkt 1, antenna 4, puissance en émission 0.000000 dBm
338731871, node 0, Rx end pkt 1, antenna_RX 4, antenna_TX 4, puissance en reception -74.735108dBm ,
0.000000033612(mW), noise -80.000000dBm (0.000000010000mW), **BER 0.000122853653**

338741871, node 0, Tx end pkt 2, antenna 4, puissance en émission 0.000000 dBm
338904943, node 1, Rx end pkt 2, antenna_RX 4, antenna_TX 4, puissance en reception -70.993932dBm ,
0.000000079544(mW), noise -80.000000dBm (0.000000010000mW), **BER 0.000000008468**

338914943, node 1, Tx end pkt 3, antenna 4, puissance en émission 0.000000 dBm
345010335, node 0, Rx end pkt 3, antenna_RX 4, antenna_TX 4, puissance en reception -61.434081dBm ,
0.0000000718773(mW), noise -80.000000dBm (0.000000010000mW), **BER 0.000000000000**

345020335, node 0, Tx end pkt 4, antenna 4, puissance en émission 0.000000 dBm
345171775, node 1, Rx end pkt 4, antenna_RX 4, antenna_TX 4, puissance en reception -70.705694dBm ,
0.000000085002(mW), noise -80.000000dBm (0.000000010000mW), **BER 0.000000002754**

700158992, node 0, Tx end pkt 6, antenna 4, puissance en émission 0.000000 dBm
700345328, node 1, Rx end pkt 6, antenna_RX 4, antenna_TX 4, puissance en reception -74.388794 dBm
0.000000036402(mW), noise -80.000000dBm (0.000000010000mW), **BER 0.000067859922**

ANNEXE 1.2 :

SIMULATION SISO, PLUSIEURS NODES, ON REGARDE LA RÉCEPTION DE DEUX NODES POUR VOIR LES INTERFERENCES DES PACKETS EN RECEPTION :

203749603, node 0, Rx end pkt 121, antenna_RX 4, antenna_TX 4, puissance en reception -75.178547, (
0.000000030349mW), noise -65.764199dBm 0.000000265204mW, **BER 0.249339486678**

203750472, node 0, Rx end pkt 122, antenna_RX 4, antenna_TX 4, puissance en reception -65.228300 (
0.000000300034 mW), noise -73.941666dBm 0.000000040349mW, **BER 0.000000024654**

203750588, node 1, Rx end pkt 122, antenna_RX 4, antenna_TX 4, puissance en reception -69.983877, (
0.000000100372mW), noise -77.146985dBm 0.000000019289mW, **BER 0.000002529613**

203756469, node 0, Rx end pkt 123, antenna_RX 4, antenna_TX 4, puissance en reception -73.516728, (
0.000000044497mW), noise -64.680325dBm 0.000000340383mW, **BER 0.234803363984**

203765428, node 0, Rx end pkt 124, antenna_RX 4, antenna_TX 4, puissance en reception -69.112786, (
0.000000122665mW), noise -63.502807dBm 0.000000446395mW, **BER 0.147224936947**

203769984, node 0, Rx end pkt 125, antenna_RX 4, antenna_TX 4, puissance en reception -65.467607, (0.000000283948mW), noise -62.945258dBm 0.000000507545mW, **BER 0.067335381679**

204352432, node 0, Rx end pkt 126, antenna_RX 4, antenna_TX 4, puissance en reception -64.774444 (0.000000333085 mW), noise -80.000000dBm 0.000000010000mW, **BER 0.000000000000**

204352548, node 1, Rx end pkt 126, antenna_RX 4, antenna_TX 4, puissance en reception -70.310393 (0.000000093102 mW), noise -80.000000dBm 0.000000010000mW, **BER 0.00000000**

ANNEXE 1.3

SIMULATION SIMO AVEC PLUSIEURS ANTENNES EN EMISSION ET MEME PAQUET ENVOYE:

843556719, node 1, Tx end pkt 1, antenna 5, puissance en émission 0.000000 dBm
843556719, node 1, Tx end pkt 1, antenna 4, puissance en émission 0.000000 dBm
843743050, node 0, Rx end pkt 1, antenna_RX 4, antenna_TX 5, puissance en reception -71.375337dBm, noise -85.000000dBm,
843743050, node 0, Rx end pkt 1, antenna_RX 5, antenna_TX 5, puissance en reception -69.197453dBm, noise -85.000000dBm
843743050, node 0, Rx end pkt 1, antenna_RX 4, antenna_TX 4, puissance en reception -74.374370dBm, noise -85.000000dBm
843743050, node 0, Rx end pkt 1, antenna_RX 5, antenna_TX 4, puissance en reception -65.287303dBm, noise -85.000000dBm

SINR = 14.196756 dB

BER total packet 1 = 0.004756

844498679, node 1, Tx end pkt 3, antenna 5, puissance en émission 0.000000 dBm
844498679, node 1, Tx end pkt 3, antenna 4, puissance en émission 0.000000 dBm
844685010, node 0, Rx end pkt 3, antenna_RX 4, antenna_TX 5, puissance en reception -65.813608dBm, noise -85.000000dBm,
844685010, node 0, Rx end pkt 3, antenna_RX 5, antenna_TX 5, puissance en reception -70.610679dBm, noise -85.000000dBm
844685010, node 0, Rx end pkt 3, antenna_RX 4, antenna_TX 4, puissance en reception -71.795885dBm, noise -85.000000dBm
844685010, node 0, Rx end pkt 3, antenna_RX 5, antenna_TX 4, puissance en reception -64.482413dBm, noise -85.000000dBm

SINR = 18.119543 dB

BER total packet 3 = 0.001927

844695010, node 0, Tx end pkt 5, antenna 5, puissance en émission 0.000000 dBm
844695010, node 0, Tx end pkt 5, antenna 4, puissance en émission 0.000000 dBm
844858077, node 1, Rx end pkt 5, antenna_RX 4, antenna_TX 5, puissance en reception -64.464232dBm, noise -85.000000dBm
844858077, node 1, Rx end pkt 5, antenna_RX 5, antenna_TX 5, puissance en reception -67.101656dBm, noise -85.000000dBm
844858077, node 1, Rx end pkt 5, antenna_RX 4, antenna_TX 4, puissance en reception -71.486228dBm, noise -85.000000dBm
844858077, node 1, Rx end pkt 5, antenna_RX 5, antenna_TX 4, puissance en reception -63.316166dBm, noise -85.000000dBm

SINR = 20.767873 dB

BER total packet 5 = 0.001047

844868077, node 1, Tx end pkt 7, antenna 5, puissance en émission 0.000000 dBm
844868077, node 1, Tx end pkt 7, antenna 4, puissance en émission 0.000000 dBm
850963464, node 0, Rx end pkt 7, antenna_RX 4, antenna_TX 5, puissance en reception -65.088124dBm, noise -85.000000dBm,

850963464, node 0, Rx end pkt 7, antenna_RX 5, antenna_TX 5, puissance en reception -62.348756dBm, noise -85.000000dBm

850963464, node 0, Rx end pkt 7, antenna_RX 4, antenna_TX 4, puissance en reception -61.584029dBm, noise -85.000000dBm

850963464, node 0, Rx end pkt 7, antenna_RX 5, antenna_TX 4, puissance en reception -65.900384dBm, noise -85.000000dBm

SINR = 23.253462 dB

BER total packet 7 = 0.000591

851347461, node 1, Tx end pkt 9, antenna 5, puissance en émission 0.000000 dBm

851347461, node 1, Tx end pkt 9, antenna 4, puissance en émission 0.000000 dBm

851533792, node 0, Rx end pkt 9, antenna_RX 4, antenna_TX 5, puissance en reception -72.237621dBm, noise -85.000000dBm,

851533792, node 0, Rx end pkt 9, antenna_RX 5, antenna_TX 5, puissance en reception -72.411288dBm, noise -85.000000dBm

851533792, node 0, Rx end pkt 9, antenna_RX 4, antenna_TX 4, puissance en reception -72.603695dBm, noise -85.000000dBm

851533792, node 0, Rx end pkt 9, antenna_RX 5, antenna_TX 4, puissance en reception -63.777287dBm, noise -85.000000dBm

SINR = 23.821470 dB

BER total packet 9 = 0.000519

852949421, node 1, Tx end pkt 11, antenna 5, puissance en émission 0.000000 dBm

852949421, node 1, Tx end pkt 11, antenna 4, puissance en émission 0.000000 dBm

853135752, node 0, Rx end pkt 11, antenna_RX 4, antenna_TX 5, puissance en reception -66.762176dBm, noise -85.000000dBm,

853135752, node 0, Rx end pkt 11, antenna_RX 5, antenna_TX 5, puissance en reception -61.380979dBm, noise -85.000000dBm

853135752, node 0, Rx end pkt 11, antenna_RX 4, antenna_TX 4, puissance en reception -62.662168dBm, noise -85.000000dBm

853135752, node 0, Rx end pkt 11, antenna_RX 5, antenna_TX 4, puissance en reception -60.998360dBm, noise -85.000000dBm

SINR = 25.499943 dB

BER total packet 11 = 0.000352

855831381, node 1, Tx end pkt 13, antenna 5, puissance en émission 0.000000 dBm

855831381, node 1, Tx end pkt 13, antenna 4, puissance en émission 0.000000 dBm

856017712, node 0, Rx end pkt 13, antenna_RX 4, antenna_TX 5, puissance en reception -68.392562dBm, noise -85.000000dBm,

856017712, node 0, Rx end pkt 13, antenna_RX 5, antenna_TX 5, puissance en reception -72.810875dBm, noise -66.833309dBm

856017712, node 0, Rx end pkt 13, antenna_RX 4, antenna_TX 4, puissance en reception -77.188968dBm, noise -85.000000dBm

856017712, node 0, Rx end pkt 13, antenna_RX 5, antenna_TX 4, puissance en reception -66.900059dBm, noise -85.000000dBm

SINR = 25.749908 dB

BER total packet 13 = 0.000333

ANNEXE 1.4 : SIMULATION MIMO

804499575, node 0, Tx end pkt 2, antenna 5, puissance en émission 0.000000 dBm
804499575, node 0, Tx end pkt 1, antenna 4, puissance en émission 0.000000 dBm
804685980, node 1, Rx end pkt 2, antenna_RX 4, antenna_TX 5, puissance en reception -66.982058, (
0.000000200352mW), noise -65.393555dBm 0.000000288831mW, BER 0.047883513943
804685980, node 1, Rx end pkt 2, antenna_RX 5, antenna_TX 5, puissance en reception -69.709563, (
0.000000106916mW), noise -67.318290dBm 0.000000185426mW, BER 0.064421507166

SINR total packet 2 = -1.884963 dB

BER total packet 2 = 0.385866

804685980, node 1, Rx end pkt 1, antenna_RX 4, antenna_TX 4, puissance en reception -65.441366 (
0.000000285669 mW), noise -66.914046dBm 0.000000203514mW

804685980, node 1, Rx end pkt 1, antenna_RX 5, antenna_TX 4, puissance en reception -67.392994, (
0.000000182264mW), noise -69.582975dBm 0.000000110079mW

SINR total packet 1= 1,73817 dB

BER total packet 1 = 0,167541

805501535, node 0, Tx end pkt 4, antenna 5, puissance en émission 0.000000 dBm
805501535, node 0, Tx end pkt 3, antenna 4, puissance en émission 0.000000 dBm
805687940, node 1, Rx end pkt 4, antenna_RX 4, antenna_TX 5, puissance en reception -68.462753, (
0.000000142470mW), noise -65.318901dBm 0.000000293839mW
805687940, node 1, Rx end pkt 4, antenna_RX 5, antenna_TX 5, puissance en reception -70.421842, (
0.000000090744mW), noise -65.645320dBm 0.000000272564mW

SINR total packet 4 = -2.845275 dB

BER total packet 4 = 0.481357

805687940, node 1, Rx end pkt 3, antenna_RX 4, antenna_TX 4, puissance en reception -65.365893 (
0.000000290677 mW), noise -68.367411dBm 0.000000145633mW

805687940, node 1, Rx end pkt 3, antenna_RX 5, antenna_TX 4, puissance en reception -65.696001, (
0.000000269401mW), noise -70.273074dBm 0.000000093906mW

SINR total packet 3 = 3,688722 dB

BER total packet 3 = 0,106922

805697940, node 1, Tx end pkt 6, antenna 5, puissance en émission 0.000000 dBm
805697940, node 1, Tx end pkt 5, antenna 4, puissance en émission 0.000000 dBm
805861081, node 0, Rx end pkt 6, antenna_RX 4, antenna_TX 5, puissance en reception -70.721477, (
0.000000084694mW), noise -68.705061dBm 0.000000134739mW
805861081, node 0, Rx end pkt 6, antenna_RX 5, antenna_TX 5, puissance en reception -74.156025, (
0.000000038406mW), noise -72.777225dBm 0.000000052757mW

SINR total packet 6 = -2.673590 dB

BER total packet 6 = 0.462699

805861081, node 0, Rx end pkt 5, antenna_RX 4, antenna_TX 4, puissance en reception -68.808203 (
0.000000131577 mW), noise -70.562276dBm 0.000000087856mW

805861081, node 0, Rx end pkt 5, antenna_RX 5, antenna_TX 4, puissance en reception -73.045673, (
0.000000049594mW), noise -73.812394dBm 0.000000041568mW

SINR total packet 5 = 1,460738 dB

BER total packet 5 = 0,178593

807043495, node 0, Tx end pkt 8, antenna 5, puissance en émission 0.000000 dBm
807043495, node 0, Tx end pkt 7, antenna 4, puissance en émission 0.000000 dBm
807229900, node 1, Rx end pkt 8, antenna_RX 4, antenna_TX 5, puissance en reception -68.304364, (
0.000000147762mW), noise -63.423277dBm 0.000000454645mW
807229900, node 1, Rx end pkt 8, antenna_RX 5, antenna_TX 5, puissance en reception -72.268217, (
0.000000059317mW), noise -65.687186dBm 0.000000269949mW

SINR total packet 8 = -3.507974 dB

BER total packet 8 = 0.560709

807229900, node 1, Rx end pkt 7, antenna_RX 4, antenna_TX 4, puissance en reception -63.453590 (0.000000451483 mW), noise -68.212401dBm 0.000000150925mW

807229900, node 1, Rx end pkt 7, antenna_RX 5, antenna_TX 4, puissance en reception -65.738361, (0.000000266787mW), noise -72.042649dBm 0.000000062479mW

SINR total packet 8 = 5,270851 dB

BER total packet 8 = 0,074277

ANNEXE 1.5: SIMULATION GLOBALE

816158658, node 0, Tx end pkt 67198, antenna 4, puissance en mission 0.000000 dBm

816344936, node 1, Rx end pkt 67198, antenna_RX 4, antenna_TX 4, puissance en reception -65.971706 (0.000000252830 mW), noise -71.695353dBm

816344936, node 1, Rx end pkt 67198, antenna_RX 5, antenna_TX 4, puissance en reception -57.982173, (0.000001591412mW), noise -74.463527dBm

BER total packet 67198 = 0,01402

816560618, node 0, Tx end pkt 67232, antenna 4, puissance en mission 0.000000 dBm

816746896, node 1, Rx end pkt 67232, antenna_RX 4, antenna_TX 4, puissance en reception -67.843167 (0.000000164317 mW), noise -70.572715dBm

816746896, node 1, Rx end pkt 67232, antenna_RX 5, antenna_TX 4, puissance en reception -59.677671, (0.000001077043mW), noise -69.789231dBm

BER total packet 67232 = 0,038791

817242578, node 0, Tx end pkt 67287, antenna 4, puissance en mission 0.000000 dBm

817428856, node 1, Rx end pkt 67287, antenna_RX 4, antenna_TX 4, puissance en reception -63.373242 (0.000000459913 mW), noise -72.791783dBm

817428856, node 1, Rx end pkt 67287, antenna_RX 5, antenna_TX 4, puissance en reception -67.900924, (0.000000162147mW), noise -74.187499dBm

BER total packet 67287 = 0,036454

818424538, node 0, Tx end pkt 67384, antenna 4, puissance en mission 0.000000 dBm

818610816, node 1, Rx end pkt 67384, antenna_RX 4, antenna_TX 4, puissance en reception -71.194545 (0.000000075953 mW), noise -72.798476dBm

818610816, node 1, Rx end pkt 67384, antenna_RX 5, antenna_TX 4, puissance en reception -55.986355, (0.000002519791mW), noise -69.411873dBm

BER total packet 67384 = 0,016084

821006498, node 0, Tx end pkt 67594, antenna 4, puissance en mission 0.000000 dBm

821192776, node 1, Rx end pkt 67594, antenna_RX 4, antenna_TX 4, puissance en reception -68.257625 (0.000000149361 mW), noise -71.289473dBm

821192776, node 1, Rx end pkt 67594, antenna_RX 5, antenna_TX 4, puissance en reception -72.308596, (0.000000058768mW), noise -68.744843dBm

BER total packet 67594 = 0,249631

821908458, node 0, Tx end pkt 67670, antenna 4, puissance en mission 0.000000 dBm

822094736, node 1, Rx end pkt 67670, antenna_RX 4, antenna_TX 4, puissance en reception -63.904192 (0.000000406987 mW), noise -85.000000dBm

822094736, node 1, Rx end pkt 67670, antenna_RX 5, antenna_TX 4, puissance en reception -66.398843, (0.000000229148mW), noise -85.000000dBm

BER total packet 67670 = 0,001242

830770418, node 0, Tx end pkt 68395, antenna 4, puissance en mission 0.000000 dBm

830956696, node 1, Rx end pkt 68395, antenna_RX 4, antenna_TX 4, puissance en reception -65.980078 (0.000000252344 mW), noise -85.000000dBm

830956696, node 1, Rx end pkt 68395, antenna_RX 5, antenna_TX 4, puissance en reception -65.598216, (0.000000275536mW), noise -85.000000dBm

BER total packet 68395 = 0,001497

831140284, node 0, Tx end pkt 68428, antenna 4, puissance en transmission 0.000000 dBm
 837235618, node 1, Rx end pkt 68428, antenna_RX 4, antenna_TX 4, puissance en reception -63.194234 (0.000000479266 mW), noise -85.000000dBm
 837235618, node 1, Rx end pkt 68428, antenna_RX 5, antenna_TX 4, puissance en reception -66.462036, (0.000000225838mW), noise -85.000000dBm
BER total packet 68428 = 0,00112

957099668, node 0, Tx end pkt 78805, antenna 4, puissance en transmission 0.000000 dBm
 957285946, node 1, Rx end pkt 78805, antenna_RX 4, antenna_TX 4, puissance en reception -68.003714 (0.000000158354 mW), noise -85.000000dBm
 957285946, node 1, Rx end pkt 78805, antenna_RX 5, antenna_TX 4, puissance en reception -58.245075, (0.000001497933mW), noise -85.000000dBm
BER total packet 78805 = 0,000477

957501628, node 0, Tx end pkt 78841, antenna 4, puissance en transmission 0.000000 dBm
 957687906, node 1, Rx end pkt 78841, antenna_RX 4, antenna_TX 4, puissance en reception -64.407807 (0.000000362426 mW), noise -85.000000dBm
 957687906, node 1, Rx end pkt 78841, antenna_RX 5, antenna_TX 4, puissance en reception -69.781459, (0.000000105161mW), noise -85.000000dBm 0.000000003162mW
BER total packet 78841 = 0,001690

ANNEX 2: MODIFICATIONS CODE C. COUCHE RADIO

```

/* ***** */
Halfd.c
/* ***** */

void rx(call_t *c, packet_t *packet) {

    struct nodedata *nodedata = get_node_private_data(c);

    array_t *up = get_entity_bindings_up(c);

    int i = up->size;

    /* radio sleep */

    if (nodedata->sleep) {

        packet_dealloc(packet);

        return;

    }

    /* half-duplex */

    if (nodedata->tx_busy != -1) {

        packet_dealloc(packet);
    }

```

```
    return;
}

/*calcul SiNR*/

if( packet->node != c->node){
    if(antennaTX == -1){
        antennaTX = packet->antenna;
        P1 = packet->rxmW;
        P2 = *(packet->noise_mW);
        jtemp = jtemp +1;}

    else if(antennaTX == packet->antenna){
        P1 = P1 + packet->rxmW;
        P2 = P2 + *(packet->noise_mW);
        jtemp = jtemp +1;
        if(jtemp == 2){
            jtemp = 0;
            SINR2= 1/(4*(P1/P2));
            SINR= 10*log10(P1/P2);
            printf("SINR = %lf dB \n", SINR);
            printf("BER total packet %d = %lf \n", packet->id, SINR2);
        }

    else {

        P3 = P3 + packet->rxmW;
        P4 = P4 + *(packet->noise_mW);

        jtemp = jtemp +1;
        if(jtemp == 2){
            jtemp = 0;
```

```

        SINR4= 1/(4*(P3/P4));

        SINR3= 10*log10(P3/P4);

        printf("SINR = %lf dB \n", SINR3);

        printf("BER total packet %d = %lf \n", packet->id, SINR4);

    }

}

/* handle carrier sense */

if (nodedata->rx_busy == packet->id) {

    nodedata->rx_busy = -1;

    nodedata->rxdBm = MIN_DBM;

    /* log rx */

    PRINT_REPLAY("radio-rx1 %"PRIu64" %d\n", get_time(), c->node);

    /* consume energy */

    battery_consume_rx(c, packet->duration);

    noisetemp = *(packet->ber);

    printf("%lld, node %d, Rx end pkt %d, antenna_RX %d, antenna_TX %d, puissance en reception
    %lf (%15.12lf mW), noise %lf dBm %15.12lf mW, BER %15.12lf\n", packet->clock1, c->node, packet->id, c-
    >from, packet->antenna, packet->rxdBm, packet->rxmW, mW2dBm(packet->noise_mW[0]), packet-
    >noise_mW[0], noisetemp);

} else {

    if(packet->node != c->node){

        noisetemp = *(packet->ber);

        printf("PACKET KILLED %lld, node %d, Rx end pkt %d, antenna_RX %d, antenna_TX %d,
        puissance en reception %lf, (%15.12lf mW), noise %lf dBm %15.12lf mW, BER %15.12lf \n", packet->clock1,
        c->node, packet->id, c->from, packet->antenna, packet->rxdBm, packet->rxmW, mW2dBm(packet-
        >noise_mW[0]), packet->noise_mW[0], noisetemp);

    }

    packet_dealloc(packet);

    return;

}

```

```
/* check whether the reception has killed us */
if (lis_node_alive(c->node)) {
    packet_dealloc(packet);
    return;
}

/* drop packet depending on the FER */
if (get_random_double() < packet->PER) {
    packet_dealloc(packet);
    return;
}

/* forward to upper layers */
while (i--) {
    call_t c_up = {up->elts[i], c->node, c->entity};
    packet_t *packet_up;

    if (i > 0) {
        packet_up = packet_clone(packet);
    } else {
        packet_up = packet;
    }

    RX(&c_up, packet_up);
}

return;
}
```

ANNEXE 3 : FICHER XML UTILISÉ. SIMULATION GLOBALE

```
<?xml version='1.0' encoding='UTF-8'?>
<worldsens xmlns="http://worldsens.citi.insa-lyon.fr">

<!-- == Worldsens
===== -->
<simulation nodes="10" duration="2s" x="400" y="400" z="0"/>

<!-- == Entities
===== -->

<!-- == PROPAGATION, INTERFERENCES and MODULATION
===== -->
<entity name="range" library="propagation_shadowing" >
</entity>

<entity name="interf" library="interferences_orthogonal">
</entity>

<entity name="bruit" library="noise_white">
  <init white-noise-dBm="-85"/>
</entity>

<entity name="none" library="modulation_bpsk">
</entity>

<!-- == RADIO and ANTENNA =====
-->
```

```

<entity name="omnidirectionnal" library="antenna_omnidirectionnal" >
  <default loss="0" angle-xy="random" angle-z="random"/>
</entity>

<entity name="omnidirectionnal2" library="antenna_omnidirectionnal" >
  <default loss="0" angle-xy="random" angle-z="random"/>
</entity>

<entity name="radio" library="radio_half1d" >
  <default sensibility="-92" T_b="727" dBm="0" channel="0"
modulation="none"/>
</entity>

<!-- == MAC ===== -->
<entity name="mac" library="mac_dcf_802_11" >
</entity>

<!-- == APPLICATION ===== -->
<entity name="cbr" library="application_cbr" >
<default period="1000000" period_zero="100000" period_deux="100000"/>
</entity>

<!-- == MOBILITY ===== -->
-->
<entity name="billiard" library="mobility_billiard" >
  <init max-speed="50"/>
  <default x="random" y="random" z="random" speed="10" angle-
xy="random" angle-z="random"/>
</entity>

<entity name="static" library="mobility_static" >
  <default x="random" y="random" z="random"/>
</entity>

<!-- == Environment ===== -->
<environment>
<propagation entity="range" range="0"/>
<interferences entity="interf"/>
<noise entity="bruit"/>
<modulation entity="none"/>
</environment>

<!-- == Bundle ===== -->
-->
<bundle name="sensor0" worldsens="false" default="false" birth="0">
  <mobility entity="static">
    <default x="0" y="0" z="0" />
  </mobility>

  <antenna entity="omnidirectionnal">
    <up entity="radio"/>
  </antenna>

  <with entity="radio">

```

```
<up entity="mac"/>
<down entity="omnidirectionnal"/>
</with>

<with entity="mac">
  <up entity="cbr"/>
  <down entity="radio"/>
</with>

<with entity="cbr">
  <down entity="mac"/>
</with>

</bundle>

<bundle name="sensor1" worldsens="false" default="false" birth="0">
  <mobility entity="static">
    <default x="0" y="50" z="0" />
  </mobility>

  <antenna entity="omnidirectionnal">
    <up entity="radio"/>
  </antenna>

  <antenna entity="omnidirectionnal2">
    <up entity="radio"/>
  </antenna>

  <with entity="radio">
    <up entity="mac"/>
    <down entity="omnidirectionnal"/>
    <down entity="omnidirectionnal2"/>
  </with>

  <with entity="mac">
    <up entity="cbr"/>
    <down entity="radio"/>
  </with>

  <with entity="cbr">
    <down entity="mac"/>
  </with>

</bundle>

<bundle name="sensor2" worldsens="false" default="false" birth="0">
  <mobility entity="static">
    <default x="-60" y="0" z="0" />
  </mobility>

  <antenna entity="omnidirectionnal">
    <up entity="radio"/>
  </antenna>

  <with entity="radio">
    <up entity="mac"/>
```

```
<down entity="omnidirectionnal" />
</with>

<with entity="mac">
  <up entity="cbr" />
  <down entity="radio" />
</with>

<with entity="cbr">
  <down entity="mac" />
</with>

</bundle>

<bundle name="sensor3" worldsens="false" default="false" birth="0">
  <mobility entity="static">
    <default x="-60" y="50" z="0" />
  </mobility>

  <antenna entity="omnidirectionnal">
    <up entity="radio" />
  </antenna>

  <antenna entity="omnidirectionnal2">
    <up entity="radio" />
  </antenna>

  <with entity="radio">
    <up entity="mac" />
    <down entity="omnidirectionnal" />
    <down entity="omnidirectionnal2" />
  </with>

  <with entity="mac">
    <up entity="cbr" />
    <down entity="radio" />
  </with>

  <with entity="cbr">
    <down entity="mac" />
  </with>

</bundle>

<bundle name="sensor4" worldsens="false" default="true" birth="0">
  <mobility entity="static" />

  <antenna entity="omnidirectionnal">
    <up entity="radio" />
  </antenna>

  <antenna entity="omnidirectionnal2">
    <up entity="radio" />
  </antenna>

  <with entity="radio">
    <up entity="mac" />
    <down entity="omnidirectionnal" />
  </with>
```

```
<down entity="omnidirectionnal2"/>
</with>

<with entity="mac">
  <up entity="cbr"/>
  <down entity="radio"/>
</with>

<with entity="cbr">
  <down entity="mac"/>
</with>

</bundle>

<!-- == Nodes ===== --
>

<node id="0" as="sensor0"/>
<node id="1" as="sensor1"/>
<node id="2" as="sensor2"/>
<node id="3" as="sensor2"/>

</worldsens>
```