



## Open Archive TOULOUSE Archive Ouverte (OATAO)

OATAO is an open access repository that collects the work of Toulouse researchers and makes it freely available over the web where possible.

This is an author-deposited version published in : <http://oatao.univ-toulouse.fr/>  
Eprints ID : 17141

The contribution was presented at JNCT 2016 :  
<http://jnct2016.comordo.fr/>

**To cite this version** : Mnasri, Sami and Nasri, Nejah and Van den Bossche, Adrien and Val, Thierry *Simulation d'un réseau sans fil d'intérieur et des algorithmes NSGA-II et NSGA-III modifiés pour la résolution de la problématique de couverture et de localisation 3D.* ( In Press: 2016) In: Journées Nationales des Communications Terrestres (JNCT 2016), 1 September 2016 - 2 September 2016 (Montbéliard, France).

Any correspondence concerning this service should be sent to the repository administrator: [staff-oatao@listes-diff.inp-toulouse.fr](mailto:staff-oatao@listes-diff.inp-toulouse.fr)

# Simulation d'un réseau sans fil d'intérieur et des algorithmes NSGA-II et NSGA-III modifiés pour la résolution de la problématique de couverture et de localisation 3D

Sami MNASRI<sup>1</sup>, Nejah NASRI<sup>2</sup>, Adrien VAN DEN BOSSCHE<sup>3</sup>, Thierry VAL<sup>4</sup>

<sup>1,3,4</sup> IRIT, Université de Toulouse, Toulouse, France

<sup>2</sup> LETI, Ecole Nationale des Ingénieurs de Sfax, Sfax, Tunisie

<sup>1</sup>Sami.Mnasri@fsgf.rnu.tn <sup>2</sup>nejah.nasri@iseecs.rnu.tn <sup>3</sup>vandenbo@irit.fr <sup>4</sup>val@irit.fr

**Résumé :** Par rapport au déploiement bidimensionnel (2D), le déploiement tridimensionnel (3D) des réseaux de capteurs sans fil est plus complexe en raison de sa capacité à satisfaire plus de contraintes imposées par les problèmes de déploiement réels. Dans cet article, nous étudions la problématique de positionnement 3D des nœuds, tout en minimisant le nombre de nœuds, la consommation de l'énergie, et en maximisant la zone de couverture et le taux de localisation hybride basée sur le protocole 3D DV-HOP et le RSSI. Nous cherchons à résoudre notre problématique en choisissant les emplacements 3D idéaux pour ajouter des nœuds nomades en optimisant les objectifs cités. Une approche basée sur des variantes d'algorithmes génétiques basés sur l'algorithme NSGA-II [1] et le récent algorithme NSGA-III [2], est proposée. Le modèle de simulation prend en considération l'implémentation d'une couche physique à 433 Mhz, une méthode d'accès de type CSMA/CA non coordonnée de la norme IEEE 802.15.4, et une couche routage basée sur le protocole AODV réactif. Les résultats numériques obtenus à partir des simulations avec OMNeT++, sont présentés pour se comparer par rapport à nos expérimentations [3] et pour prouver l'efficacité de l'approche proposée.

**Mots clés :** déploiement 3D à l'intérieur, couverture, localisation hybride, NSGA-II, NSGA-III, nœuds WiNo, RSSI, FER, simulation, OMNeT++.

## 1. Problématique de déploiement 3D dans les RCSF

Les RCSF (réseaux de capteurs sans fil) sont généralement utilisés dans toutes les applications ayant des besoins spécifiques de surveillance tels que les bâtiments intelligents, des applications environnementales ou militaires. L'efficacité d'un RCSF est fortement influencée par le processus de déploiement et le positionnement des nœuds capteurs. Dans un RCSF, le déploiement de nœuds est une stratégie qui vise à définir le nombre des nœuds, leurs positions et de la topologie du réseau. Différentes problématiques sont abordées lors du déploiement des nœuds.

Un RCSF est dit tridimensionnel si la variation de la hauteur des capteurs déployés n'est pas négligeable par rapport à la longueur et à la largeur de la zone de déploiement. En effet, le modèle 2D perd de sa pertinence pour les déploiements submergés ou aéroportés, comme pour les réseaux terrestres, dans certains cas de déploiement à l'intérieur ou sur la paroi d'une montagne par exemple, où le modèle 2D ne reflète pas la topographie réelle de la zone. Bien que différents travaux de recherche aient porté sur des questions de conception pour le déploiement tridimensionnel, de nombreux défis de la recherche

dans les espaces tridimensionnelles n'ont pas été explorés encore autant que pour les réseaux bidimensionnels.

Le type de déploiement des nœuds dépend de l'application. En effet, il existe des applications où il est possible de choisir les emplacements où placer les nœuds de capteurs. Ce type de déploiement est appelé déterministe. Dans d'autres applications, à cause de l'impossibilité d'accéder au terrain, un grand nombre de nœuds est disséminé sur la zone de surveillance à partir d'un avion ou un hélicoptère. Ce type de déploiement est appelé non déterministe ou aléatoire. Dans ce papier, on s'intéresse à améliorer le déploiement initial par l'ajout d'un ensemble de nœuds d'une manière déterministe. La couverture est l'objectif le plus important à satisfaire lors du déploiement d'un RCSF. Il est un sujet essentiel dans la conception d'un RCSF. La couverture est généralement interprétée comme la façon dont un réseau de capteurs supervisera la zone d'intérêt. L'augmentation du nombre de capteurs ne peut pas toujours fournir une couverture totale, et il est également coûteux d'entretenir des réseaux à haute densité. Par conséquent, d'autres approches doivent être appliquées afin d'éviter ces problèmes et pour améliorer la couverture après le déploiement initial aléatoire.

La localisation des capteurs est le facteur le plus important en liaison avec la couverture. La localisation est importante quand il y a une incertitude de la position exacte de certains nœuds. En effet, dans les réseaux de capteurs sans fil, les informations de localisation sont cruciales surtout quand un événement inhabituel se produit. Dans ce cas, le nœud capteur qui a détecté cet événement a besoin de le localiser, puis elle rapporte la position de cet événement à la station de base.

Différents objectifs ont été considérés : le nombre de nœuds, la couverture du réseau, la localisation, et l'optimisation de la consommation de l'énergie. Pour la plupart des formulations de déploiement, le problème de placement optimal des nœuds de capteurs est prouvé NP-difficile [4]. Par conséquent, pour les instances à grande échelle, ce problème ne peut pas être résolu par des méthodes déterministes. Pour ceci, nous proposons un algorithme génétique basé sur les variantes NSGA-II et NSGA-III pour résoudre le problème de de couverture après le déploiement aléatoire initial. Malgré les différents défis dans les RCSF, les travaux de recherche ont seulement mis l'accent sur les problèmes post-déploiement tels que : la localisation des capteurs, l'efficacité et l'optimisation des couches MAC ou de routage, etc. Notre modèle proposé est différent des modèles existants car il intègre le déploiement du nœud de capteur, et l'approche de la localisation dans un seul modèle.

La problématique de déploiement dans les RCSF est reliée à un autre domaine de recherche qui est l'interconnexion des objets en internet des objets (IoT). L'IoT fait référence à l'interconnexion des dispositifs informatiques embarqués identifiables de manière unique au sein de l'infrastructure Internet existante. L'idée de l'IoT a été développée suite aux RCSF. Ces objets peuvent être de grands bâtiments, des installations industrielles, des avions, des voitures, des machines, tout type de marchandises, des parties spécifiques d'un système plus vaste pour les êtres humains, des animaux et des plantes et même des parties spécifiques d'entre eux. Puisque ces objets connectés ne supposent pas une technologie de communication spécifique, les technologies de communication sans fil vont jouer un rôle majeur, et en particulier dans beaucoup d'applications et de nombreuses industries. Les petits et peu coûteux capteurs des RCSF permettent à l'IoT d'intégrer les plus petits objets installés dans tout type d'environnement, à des coûts raisonnables. L'intégration de ces objets dans l'IoT sera une évolution majeure des RCSF.

Le reste du papier est organisé comme suit : dans la section 2, la modélisation et l'architecture du réseau est détaillée. Dans la section 3, les protocoles réseau utilisés sont expliqués. Dans la section 4, les tests de simulations du réseau avec OMNet++ sont présentés.

Finalement, une discussion est établie, une conclusion et des perspectives sont énumérées.

## 2. Modélisation et architecture du réseau

### 2.1 Environnement de travail

Deux principaux outils informatiques sont utilisés :

- **OMNeT ++ 4.6 [5]** est une plate-forme gratuite pour la simulation et le développement de protocoles réseau. OMNeT ++ IDE est basé sur la plate-forme Eclipse et contient une bibliothèque de noyau de simulation, un langage de description de topologie appelé NED, et une interface utilisateur graphique pour l'exécution de la simulation, il fournit une architecture de composants pour les modèles (modules) programmés en C ++.

- **JMetal 4.5.2 [6]** est une plateforme java, orientée objet qui vise à développer, expérimenter et étudier différentes méta-heuristiques pour résoudre des problèmes d'optimisation multi-objectifs. En effet, en utilisant cette plate-forme, nous implémentons les variantes proposées de l'algorithme génétique, avec ses différentes étapes.

### 2.2 Architecture du réseau

Durant nos simulations, nous considérons les types de nœuds suivants:

- **Nœuds fixes** : composés de l'ensemble des nœuds fixes installés initialement. Ce type de nœuds peut être déssimulé au hasard, mais il est préférable d'adopter une stratégie pour les distribuer, selon les objectifs applicatifs. Leur nombre diffère selon le scénario de simulation.

- **Nœuds nomades** : rajoutés pour améliorer le schéma de déploiement en 3D. leur emplacement est déterminé par les algorithmes génétiques proposés. Leur nombre dépend du scénario de simulation et de la taille du problème étudié.

- **Cibles mobiles** : composées d'un ensemble de personnes ou de robots mobiles à contrôler. Ces cibles sont équipées d'un émetteur/récepteur radio. Dans les simulations, on utilise une seul cible mobile qui déclenche le processus de simulation en envoyant le premier message.

## 3. Modélisation des protocoles du réseau

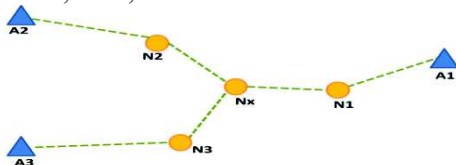
### 3.1 Modélisation de la localisation 3D

Bien que la localisation 3D soit plus réaliste et précise, la plupart des systèmes de localisation existants se concentrent sur le plan 2D. Comme la localisation 2D, on distingue deux types de localisation dans les environnements 3D : la localisation de type *Range-Free* et la localisation *Range-Based* qui utilise à l'inverse, des mesures de distance, d'angle... liées aux signaux

radio pour localiser les nœuds. Les algorithmes de localisation *Range-Based* imposent une certaine exigence matérielle pour les nœuds radio. Par conséquent, ils sont plus coûteux à mettre en œuvre dans la pratique. L'algorithme Landscape 3D [7] par exemple, est un algorithme de localisation 3D en fonction de la portée. Différents algorithmes de localisation 3D *Range-Free* existent comme l'algorithme 3DDVHOP [8], l'algorithme 3Dcentroid [9] et le 3D MDS-MAP [10].

Afin de combiner les avantages des deux types de localisation, nous proposons d'implémenter une localisation basée sur les échanges RSSI, hybridée avec le protocole DV-HOP. En effet, nous proposons une méthode de localisation hybride basée sur la combinaison de la distance moyenne par saut et les données RSSI pour la localisation 3D. Nous proposons un système de localisation hybride qui améliore la technique de localisation DV-HOP 3D, en introduisant une donnée RSSI pour corriger cette distance par saut. D'abord, le 3D DV-HOP utilise les informations de connectivité réseau pour estimer les emplacements des nœuds dans l'espace 3D. Ensuite, la valeur RSSI peut être facilement recueillie pour corriger les distances entre les nœuds trouvés par DV-HOP en fonction de la puissance du signal. La valeur RSSI est mesurée dans les deux directions : à partir du nœud mobile, nous mesurons la valeur RSSI reçue des autres nœuds (fixes, nomade ou mobile) ; et à partir de chaque nœud fixe, nomade ou mobile, on mesure la valeur RSSI reçue du nœud mobile. La valeur admissible finale du RSSI entre le nœud mobile et chaque autre nœud correspond à la valeur la plus élevée des deux valeurs déjà mentionnées.

Alors que les algorithmes de localisation classiques exigent que chaque nœud normal (qui n'est pas une ancre) dispose au moins de trois nœuds voisins, l'algorithme 3DDV-HOP ne nécessite pas 3 ancres voisines par nœud. Dans notre modèle proposé (3DDVHOP + RSSI), quatre nœuds sont nécessaires : trois nœuds du plan 2D et un nœud pour la hauteur. La figure 1 montre la localisation en utilisant l'algorithme 3DDVHop + RSSI avec une topologie de réseau avec 3 ancres et 4 nœuds normaux. A1, A2, A3 sont des ancres alors que Nx1, Nx2, Nx3 sont des nœuds normaux.



**Figure 1: localisation avec le protocole 3D DV-HOP+RSSI**

La valeur RSSI peut être influencée par divers facteurs autres que la distance, tels que le mouvement des nœuds, ou le niveau d'énergie. Par conséquent, une modélisation détaillée de l'environnement physique, les liens radio LLC, la MAC et le routage, améliore

considérablement l'obtention d'une distance précise de la valeur RSSI.

### 3.2 Couche physique (radio)

Lors de nos simulations, la couche physique utilise une fréquence ISM fixée à 433 Mhz. Différentes autres paramètres sont initialisés avec des valeurs significatives. Certaines valeurs sont fixées conformément aux normes des protocoles utilisés tel que 802.15.4 et certaines autres sont déduites à partir des valeurs empiriques de nos expérimentations [3].

On considère les paramètres suivants :

- Puissance d'émission = par défaut (60 mW);
- Gain de Réception = par défaut (50 mA);
- Température de Fonctionnement = par défaut (25°C);
- Débit en bits = par défaut (256 kbps);
- RSSI = par default (140);
- Taux d'erreur Bit = par défaut (0.01);
- Portée à l'intérieur = par défaut (15m);
- Nombre maximal de nœuds = par défaut (65000) conformément au protocole 802.15.4;
- Puissance d'alimentation = par défaut (3.6 v).

### 3.3 Sous-couche MAC de la couche liaison de données : CSMA/CA de 802.15.4

IEEE 802.15.4 est considéré comme une technologie majeure des RCSF, et un grand nombre de recherches ont été menées pour étudier les méthodes d'accès multiple par détection de porteuse et évitement de collision (CSMA/CA) dans le protocole 802.15.4. Quand plus d'une station à la fois tente d'émettre une trame, une collision se produit, et par la suite toutes les données peuvent être endommagées. Le mécanisme standard de résolution des conflits dans les réseaux informatiques est appelé CSMA). Ces algorithmes tentent de rompre les synchronisations de transmissions défectueuses redémarrant au même moment, en utilisant des procédures aléatoires de *backoff* exponentiels. Alors que les appareils filaires peuvent écouter pendant leurs propres transmissions et employer le CSMA avec détection de collision (CSMA/CD), les stations sans fil ne peuvent pas écouter leurs propres émissions et entendre en même temps les autres transmissions en collision, qui par conséquent ne peuvent être détectés. Les appareils sans fil utilisent donc le CSMA avec évitement de collision (CSMA/CA ou CSMA-CA). Pour la couche liaison de données, un problème de priorité d'accès au canal se pose néanmoins toujours si deux nœuds à portée parlent simultanément. On s'intéresse alors à la modélisation du protocole CSMA/CA du 802.15.4. On utilise ici un CSMA non coordonné (non slotté, sans acquittement et sans RTS/CTS).

### 3.4 Couche routage : AODV réactif

Pour modéliser la couche routage, on utilise le protocole AODV réactif. L'AODV (*Ad-hoc sur demande Distance Vector*) est un protocole de routage pour les réseaux ad-hoc. Il est conçu pour auto-démarrer dans un environnement de nœuds mobiles. Dans chaque nœud, AODV maintient une table de routage. L'entrée de la table de routage pour une destination contient trois champs essentiels: le nœud de saut suivant (*next hop*), un numéro de séquence (*sequence id*) et un nombre de sauts (*hop count*). Dans AODV, les nœuds découvrent les routes dans des cycles de demande-réponse. Un nœud demande un itinéraire vers une destination en diffusant un message RREQ à tous ses voisins. Quand un nœud reçoit un message RREQ mais ne dispose pas d'un itinéraire vers la destination demandée, elle diffuse à son tour le message RREQ. Ce nœud se souvient aussi d'une inversion de trajet vers le nœud demandeur, qui peut être utilisé pour transmettre des réponses ultérieures à ce RREQ. Ce processus se répète jusqu'à ce que le RREQ atteigne un nœud qui possède une route valide vers la destination. Ce nœud (qui peut être la destination elle-même) répond par un message RREP. Ce RREP est un *unicast* le long des routes inverses des nœuds intermédiaires jusqu'à ce qu'il atteigne le nœud demandeur d'origine. Ainsi, à la fin de ce cycle de demande-réponse, une voie bidirectionnelle est établie entre le nœud demandeur et la destination. Quand un nœud perd la connectivité à son saut suivant, ce nœud annule son itinéraire en envoyant un RERR à tous les nœuds qui ont potentiellement reçu son RREP.

Dans notre cas, chaque nœud, en recevant un RREQ, le renvoie vers tous ces voisins, dont même la source qui l'absorbe. On utilise aussi un TTL qui est temps maximal (ou nombre de sauts) au bout duquel on envoie un nouveau RREQ avec un numéro de séquence plus élevé si on ne reçoit pas une réponse du nœud destination ou d'un nœud qui connaît un chemin valide vers la destination. La destination recevant le RREQ choisit une nouvelle source parmi ces voisins, ce nœud destination devient la source et démarre un nouveau cycle en envoyant un nouveau message RREQ. Ce processus de cycles de demande-réponse s'arrête après 4280 secondes de simulations (~72 minutes).

### 3.5 Modélisation de l'énergie et la durée de vie du réseau

Un capteur actif déployé dissipe de l'énergie lors de la transmission, la détection, la réception d'un message ou la période d'inactivité. Par conséquent, le rendement énergétique est une clé essentielle dans la conception d'un réseau de capteurs sans fil. L'optimisation de la consommation de l'énergie devient alors un facteur essentiel pour l'optimisation du fonctionnement d'un RCSF. Pour modéliser la consommation de l'énergie dans nos simulations, on utilise un indicateur d'énergie

initiale  $E_0$  dans chaque nœud. Vu que suivant le protocole 802.15.4, la réception est plus coûteuse en énergie que l'envoi,  $E_0$  sera diminué de 'i' unités si on envoie un message, et il sera diminué de  $2*i$  unités si on reçoit un message.

La consommation de l'énergie est liée à un autre indicateur qui est la durée de vie du réseau (*lifetime*). Généralement, la durée de vie du RCSF est représentée par le temps au bout duquel le premier nœud est hors service. On mesure donc pour chaque variante d'algorithme le temps correspondant à la durée de vie du réseau pour avoir une idée sur l'influence du choix des emplacements des nouveaux nœuds nomades ajoutés sur la durée de vie du réseau.

### 4. Simulations du réseau avec OMNet++

Pour les simulations, le cas 3D est considéré. Quatre objectifs ont été considérés progressivement (deux objectifs, puis trois objectifs, puis quatre) : le coût en nombre de nœuds, la couverture, la localisation, et l'optimisation de la consommation de l'énergie.

Dans nos simulations, on tente d'imiter, pour comparaison et validation des simulations, les expérimentations faites à l'IUT de Blagnac [3]. L'architecture du réseau est basée sur un nombre fixe (11) de nœuds fixes avec des positions connues. Le nombre de nœuds nomades à ajouter est fixé à trois. Leurs positions sont déterminées avec les variantes des algorithmes génétiques utilisés. De même pour les nœuds mobiles, un seul nœud est utilisé comme déclencheur du premier message. Les positions des nœuds fixes initialement déployés sont choisies selon la loi de distribution utilisée par OMNet++ qui essaye de distribuer uniformément les nœuds à partir du centre de la région d'intérêt, ceci entraîne la non couverture de certaines zones aux frontières si le nombre de nœuds fixes est trop petit.

Le scénario d'exécution est le suivant : un message initial est envoyé depuis le nœud mobile vers une destination aléatoire '*d*'; une fois que *d* est trouvé par le protocole AODV, '*d*' devient la source et une nouvelle destination est choisie...etc. Ce cycle est répété jusqu'à la satisfaction d'une condition d'arrêt, entre autres un temps de simulation maximal. Imitant les expérimentations effectuées à l'IUT [3], les simulations suivent un scénario figé dans lequel le nombre de nœuds est fixe.

Pour la connectivité des nœuds dans ce scénario, on utilise une matrice de connectivité entre les nœuds qui est déduite des résultats réels issus de nos expérimentations. Les mêmes liens de connectivités des expérimentations sont donc utilisés initialement. Par la suite, pour modéliser le dynamisme du réseau, ces liens de connectivité sont soumis à une perturbation qui permet de modifier ces variations natives des liens de connectivités initiales. Cette perturbation concerne le

calcul des taux de RSSI entre les nœuds. En effet, une matrice des taux RSSI extraite des expérimentations est utilisée initialement. Ensuite, cette matrice est soumise à une perturbation ( $\pm 30$  pour chaque valeur) pour avoir de nouvelles relations de connectivité entre les nœuds.

La figure 2 montre le schéma de déploiement 3D des simulations. Les nœuds rouges sont les nœuds fixes; les nœuds verts sont les nœuds nomades ajoutés.

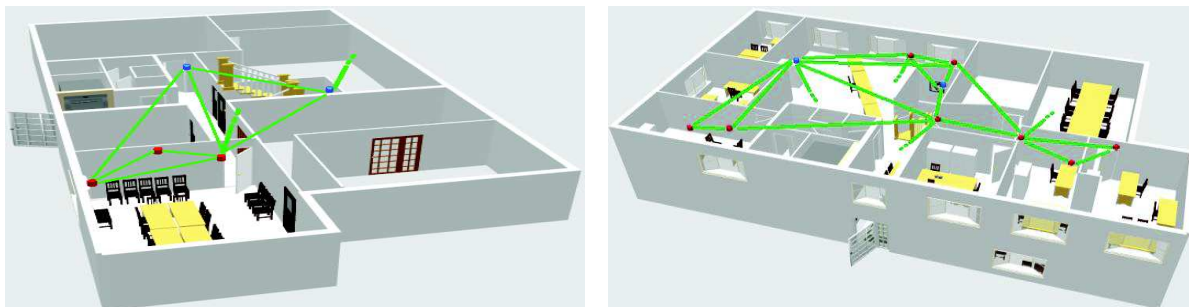


Figure 2 : La topologie en 3D du réseau de simulation intérieur

La figure 3 représente la répartition des nœuds selon l'interface d'OMNet++ dans les simulations.

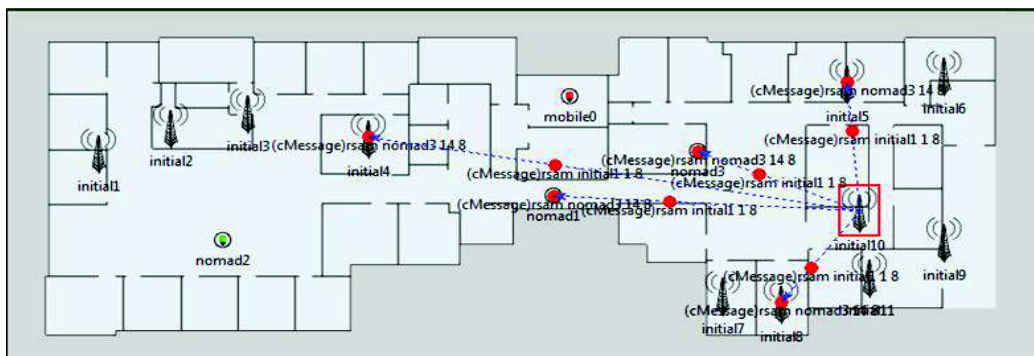


Figure 3 : Scénario de simulation

#### 4.1 Variations des taux de RSSI dans les simulations

Pour mesurer la localisation, nous utilisons la métrique RSSI puisque le modèle de localisation utilisé est basé sur une hybridation entre le RSSI et le protocole DVHop. Par conséquent, plus le RSSI est élevé, plus les distances sont faibles, donc précises, plus les réceptions sont bonnes, et plus la localisation est améliorée. Un voisin peut être inséré dans la table de voisinage d'un nœud seulement si la valeur du RSSI du nœud détectée est supérieure à un seuil prédéfini. La valeur théorique de ce seuil est fixée à 100. Initialement, les taux de RSSI sont basés sur les valeurs empiriques des expérimentations [3], puis, pour garantir un dynamisme au sein du réseau, une perturbation de la valeur du RSSI est introduite via une fonction aléatoire ( $\pm 30$ ).

La figure 4 représente, pour différents nombre d'objectifs considérée par l'algorithme génétique, la moyenne des taux de RSSI mesurés pour tous les nœuds en connexion avec le nœud mobile.

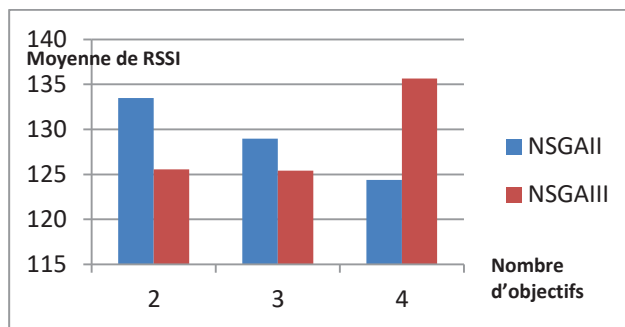


Figure 4. Moyenne des taux de RSSI durant les simulations

#### 4.2 Variations des taux de FER dans les simulations

Pour mesurer la couverture, nous utilisons le taux d'erreur trame (FER) en tant que mesure pour évaluer la qualité des liens entre les nœuds. Par conséquent, moins le FER est élevé, plus la couverture est meilleure. Bien que les valeurs du FER sont moins variables que celles du RSSI, on prend, pour chaque paire de nœuds (nœud  $i$  - nœud  $C$ );  $i \in [1, 14]$ ; une valeur moyenne extraite à

partir de quatre valeurs prises avec un intervalle de 10 secondes entre les deux. Initialement, les taux de FER sont basés sur les valeurs empiriques des expérimentations [3], puis, pour garantir un dynamisme et un réalisme du réseau, une perturbation de la valeur du FER est introduite via une fonction aléatoire (+-0.04 à +- 0.2). La figure 5 représente la moyenne des taux de FER mesurés pour tous les nœuds en connexion avec le nœud mobile.

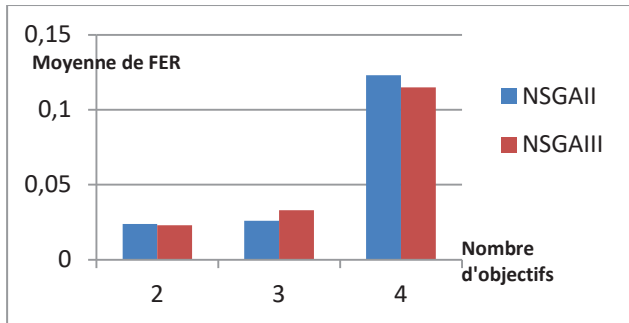


Figure 5. Moyenne des taux de FER dans les simulations

### 4.3 Variations du nombre de voisins dans les simulations

Pour avoir une idée sur la connectivité du réseau, on mesure le nombre de voisins de la cible. La figure 6 représente la moyenne du nombre de voisins du nœud mobile par objectif.

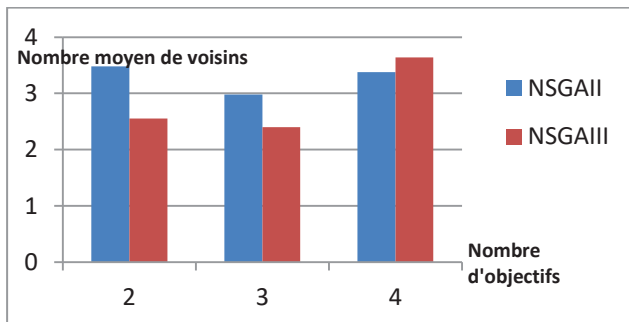


Figure 6. Moyenne du nombre de voisins dans les simulations

### 4.4 Variations de l'énergie et de la durée de vie du réseau dans les simulations

Les figures 7 et 8 représentent les variations du niveau d'énergie du réseau dans les simulations pour différents nombre d'objectifs. On mesure, pour les deux variantes de l'algorithme génétique, une moyenne de l'indicateur d'énergie des nœuds du réseau après l'ajout des nœuds nomades et ce, selon le nombre de nœuds fixes.

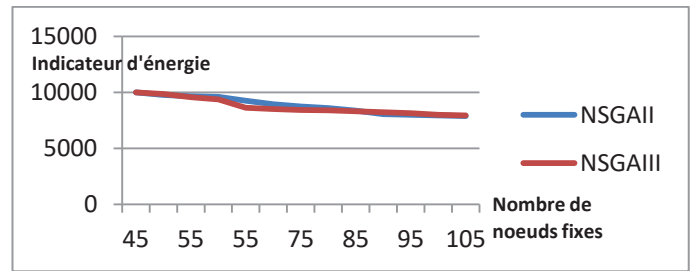


Figure 7. Variation de l'énergie par rapport au nombre de nœuds fixes, pour 2 objectifs

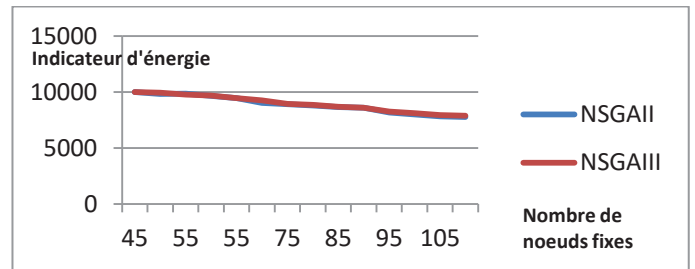


Figure 8. Variation de l'énergie par rapport au nombre de nœuds fixes, pour 4 objectifs

La figure 9 représente le temps (en secondes) au delà duquel le premier nœud du réseau est éteint, pour différents nombre d'objectifs, ce qui nous donne une idée sur la durée de vie du réseau.

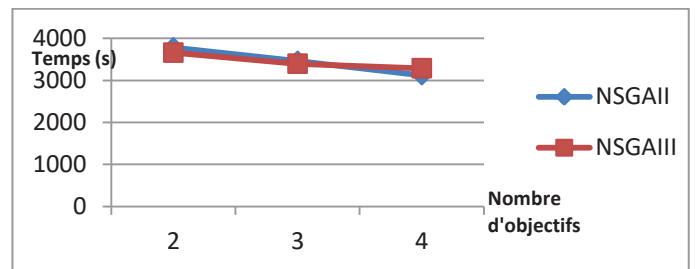


Figure 9. Variation de la durée de vie par rapport au nombre d'objectifs

## 5. Discussion et interprétations

Après l'analyse des simulations, différentes interprétations peuvent être envisagées.

- Dans certains cas, des moyennes de RSSI inférieures sont enregistrées après l'ajout des nœuds nomades. Malgré cette diminution indiquant que les taux de RSSI des nouveaux nœuds (nomades) sont moins élevés que les RSSI des nœuds installés (fixes), le taux de localisation, le taux de couverture et le nombre de voisins sont améliorés. Compte tenu des objectifs fixés par notre approche, cette diminution des moyennes du RSSI est compréhensible, étant donné que l'ajout d'un nœud dans un emplacement x1 fait de sorte qu'il sera proche de plusieurs nœuds avec une valeur inférieure de RSSI ; c'est donc mieux que de l'ajouter dans un endroit x2 avec une valeur de RSSI supérieure mais un plus petit nombre de voisins.

- Les résultats de simulation (figures 5, 6 et 7) montrent une conformité avec les résultats d'expérimentation durant le jour [3], au niveau de l'augmentation du taux de couverture et de localisation, ce qui prouve la véracité des modèles de simulation et l'efficacité de l'approche proposée dans différents contextes.

- En comparant l'efficacité des deux variantes proposées de l'algorithme génétique (NSGAI et NSGAIII), les résultats de simulation montrent que cette efficacité est relative au nombre d'objectifs à satisfaire. Par exemple, les figures 7 et 8, montrent que si le nombre d'objectifs est inférieur à trois, le NSGAI est plus efficace, alors que le NSGAIII est plus efficace que le NSGAI si le nombre d'objectifs dépasse trois. Ceci est explicable par le fait que le NSGAI est dédié aux problèmes à plusieurs objectifs (*multi-objective problems*), alors que les auteurs du NSGAI le proposent comme adaptation du NSGAI pour les problèmes à différents objectifs (*many-objective problems*) dépassant 3 objectifs.

Nos travaux constituent une preuve par expérimentation et par simulations de cette constatation qui n'a été prouvée par les auteurs du NSGAI et NSGAI, que par des tests sur des instances de problèmes théoriques (*benchmarks*).

## 6. Conclusion et perspectives

Ce papier vise à fournir un schéma de déploiement 3D dans les réseaux de capteurs sans fil d'intérieur tout en satisfaisant différents objectifs. Les objectifs pris en considération sont la minimisation du nombre de nœuds nomades à rajouter, la maximisation de la zone de couverture, la maximisation de la précision de la localisation en fonction du signal de détection basé sur un algorithme DVHop corrigée par le RSSI, et la minimisation de la consommation de l'énergie. Nous proposons une approche basée sur un algorithme génétique avec deux variantes : le NSGAI et le NSGAIII qui montre une amélioration significative des performances de la qualité de la couverture et de la localisation. Nous testons nos contributions avec des simulations effectuées à l'aide du simulateur OMNeT++. Nous allons nous orienter dans plusieurs directions à l'avenir. Nous pouvons améliorer encore la stratégie proposée pour assurer le redéploiement dynamique des nœuds tout en considérant différents autres objectifs, tels que la durée de vie et la connectivité réseau. De plus, nous cherchons à intensifier le réseau déployé par l'ajout de nouveaux nœuds afin de mieux satisfaire la contrainte de localisation imposant quatre voisins pour chaque cible. L'expérience sera refaite pour étudier l'influence de la densité du réseau sur les résultats. D'autres directions de recherche peuvent être investiguées telles que la considération de l'existence des obstacles dans l'espace 3D, et l'implémentation d'un modèle énergétique plus

réaliste avec OMNeT++ en se basant sur la gestion des valeurs BO et SO [11] du protocole CSMA/CA du 802.15.4.

## REFERENCES

- [1] K. Deb, A. Pratap, S. Agarwal and T. Meyarivan, "A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II," in IEEE Transactions on Evolutionary Computation, vol. 6, no. 2, pp. 182-197, Apr 2002. doi: 10.1109/4235.996017
- [2] Deb K., Jain H. An. Evolutionary Many-Objective Optimization Algorithm Using Reference-Point-Based Nondominated Sorting Approach, Part I: Solving Problems With Box Constraints. IEEE Trans Evol Comput, vol.18, no.4, p.577-601, Aug. 2014. Doi: 10.1109/TEVC.2013.2281535.
- [3] S. MNASRI , A. VAN DEN BOSSCHE , N. NASRI, T. VAL, "The 3D Deployment Multi-objective Problem in Mobile WSN: Optimizing Coverage and Localization," International Research Journal of Innovative Engineering, ISSN 2395-0560, Vol. 1 N. issue 5, Mai 2015.
- [4] Cheng X., Du D.Z., Wang L., Xu B. Relay sensor placement in wireless sensor networks. ACM/Springer J Wirel Netw, 14: p. 347-355, 242, 2008. Doi: 10.1007/s11276-006-0724-8.
- [5] <https://omnetpp.org/omnetpp> [consulté le 09 Juin 2016].
- [6] La plateforme jMetal : URL: <http://jmetal.sourceforge.net/> [consulté le 02 Mars 2015].
- [7] Topcuoglu H.R., Ermis M., Sifyan M. Positioning and utilizing sensors on a 3-D terrain Part II—Solving with a hybrid evolutionary algorithm. IEEE Trans Syst Man Cybern C Appl Rev, vol.41, no.4, p.470-480, Jul. 2011. DOI: 10.1109/TSMCC.2010.2055851.
- [8] Danping H., Portilla J., Riesgo T. A 3D multi-objective optimization planning algorithm for wireless sensor networks. 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, IECON 2013, p.5428-5433, 10-13 Nov. 2013. Doi: 10.1109/IECON.2013.6700019.
- [9] Matsuo S., Sun W., Shibata N., Kitani T., Ito M. BalloonNet: A deploying method for a three-dimensional wireless network surrounding a building. Eighth International Conference on Broadband and Wireless Computing, Communication and Applications (BWCCA), p.120-127, 28-30 Oct. 2013. Doi: 10.1109/BWCCA.2013.28.
- [10] Xu H., Lai Z., Liang H. A novel mathematical morphology based antenna deployment scheme for indoor wireless coverage. IEEE 80th Vehicular Technology Conference (VTC Fall), p.1-5, 14-17 Sept. 2014. Doi: 10.1109/VTCFall.2014.6965828
- [11] A. Farhad, S. Farid, Y. Zia and F. B. Hussain, "A delay mitigation dynamic scheduling algorithm for the IEEE 802.15.4 based WPANs," 2016 International Conference on Industrial Informatics and Computer Systems (CIICS), Sharjah, 2016, pp. 1-5. doi: 10.1109/ICCSII.2016.7462430.