

Self-Measurement System : Introduction à un Nouveau Concept de Métrologie Dimensionnelle

Rodolfo PEÑA

Centre de Recherche en Automatique de Nancy (CRAN – UMR 7039)
Nancy-University, CNRS, BP239,54506 Vandœuvre, France

rodolfo.pena@cran.uhp-nancy.fr

Résumé— Les réseaux de capteurs constituent actuellement un domaine d'étude et de recherche particulièrement privilégié. Les évolutions technologiques des capteurs et de leurs moyens de communication permettent d'imaginer des applications nouvelles pour un futur relativement proche. Parmi ces applications, nous nous sommes, pour notre part, focalisés sur la métrologie dimensionnelle. Ce papier a donc pour vocation, dans un premier temps, à recenser les différents travaux de recherche qui utilisent les réseaux capteurs sans fil (ou Wireless Sensor Networks) à des fins de métrologie dimensionnelle. Dans un second temps, ce papier propose un principe d'auto-mesure d'un produit embarquant un réseau de capteurs sans fil.

Mots-clés— Réseaux de Capteurs, Métrologie Dimensionnelle, Communication sans Fil.

I. INTRODUCTION

Le concept de produit intelligent a fait l'objet de nombreux travaux et de multiples définitions. La nécessité d'une classification des produits intelligents a été identifiée et développée dans [1]. Ce papier recense les axes à développer, afin de conférer au produit une intelligence accrue, à savoir :

1. La puissance de calcul.
2. Les capacités de communication.
3. Les capacités à capter et actionner.

Aujourd'hui la plupart des efforts de fabrication dans l'industrie sont dirigés vers la production d'objets aux formes et dimensions spécifiques. Le contrôle morpho-dimensionnel de ces objets est important pour l'obtention de produits de qualité. La métrologie dimensionnelle est la science de la mesure des formes et des dimensions spatiales d'objets physiques. Pour bien comprendre cette science, il est nécessaire de connaître les processus de mesure, le langage de la mesure, les dispositifs de mise en œuvre, les normes, ... et les outils statistiques si cela est nécessaire [2]. Les systèmes usuels de métrologie dimensionnelle utilisent des équipements de mesure physique pour quantifier les spécifications géométrique (dimension, position, forme et surface) de n'importe quel objet. Ces systèmes sont basés sur des technologies différentes (par exemple laser, caméra, radiations électromagnétiques ...) offrant des niveaux de performances différents. Très souvent les machines de mesure sont très coûteuses, centralisées et peu flexibles [3]. Cet article présente un nouveau principe de métrologie dimensionnelle, Self-Measurement System (ou SMS), en rupture par rapport aux approches traditionnelles.

Ce système est basé sur l'utilisation des réseaux de capteurs sans fil (Wireless Sensor Network) intégrés dans le produit, dotant celui-ci d'un "système nerveux" et donc de capacités à capter, communiquer, et traiter des informations de manière autonome. Grâce aux nombreuses avancées dans les circuits intégrés, les communications sans fil, et les systèmes micro électro-mécaniques (MEMS), il est possible aujourd'hui d'avoir de nœuds de taille réduite, consommant peu d'énergie et peu coûteux [4][5]. Le principe simplifié que nous proposons est présenté Fig. 8. On considère un produit (ici, un cube) avec des nœuds d'un WSN déployées à l'intérieur de celui-ci (a). Pour déterminer les dimensions du produit, le réseau de capteurs doit être capable de localiser les nœuds situés en bordure du produit (b). Pour finir l'estimation de la distance (d dans la figure) entre ces nœuds de bords fournit des informations sur les dimensions du produit (c), voir [6].

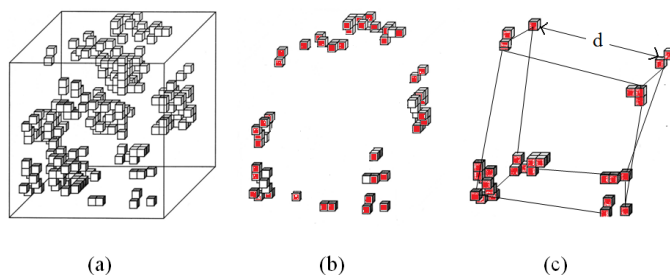


Fig. 1. SMS : Self-Measurement System

Dans ce papier, et afin de démontrer la faisabilité de SMS, nous nous appuyerons sur une forme géométrique simple : le carré. La section II du papier, présente l'état de l'art, les concepts, et les différents usages des réseaux de capteurs sans fil en métrologie dimensionnelle. La section III, présente notre proposition, à savoir les principes fondamentaux de la stratégie SMS, l'instrumentation du produit, et les processus de voisinage et d'estimation de distance entre les nœuds. La section IV nous servira à présenter l'application réalisée (simulation) afin de tester la stratégie d'auto-mesure et les hypothèses nécessaires. Enfin, les résultats et analyses de différentes simulation seront présentés dans la section V.

II. ÉTAT DE L'ART

Ce paragraphe nous permet dans un premier temps de présenter les réseaux de capteurs sans fil (Wireless Sensor Networks). Dans un second temps nous présenterons différents travaux de recherche utilisant déjà ces réseaux de capteurs dans des applications de métrologie dimensionnelle.

Un Réseau de Capteurs sans Fil est un réseau de plusieurs nœuds constitués de petits capteurs capables de prélever des informations de l'environnement. Ces informations peuvent ensuite être transmises via le réseau à un ou plusieurs destinataires [7]. Les nœuds d'un WSN sont des unités autonomes qui se composent de :

1. Wireless Module : qui supporte la communication réseau avec l'environnement.
2. Sensor Board : qui regroupe le capteur ou les capteurs.
3. Programming Board ou carte mère du nœud, pour le traitement de l'information.

A ces trois composantes principales vient naturellement se joindre la source d'énergie et tout est communément nommé « mote » [8].

Un Réseau de Capteurs sans Fil peut être divisés en deux sous-classes : les réseaux fixes et les réseaux dynamiques. Dans le premier cas, la position des nœuds ne varie pas dans le temps. En revanche, dans les réseaux dynamiques, les nœuds sont mobiles et leur position évolue dans le temps [9].

Les réseaux de capteurs sans fil sont déployés de façon organisée ou non (topologie réseau) en fonction des applications visées. Ces topologies peuvent être centralisées (toute l'information est envoyée à une unité centrale), ou distribuées (l'information est distribuée dans chaque nœud) [10]. Dans ces réseaux les protocoles de routage (protocoles de communication entre les nœuds), se répartissent en différentes familles : routage à plat, hiérarchique ou de localisation utilisant ou non les informations de position relative des nœuds.

L'intégration et la réduction des dimensions des systèmes micro-électromécaniques MEMS, permet de créer de minuscules capteurs avec des fonctions de contrôle et des capacités de communications. Ces MEMS peuvent être utilisés pour détecter les grandeurs de pression, température, humidité, ou des substances biologiques, chimiques, etc. [11].

Un nœud dans un WSN doit être suffisamment générique pour profiter de la production de masse et donc en réduire les coûts de production. La loi de Moore peut s'appliquer à ce type de technologie. La consommation énergétique et la taille des circuits intégrés sont réduites chaque année, et donnent naissance à de nouvelles applications potentielles. Le concept de poussière intelligente (ou Smart Dust) est né de cette miniaturisation toujours plus poussée [12][13].

Comme nous le verrons ici, la littérature est assez peu riche de travaux portant sur une utilisation spécifique des réseaux de capteurs à des fins de métrologie dimensionnelle. Cependant, nous présentons ici, sur la base de quelques papiers étudiés, des particularités intéressantes des usages des WSN. Nous nous appuyons sur ceux-ci pour présenter, à la section III, nos propositions.

Dans [14], un exemple de « on-board measurement system » est présenté. Il utilise un réseau de capteurs sans

fil de type « jauge de contraintes » répartis sur la voile d'un bateau pour en mesurer la déformée. La position des nœuds étant connue, et les informations récoltées, permettent d'optimiser le rendement de la voilure. Dans cet exemple, on peut remarquer que les capteurs sont directement liés à l'objet dont certaines caractéristiques sont mesurées. L'usage des informations collectées, dans la boucle de contrôle-commande de l'ajustement de la voile, démontre également la réactivité du système de mesure. L'auteur justifie l'usage du réseau de capteurs sans fil par une augmentation de la fiabilité des mesures dues à un passage d'une transmission sous forme analogique des données à une forme numérique.

Les travaux sur le SLAM (Simultaneous Localisation and Mapping) [15] ont également retenus toute notre attention. En effet l'idée à la base de ce concept est de réaliser la localisation d'un (ou des) robot(s) se déplaçant dans un environnement inconnu de manière simultanée, afin de cartographier cet environnement. Chaque robot embarque un capteur qui peut déterminer la distance à son environnement par rapport au temps de vol d'un son qu'il émet (et reçoit en retour).

Hors ce cadre du SLAM, les travaux de [16] utilisent des informations de localisation de produits au sein d'un atelier pour identifier les positions relatives des différentes machines le constituant. Ces mesures lui permettent d'obtenir la cartographie complète du layout du système de production pour un usage ultérieur dans un modèle de simulation de flux. Il reste cependant à développer des méthodes pour un déploiement à grande échelle, dans des environnements non structurés, et dans lesquels les technologies telles que "GPS" ne sont pas disponibles ou peu fiables [17]. Ces travaux montrent ici encore que les nœuds et capteurs, portés par les robots ou les produits, se situent dans l'objet à mesurer (celui-ci étant de taille « importante »).

Les travaux de [3] proposent un système de métrologie dimensionnelle pour des pièces de grande échelle (« Large Scale Metrology »). Ce système est constitué de trois parties, à savoir :

1. Une constellation de capteurs : C'est un réseau sans fil qui joue le rôle de référentiel afin de trouver les coordonnées d'un capteur mobile particulier ou sonde mobile.
2. Une sonde mobile : Elle est manipulée par un opérateur humain, qui au contact de la pièce à mesurer, est localisée par la constellation de capteurs.
3. Une unité centrale : C'est l'unité ou puits qui récolte les coordonnées des points mesurés et en assure le traitement.

Ce système baptisé « Mobile Spatial Coordinate Measuring System » ou MScMS permet la mesure d'objets de grandes dimensions, car n'est pas contraint physiquement par les dimensions d'une machine et de son instrumentation. MScMS nécessite cependant une intervention humaine pour la manipulation de la sonde mobile. Par contre le coût d'un tel dispositif est naturellement moindre que celui d'une machine de mesure traditionnelle, avec une flexibilité d'usage supérieure. On peut également noter que les capteurs sont situés en dehors de l'objet à mesurer. L'inconvénient actuel majeur d'un tel dispositif est lié à la précision et la fiabilité de la mesure obtenue [18].

Cette petite revue bibliographique va nous permettre de situer nos travaux. En effet, nous proposons un système de mesure constitué d'un réseau de capteurs fixes positionnés directement sur ou dans le produit à mesurer. Les données de localisation des nœuds permettent de déterminer les informations utiles au dimensionnement des produits.

III. SYSTÈME D'AUTO-MESURE

Le principe original que nous proposons ici, dénommé SMS pour Self-Measurement System, est de considérer le produit, quelle que soit ses dimensions, comme étant instrumenté par un réseau de capteurs. Ce réseau de capteurs est intimement lié au produit, et le tout constitue un système apte à s'auto-mesurer [19]. Les paragraphes suivants positionnent la stratégie, et décrivent le processus proposé pour aboutir à ces caractéristiques du SMS.

A. Positionnement

La Fig. 2 présente le contexte et le positionnement de nos travaux. On peut y voir que trois types de problèmes y apparaissent, à savoir les problèmes de :

1. Instrumentation : il s'agit ici de doter le produit d'un réseau de capteurs sans fil, et de trouver la façon de déployer ce réseau dans/sur le produit, soit de manière aléatoire ou soit de manière uniforme.
2. Technologie : quelles sont les caractéristiques du dispositif par rapport au produit et son environnement (température, humidité, etc.) et l'influence du matériel sur les capacités de communication? La capacité et la durée de la batterie sont également des éléments importants à prendre en compte.
3. Logiciel : Principalement liées à la capacité et à la rapidité de traitement de l'information, mais également avec un moindre coût énergétique.

Notre application de recherche s'appuie fortement sur les Wireless Sensor Network. L'objet de ce papier dans un premier temps, est de vérifier la faisabilité de la stratégie et de ses limites sans l'utilisation des réseaux de capteurs sans fil réels. Pour ce faire, plusieurs hypothèses doivent être prises en considération :

B. Hypothèses

1. Les produits sont dotés de particules de poussière intelligente, vue ici comme une multitude de petites particules de faible coût et pouvant communiquer sans fil entre elles. C'est l'entrée principale de la stratégie SMS.
2. La répartition des particules est uniforme dans la matière. Cette hypothèse est nécessaire pour assurer que les particules de poussière intelligente distribuées sont dans toutes les parties du produit, afin de pouvoir estimer ses dimensions.
3. La propagation des ondes radio est un modèle sphérique, et la distance de transmission est identique pour toutes les particules. Elle est dépendante du type de produit et de son homogénéité.
4. La réception des signaux est supposée non perturbée par les différents types de matériaux constituant le produit, ni par l'hétérogénéité propre à chacun.

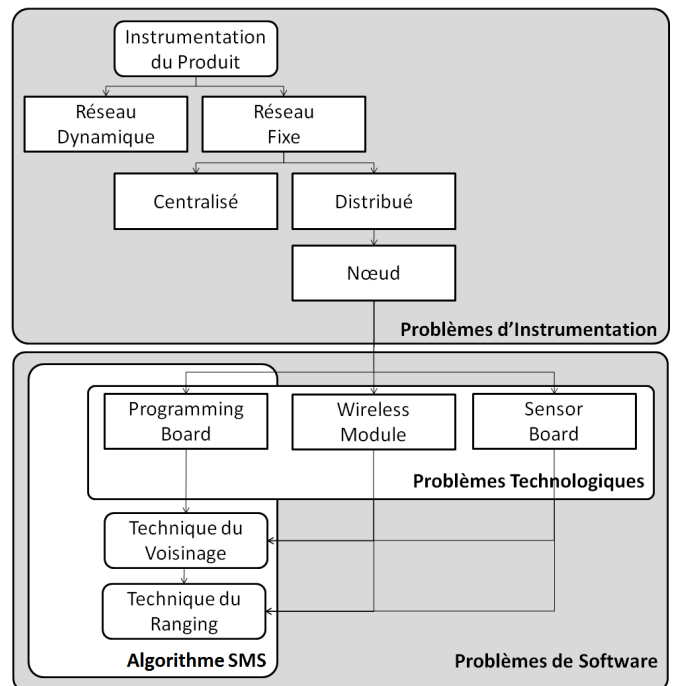


Fig. 2. SMS : Positionnement

Sous ces conditions, il nous semble possible d'appliquer notre principe SMS à des produits. Ces produits peuvent être de petite taille et instrumentés par des Smart Dust, mais les principes proposés s'appliquent tout autant à des produits de grandes dimensions pouvant pour leur part être instrumentés par des WSN existants [19].

C. Stratégie SMS

Nous présentons ici, point par point et en les détaillant, les différents éléments de notre stratégie déjà présentée dans l'introduction de ce papier.

C.1 Instrumentation du Produit

La première étape, c'est l'instrumentation du produit avec un réseau de poussière intelligente pouvant être intégré dans le produit. Les multiples travaux sur les « smart dust particles » laissent à penser qu'ils pourront être utilisés dans les produits intelligents, afin de les doter d'un système nerveux.

Définition 1. Réseau de Capteurs sans Fil

Soit $X = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\}$ un réseau de n nœuds avec communication sans fil entre eux, dont chaque nœud x_i possède :

1. une région de couverture limitée $b_i < \infty$, donnée par le disque de rayon r_i de communication.
2. un niveau d'énergie limitée $e_i < \infty$, pour effectuer les processus de calcul.

La façon de déployer ce réseau peut être aléatoire ou régulière (e.g. une grille). Dans tous les cas, afin que chaque nœud puisse déterminer de façon autonome la quantité de nœuds dans une région de couverture (deuxième étape du SMS), il est nécessaire de connaître la valeur de la densité ou quantité de nœuds déployées sur la surface du produit.

Définition 2. Densité d'instrumentation

Soit A une surface de communication où il est possible de déployer de manière uniforme un réseau X : la densité de nœuds (constante) ρ est exprimée par la relation :

$$\rho = \frac{n}{A}, \quad (1)$$

La quantité de nœuds optimale pour avoir une bonne connectivité au sein du réseau, à un niveau technologique donné, peut être calculée [20]. Dans notre application, cette densité est intimement liée à la précision de la mesure, comme nous le montrerons dans nos résultats. Elle constitue pour nous une variable d'entrée.

Définition 3. Quantité Théorique : QT

Soit b_i une région de couverture pour chaque nœud x_i définie pour le disque de rayon r_i , il existe alors une quantité de nœuds constante QT_i exprimée par la relation :

$$QT_i = f(b_i; \rho), \forall i, i \leq n \quad (2)$$

C.2 Technique de Voisinage

L'objectif principal de cette étape est d'estimer la quantité de nœuds dans le rayon de couverture défini précédemment en (2). [21] montre comment des structures de voisinage différentes dans les réseaux (les liens entre les nœuds) peuvent influencer les protocoles de communication entre les nœuds. Plusieurs définitions du voisinage peuvent donc exister dans le même réseau.

Dans notre cas, nous avons considéré une structure de voisinage aléatoire, où chaque nœud trouve sa quantité de voisins sur la base de l'énumération du nombre de nœuds avec lesquels il peut communiquer directement, voir [22]. Ces techniques vont nous permettre de déterminer les nœuds plutôt à l'intérieur ou plutôt à l'extérieur de la forme géométrique mesurée.

Définition 4. Quantité Réelle : QR

Soit A une surface de communication où un réseau X est déployé de manière uniforme. Chaque nœud x_i est capable de trouver une quantité de voisins QR_i , dans une région d_i définie par l'expression :

$$d_i = A \cap b_i, \forall i, i \leq n \quad (3)$$

QR_i est donc définie par :

$$QR_i = g(d_i; \rho), \forall i, i \leq n \quad (4)$$

La Fig. 3 montre une représentation d'un réseau déployé sur une surface A , où chaque nœud x_i possède une région de couverture en forme de disque b_i , définie par le rayon r_i , et une couverture d_i définie par l'intersection entre A et b_i .

Définition 5. Nœuds du Bord

Soit $X = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\}$ un réseau de n nœuds défini en (1) alors il existe un réseau $Y = \{y_1, y_2, y_3, \dots, y_m\}$ au bord de X tel que pour chaque nœud y_j nous avons :

$$QT_j \neq QR_j, \forall j, j \leq m \quad (5)$$

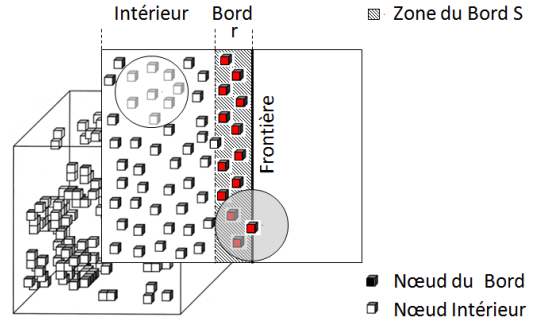


Fig. 3. Technique de voisinage

La Fig. 3 montre que quand $b_i = d_i$, les nœuds sont à l'intérieur de la surface : la quantité de nœuds théorique est la même que la quantité réelle de nœuds trouvée ou $QT_j = QR_j$. Au contraire, au bord nous avons $QT_j \neq QR_j$.

La dernière définition permet à chaque nœud, sans communiquer les uns avec les autres, de déterminer si il est un nœud de bord dans le réseau X . Pour faire ça, chaque nœud doit déterminer et comparer les valeurs QR et QT de façon indépendante. Ce processus, génère une zone S au bord de la surface A , où il est possible de trouver tous les nœuds de l'ensemble Y , voir Fig. 3. Cette zone S permet d'introduire une définition théorique de précision de la stratégie SMS, qui sera testé par simulation dans la section suivant.

Définition 6. Précision Théorique

Soit A une surface de communication où il est possible de déployer de manière uniforme un réseau X avec un rayon de couverture commun r pour chaque nœud. La précision s'exprime par la largeur de bordure s de S , tel que :

$$s \leq r - 1 \quad (6)$$

L'expression (6) s'explique mieux dans la Fig. 3 où nous avons deux cas selon la proximité d'un nœud au bord. Dans le premier cas, où la région de couverture b_i est blanche, on peut voir un nœud à l'intérieur du produit qui répond toujours à $d_i = b_i$, selon (3). Dans le deuxième cas, où b_i est gris nous avons un nœud du bord (nœuds rouges dans la Fig. 3) où $d_i \neq b_i$. Finalement, on peut dire que la largeur de la zone du bord S contient l'ensemble Y dans un intervalle $0 \leq s \leq r - 1$. La dernière étape alors, c'est trouver dans ce réseau Y , des nœuds pour estimer les distances entre eux, afin de mesurer les dimensions du produit.

C.3 Technique du Ranging

L'étape précédente détermine les nœuds situés à la frontière du produit : chaque nœud est capable de vérifier s'il est un nœud frontière ou non, voir (5). Cette étape (étape finale) se compose de l'estimation des distances entre ces nœuds, afin d'obtenir les dimensions du produit. En ce sens, chaque nœud doit déployer des techniques pour déterminer leur distance point à point : appelés aussi ranging.

Deux techniques de localisation, technique de voisinage (détermination pour chaque nœud du nombre de nœuds voisins dans sa région de couverture) et technique de ranging (pour déterminer la distance entre des nœuds), sont potentiellement utilisables dans le cadre de nos travaux.

D'un point de vue bibliographique, nous nous sommes focalisés ici sur les techniques de ranging. Ces techniques de localisation dans les réseaux de capteurs sans fil peuvent être divisées en deux groupes. Le premier groupe est basé sur les distances (range-based), le second est basé sur la proximité (proximity-based ou range-free).

Nous limitons notre présentation aux techniques issues du premier groupe, car ces techniques sont les plus proches de nos besoins, et sont maintenant détaillées.

1. Time of Arrival. La distance d_{ij} entre un émetteur i et un récepteur j peut être déterminée en utilisant le temps de propagation (t) et la vitesse d'un signal (v) [23]. Il ya deux types d'estimation. One-way ou aller-simple est une manière de propager le signal avec une précision d'horloge importante à partir d'un émetteur i jusqu'à un récepteur j , et qui s'exprime par la relation :

$$d_{ij} = (t_2 - t_1)v \quad (7)$$

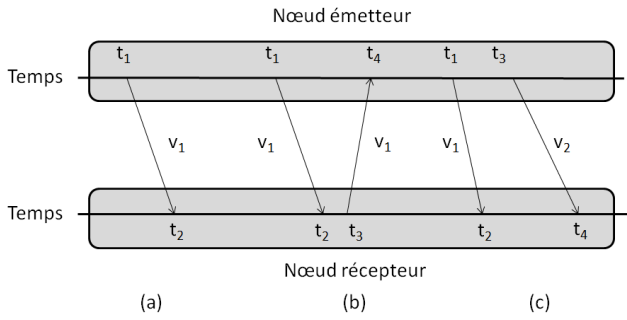


Fig. 4. Technique du Ranging : ToA et TDoA

La Fig. 4 partie (a) montre graphiquement que le temps t_1 correspond au temps de sortie d'un signal de l'émetteur, et le temps t_2 le temps de réception dans le récepteur.

Une autre solution pour estimer la distance, est d'utiliser un aller retour du signal de propagation ou Two-ways. La Fig. 4 partie (b) montre les nouveaux temps de propagation t_3 et t_4 qui correspondent aux temps de sortie et de réception du signal retour, qui permettent de déterminer la distance selon la relation suivante :

$$d_{ij} = (t_4 - t_1)(t_3 - t_2)v \quad (8)$$

2. Time Difference of Arrival. Cette procédure utilise deux signaux qui se propagent avec des vitesses différentes v_1 et v_2 (par exemple un signal radio et un autre de bruit). Le signal v_1 est envoyé par l'émetteur i à l'instant t_1 , et reçu par le récepteur j à l'instant t_2 . Le signal v_2 est envoyé à un moment t_3 par l'émetteur plus un temps d'attente t_{wait} , et reçu à l'instant t_4 par le récepteur (voir Fig 4 partie (c)). La distance entre l'émetteur et le récepteur est alors déterminée par la relation :

$$d_{ij} = (v_1 - v_2)(t_4 - t_2 - t_{wait}) \quad (9)$$

Cette technique ne nécessite pas de synchronisation de l'horloge, et peut avoir une grande précision, mais nécessite un équipement supplémentaire.

3. Received Signal Strength. La force du signal diminue avec la distance, et peut être estimée par l'indicateur RSSI (Received Signal Strength Indicator)[24]. Ensuite, il est possible de déterminer la distance entre un émetteur i et un récepteur j avec la relation suivante :

$$d_{ij} = \sqrt[\alpha]{c \times \frac{P_i}{P_j}} \quad (10)$$

Dans ce cas, c est le gain d'antenne ou l'amplification de la puissance d'une antenne, P la puissance du signal reçu, et α le coefficient de perte de puissance dans le modèle de propagation.

4. Angle of Arrival. Aussi appelée DoA (Direction of Arrival). Cette méthode détermine la position d'un point dans l'espace à partir d'un réseau d'antennes avec des signaux de propagation dans différentes directions. Dans la littérature il y a des méthodes actuellement disponibles pour déterminer la position d'un ou plusieurs objets, et donc d'estimer la distance relative entre eux. Le calcul vient de l'utilisation des propriétés géométriques qui permettent d'utiliser la connaissance de la valeur des angles, afin de déterminer la distance entre les nœuds [25].

Les techniques basées sur la force du signal (RSS) présentent des problèmes majeurs concernant le manque de précision par rapport aux techniques ToF. En effet le signal dépend de la distance entre les nœuds et des conditions de l'environnement, ce qui rend difficile de définir une valeur précise. RSS est un bon choix quand le problème ne nécessite pas de précision ou lorsque les économies en consommation d'énergies sont importantes. Les techniques de ranging par signaux acoustiques RS ou de radiofréquence RF présentent le même problème. Cependant les avantages de ces techniques ToF sont : une haute sensibilité, rapide, bon marché et simple. Finalement, dans le cas des mesures basées sur AoA, elles sont affectées par le bruit additif et les multi-trajets du signal. De plus, il est peu probable que les capteurs soient placés à une adresse connue, et la fiabilité de la localisation peut dépendre de l'orientation du capteur ou de l'antenne.

Les techniques permettant l'obtention des meilleurs résultats d'estimations de distance entre nœuds sont toujours un problème de recherche ouvert avec un grand nombre de paramètres (puissance d'émission, qualité des signaux, perturbations du matériel ...) qui induisent autant de sources d'erreurs possibles. La précision des différentes techniques de ranging ne seront pas développées ici depuis dans cette étape nous n'allons pas à travailler avec des capteurs réels. Au contraire, une méthode (entre plusieurs) de mesure sera présente dans la définition suivante :

Définition 7. Erreur d'estimation

Soit Y un ensemble des nœuds déployés au bord de A avec une précision s . Soit y_p un nœud puit choisi au hasard servant du point de référence. Chaque nœud y_j communique avec y_p afin d'estimer la distance entre eux $d_{p,j}$. Enfin y_p détermine 4 nœuds selon différentes distances : $d_{p,j}^{x_{max}}$, $d_{p,j}^{x_{min}}$, $d_{p,j}^{y_{max}}$ et $d_{p,j}^{y_{min}}$. L'erreur d'estimation e s'exprime par la relation :

$$e = A - |d_{p,j}^{x_{max}} - d_{p,j}^{x_{min}}| |d_{p,j}^{y_{max}} - d_{p,j}^{y_{min}}| \quad (11)$$

IV. SIMULATION ET ANALYSE

L'objectif de cette étape est de montrer la faisabilité de la stratégie SMS. Pour ce faire, le processus d'auto-mesure SMS a été développé dans l'environnement de programmation Python, qui nous permettra de tester l'influence des paramètres suivants :

1. Le mode de distribution des nœuds.
2. La densité des nœuds.
3. Le rayon de couverture des nœuds.

sur la précision théorique s définie en (6), et l'erreur d'estimation e , définie en (11).

Le réseau de capteurs X , défini en (1), sera, pour nos simulations, déployé dans un carré de côté L et de surface $A = L^2$. Afin de bien comprendre l'influence de la distribution des nœuds dans le carré, le réseau X sera déployé selon deux modes possibles suivants :

1. Discret : X est déployé sur A de manière discrète (sur une grille), avec n positions entières sur Z^2 .
2. Continu : X est déployé sur A de manière aléatoire sur R^2 , selon une loi de distribution uniforme $U(0, L)$.

La taille de la surface A n'influence pas directement les résultats obtenus, cependant elle détermine la valeur maximale que peut avoir un rayon de couverture, dans ce cas $r_{max} < (\sqrt{2}/2) \times L$ [19]. Le choix de L est donc arbitraire, mais nous permet de tester différents rayons de couverture r_i . Pour nos simulations nous prendrons $L = 11$ et $r = \{1, 2, 3\}$

En terme de quantité de nœuds n dans le cas discret, nous avons un nombre fini de positions entières à l'intérieur du carré de côté L , $n_{max} = (L + 1)^2$, soit $n = 144$ dans notre exemple et par conséquent $X = \{x_1, x_2, \dots, x_{144}\}$. Au contraire, dans le cas continu, R^2 est dense, et par conséquent nous avons choisi un maximum de 1000 nœuds, soit $X = \{x_1, x_2, \dots, x_{1000}\}$.

Finalement les données d'entrée sont traitées par l'algorithme SMS proposé, qui développe le processus de calcul du QT basé sur la densité (n/A) selon la relation suivante :

$$QT_i(n, r_i; L) = \frac{\pi}{L^2} (r_i)^2 n = \pi \rho r_i^2, \forall i, i \in X \quad (12)$$

Ensuite le calcul de la quantité QR est réalisé en comptabilisant la quantité de nœuds ayant une distance euclidienne inférieure au rayon de couverture r prédéfini.

Sur la base des valeurs numériques choisies précédemment nous présentons maintenant les résultats obtenus par rapport à la précision et l'erreur d'estimation.

1. **Précision.** Dans le cas discret, quand la surface A est complètement dense ($n = 144$), le rayon de couverture r détermine la précision s , selon $s = r - 1$. La Fig. 5, montre comment la valeur de s est déterminée par le rayon de couverture r , dont les valeurs représentées sont $r = 1$ ($s = 0$) et $r = 3$ ($s = 2$). Pour des surfaces moins denses (cas $n = 72$, ou $(72/144) \times 100 = 50\%$ de densité), la précision ne satisfait pas l'expression proposée dans (6). Les meilleurs résultats sont obtenus pour des surfaces complètement denses : dans les cas discrets, le facteur densité est essentiel pour déterminer la précision s .

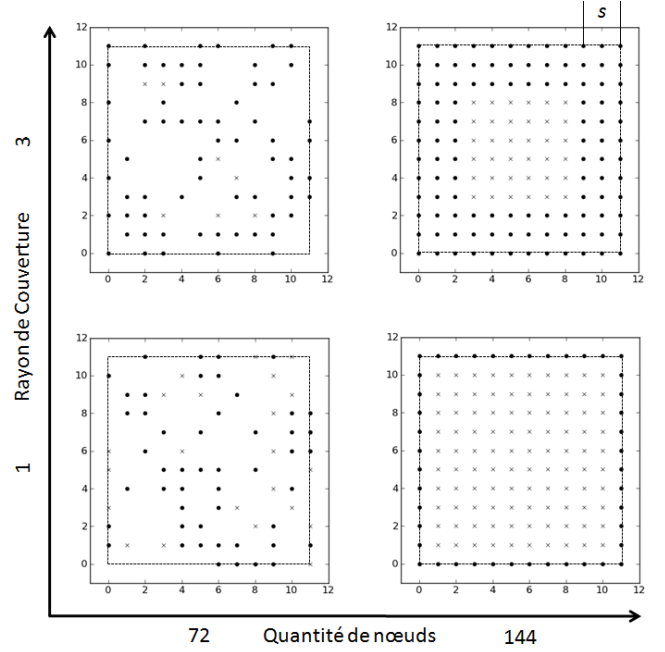


Fig. 5. Précision SMS : Cas Discret

Dans le cas continu, la Fig. 6 montre que la précision est bonne dans les surfaces bien denses ($n = 1000$), et avec des niveaux élevés de couverture ($r = 3$). Dans le cas d'une surface dense, et d'une faible couverture ($r = 1$), l'expression proposée dans (6), ne peut s'appliquer. En effet avec des niveaux faibles de couverture, trouver l'égalité proposée dans (5) entre les quantités QR et QT est plus difficile dans cas, de part le déploiement aléatoire des nœuds. Les meilleurs cas, se présentent avec des niveaux de couverture plus élevés : dans les cas continus, le facteur couverture est essentiel pour déterminer la précision s .

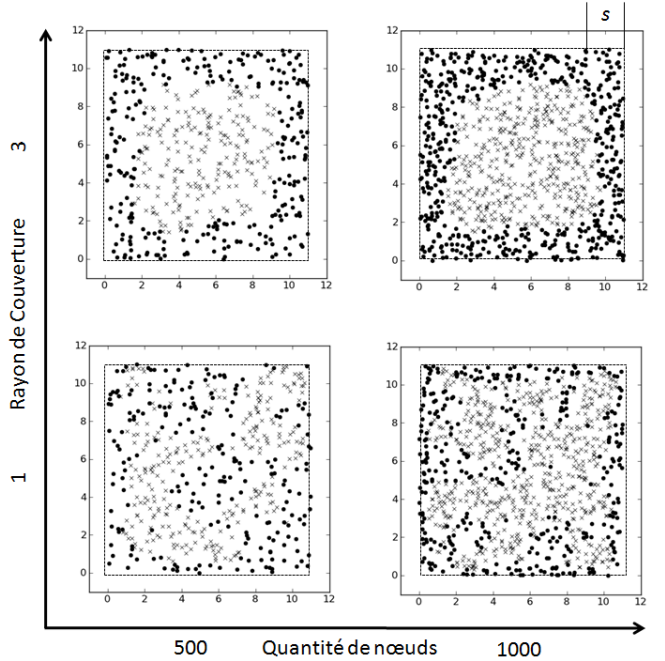


Fig. 6. Précision SMS : Cas Continu

2. Erreur d'estimation. La Fig. 7 montre les résultats de l'expression proposée dans (11) pour le cas discret. Les différents rayons de couverture n'ont pas d'influence sur la détermination de l'erreur e quand la surface A n'est pas complètement dense (où $e = 0$). Une analyse statistique réalisé sur la base de 100 simulations nous a permis de déterminer que l'erreur moyenne (ligne noire) est zéro pour une quantité moyenne de 45 nœuds (30% de densité environ) avec une écart type de 5 nœuds.

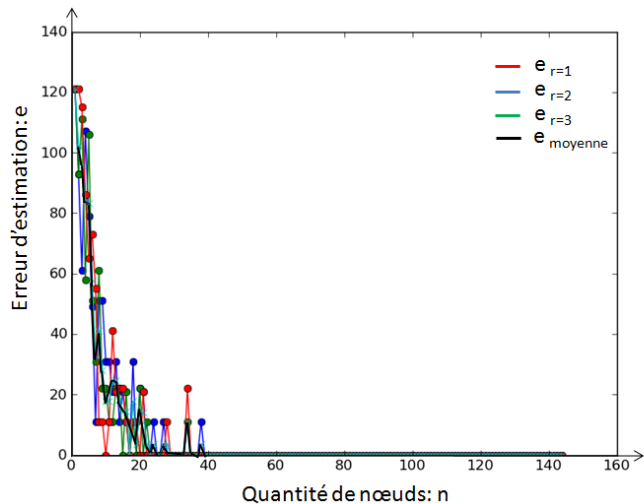


Fig. 7. Erreur d'estimation : Cas Discret

La Fig. 8 montre également les résultats par rapport à l'erreur e , dans le cas continu. L'expression (11) s'applique avec une surface relativement dense. Une analyse statistique après de 100 simulations nous a permis de déterminer que l'erreur moyenne (ligne bleue) suit un modèle de type :

$$e_{moyenne} = 369,28n^{-0,963} \quad (13)$$

avec un coefficient de détermination $R^2 = 0,9165$, et par conséquent e n'est théoriquement jamais à zéro. Donc, la manière continue de déployer un réseau, n'est pas un bon choix si nous voulons un $e = 0$.

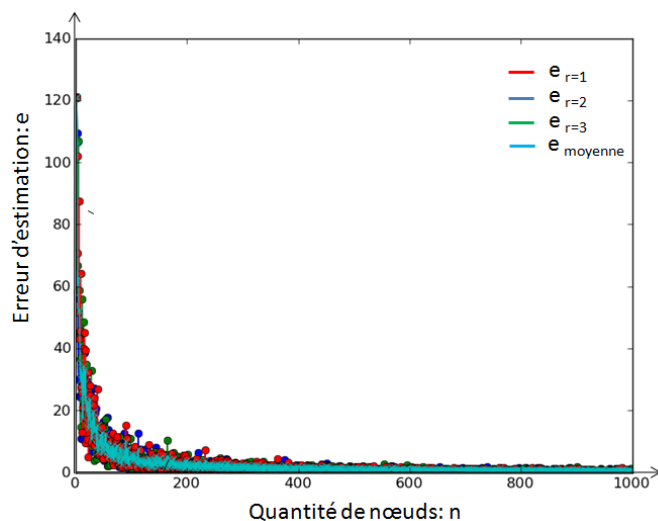


Fig. 8. Erreur d'estimation : Cas Continu

La meilleure façon de déployer le réseau X dépend au final d'une limite des ressources (on ne peut pas déployer un réseau assez dense) ou d'une limites d'instrumentation (on ne peut pas déployer un réseau de manière discret). En fonction de la précision désirée un dimensionnement du réseau pourrait être réalisé. Dans l'idéal le déploiement d'un réseau de façon discrète complètement dense et avec un rayon de couverture minimum pourrait répondre aux 2 critères étudiés ici. Cependant cet idéal serait cher, avec des problèmes d'instrumentation forts, mais avec une consommation d'énergie faible sur chacun des nœuds.

V. CONCLUSION

La revue bibliographique effectuée nous a permis de mettre en évidence l'antagonisme, pour les systèmes de mesure de grande échelle, entre la flexibilité (capacité du système à travailler dans différents environnements, et d'effectuer différents types de mesure) et la performance (caractéristiques de la mesure en termes de stabilité, répétabilité, reproductibilité et précision). Les systèmes comme les «laser Trackers», «laser radars» et «photogrametry» ont des niveaux moyens de flexibilité, mais des niveaux élevés de performance. Au contraire, les systèmes de mesure comme «indoor GPS», «théodolites», et «MSCMS», ont des niveaux élevés de flexibilité, mais des niveaux de précision faibles. L'équilibre entre flexibilité et précision est donc une question délicate et non encore résolue.

Notre proposition, la stratégie SMS, cherche à répondre à cette question. Le système proposé utilise le concept de réseau de capteurs sans fil intégré directement dans la matière constituant les objets à mesurer. Il a été développé avec l'objectif de proposer un système d'auto-mesure du produit. Notre proposition part de l'hypothèse que les restrictions technologiques actuelles (petits capteurs à très faible coût, avec des capacités de communication non perturbées par le type de matériau, et avec une consommation d'énergie qui permet au produit d'effectuer l'auto-mesure pendant tout la durée de son cycle de vie) peut être contournée.

Les résultats obtenus par la méthode proposée, montrent l'influence de différents paramètres sur la performance du système. Le choix d'un mode de déploiement d'un réseau sur la surface (dans le cas traité) du produit, est lié à la quantité de nœuds du réseau, et au rayon de couverture de chacun d'entre eux. Ces choix permettent d'obtenir différents niveaux de performances représentés et évalués par s et e . Les différentes expressions proposées pour le calcul de ces valeurs peuvent sans doute être améliorées. C'est par exemple le cas pour les expressions (11) et (12). Une partie importante de nos travaux futurs visera à développer des expressions mathématiques plus précises pour ces relations. Un prototype, incluant les protocoles de communication et les algorithmes de voisinage et de ranging, constitue l'essentiel des travaux encore à mener. En l'état, cette étude nous a permis de montrer la faisabilité du concept proposé, et les limites théoriques de la précision et de l'erreur d'estimation pouvant être obtenues. Cette première étape est cependant une contribution importante au concept de produit intelligent.

RÉFÉRENCES

- [1] Gerben G. MEYER et Kary FRÄMLING : Intelligent products : A survey. *In Computers in Industry* 60(3), pages 137–148, 2009.
- [2] T. BUSCH : *Fundamentals of dimensional metrology*. Numéro pt. 1 de Iu - Mechanical Technology. Delmar, 1989.
- [3] Maurizio GALETTO, Luca MASTROGIACOMO et Barbara PRALIO : A wireless sensor network-based approach to large-scale dimensional metrology. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 33, 2010.
- [4] Brett WARNEKE, Kristofer S. J et Smart DUST : Smart dust : Communicating with a cubic-millimeter computer. *Classical Papers on Computational Logic*, 1:372–383, 2001.
- [5] J. M. KAHN, R. H. KATZ et K. S. J. PISTER : Next century challenges : Mobile networking for "smart dust". *In Proceedings of the 5th annual ACM/IEEE international conference on Mobile computing and networking*, 1999.
- [6] Rodolfo PEÑA, Nicolas KROMMENACKER et Patrick CHARPENTIER : A new strategy for dimensional metrology using smart dust networks. *International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), 21-23 September 2011, Guimarães, Portugal*, 2011.
- [7] Ian F. AKYILDIZ, Weiiian Su, Yogesh SANKARASUBRAMANIAM et Erdal CAYIRCI : Wireless sensor networks : a survey. *Computer Networks*, 38:393–422, 2002. Survey.
- [8] Hsu KAHN, , V. S. Hsu, J. M. KAHN et K. S. J. PISTER : Wireless communications for smart dust. *In Electronics Research Laboratory Technical Memorandum M98/2*, page 94720, 1998.
- [9] Yunxia CHEN, et Qing ZHAO : Wireless sensor networks. *IEEE Commun. Lett.*, 9:976–978, 2004.
- [10] Archana BHARATHIDASAN et Vijay Anand Sai PONDURU : Sensor networks : An overview. *IEEE Potentials*, 22(2):20–23, 2003. Survey.
- [11] Ian F. AKYILDIZ, Weiiian Su, Yogesh SANKARASUBRAMANIAM et Erdal CAYIRCI : A survey on sensor networks. *IEEE Communications Magazine*, 40(8):102–114, 2002. Survey.
- [12] G. ASADA, M. DONG, T. S. LIN, F. NEWBERG, G. POTTIE et W. J. KAISER : Wireless integrated network sensors : Low power systems on a chip. *In Proceedings of the 24th European Solid-State Circuits Conference (ESSCIRC '98)*, pages 9–16, 1998. WINS.
- [13] Warneke B., Last M., Liebowitz B. et Pister K.S.J. : Smart dust : Wireless networks of millimeter-scale sensor nodes. *Computer*, 34:44–51, 2001.
- [14] Martini D., Mazerolle F., Cherles J-P. et Hochard CH. : Présentation d'un système de mesure embarqué - description, réalisation et extension. *19 ième Congrès Français de Mécanique*, 2009.
- [15] Howie CHOSET et Keiji NAGATANI : Topological simultaneous localization and mapping (slam) : Toward exact localization without explicit localization. volume 17, pages 125–137, 2001.
- [16] Andrés VÉJAR et Patrick CHARPENTIER : Generation of an adaptive simulation driven by product trajectories. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2011.
- [17] Hugh DURRANT-WHYTE et Tim BAILEY : Simultaneous localization and mapping (slam) : Part i the essential algorithms. *IEEE Robotics and Automation magazine*, 2:2006, 2006.
- [18] Franceschini F, Galetto M, Maisano DOMENICO et Mastrogiacom L : Mobile spatial coordinate measuring system (mscms) - introduction to the system. *International Journal of Production Research*, 47:3867–3889, 2009.
- [19] Rodolfo PEÑA, Alan ALARCÓN, Nicolas KROMMENACKER, Jean-Yves BRON et Patrick CHARPENTIER : Les réseaux de capteurs en métrologie dimensionnelle : Perspectives. 2011.
- [20] Khan S. U. et Ardil C. : On the optimal number of smart dust particles. *International Journal of Information Technology*, 5:93–96, 2009.
- [21] Muhammad Jafar SADEQ et Matt DUCKHAM : Effect of neighborhood on in-network processing in sensor networks. *In Proceedings of the 5th international conference on Geographic Information Science, GIScience '08*, pages 133–150, Berlin, Heidelberg, 2008. Springer-Verlag.
- [22] Guang JIN et Silvia NITTEL : Ned : An efficient noise-tolerant event and event boundary detection algorithm in wireless sensor networks. *In Proceedings of the 7th International Conference on Mobile Data Management, MDM '06*, pages 153–, Washington, DC, USA, 2006. IEEE Computer Society.
- [23] Guoqiang MAO, Baris FIDAN et Brian D.O. ANDERSON : Wireless sensor network localization techniques. *Computer Networks : The International Journal of Computer and Telecommunications Networking*, 51:2529–2553, 2007.
- [24] Joshua N. ASH et Lee C. POTTER : Sensor network localization via received signal strength measurements with directional antennas. *In in Proceedings of the 2004 Allerton Conference on Communication, Control, and Computing*, pages 1861–1870, 2004.
- [25] R. PENG et M. L. SICHITIU : Angle of arrival localization for wireless sensor networks. *IEEE Communications Society on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks*, 1:374–382, 2006.