

---

# Les Réseaux de Capteurs en Métrologie Dimensionnelle

## Perspectives

**Rodolfo Peña — Alan Alarcón — Nicolas Krommenacker — Jean-Yves Bron — Patrick Charpentier**

*Centre de Recherche en Automatique de Nancy  
Université Henri Poincaré  
Campus Sciences, 54506 Vandoeuvre Cedex  
{prenom.nom}@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.*

*ABSTRACT. Sensor networks are currently an area of study and research particularly preferred. The technological developments of sensors and their means of communication allow us to imagine new applications for the relatively near future. Among these applications, we for our part, focused on dimensional metrology. This paper is therefore intended, initially, to identify various researches using wireless sensor networks WSN for dimensional metrology. In a second step, this paper proposes a principle of self-measurement for the products endowed with wireless sensor networks.*

*MOTS-CLÉS : réseaux de capteurs, métrologie dimensionnelle, communication sans fil.*

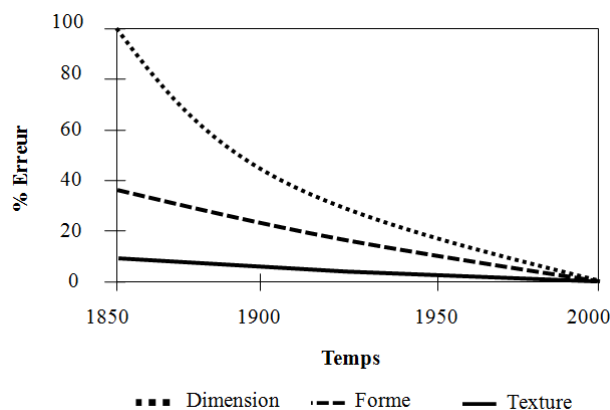
*KEYWORDS: sensor networks, dimensional metrology, wireless communication.*

---

## 1. Introduction

La mesure peut être définie comme un processus empirique consistant à affecter de manière objective des valeurs aux attributs des objets du monde réel, de sorte à les représenter ou les décrire. Aujourd'hui, en fonction des marchés fortement concurrentiels et des niveaux élevés de satisfaction requis par les clients, la qualité finale des produits doit être vérifiée. En ce sens, les activités de contrôle et en particulier la métrologie industrielle sont devenues des activités essentielles pour la satisfaction du client.

D'un point de vue historique la précision des mesures des dimensions, des formes et de la texture n'a cessé de s'améliorer. La Figure 1, montre cette évolution des différents types de mesure dans le temps. On peut remarquer que depuis 1850, il existe une amélioration des systèmes de mesure (Nielsen, 2005) et donc de la précision obtenue.



**Figure 1.** Evolutions comparatives des précisions de différents types de mesure dans le temps (Nielsen, 2005).

La métrologie dimensionnelle est la science des mesures des formes et des dimensions spatiales qui s'appuie maintenant sur plus de 150 ans de retour d'expérience. 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 statistiques si cela est nécessaire (Busch, 1989). Les systèmes traditionnels de métrologie dimensionnelle utilisent des équipements de mesure basés sur des technologies différentes (par exemple palpeurs, laser, caméras, rayonnements électromagnétiques, ...). Elles offrent des niveaux de performance et de précision différents.

Dans la plupart des cas les systèmes de mesure utilisés pour le contrôle des dimensions, positions, formes et surfaces des produits sont centralisés et chers. Les machines à mesurer tridimensionnelles sont des exemples typiques de ce type de

système. Elles possèdent de plus l'inconvénient d'être limitées à la mesure de pièces de dimensions relativement réduites. L'évolution récente et rapide des réseaux de capteurs permet maintenant d'imaginer des solutions les utilisant de manière intensive en métrologie dimensionnelle.

L'objectif de ce papier est d'analyser différents travaux visant des applications de métrologie dimensionnelle et utilisant des capteurs dotés de capacités à communiquer entre eux. Les avantages et désavantages par rapport à des approches plus traditionnelles (du type machines à mesurer) seront présentés. Enfin nous présenterons quelques pistes originales pour un changement de paradigme en métrologie dimensionnelle.

## **2. Les réseaux de capteurs**

Ce paragraphe nous permet dans un premier temps de présenter les réseaux de capteurs sans fil (Wireless Sensor Networks) et les techniques de localisation que ces réseaux sont capables de mettre en œuvre. Ces techniques peuvent en effet être utiles, comme nous le présenterons au paragraphe 3 pour une estimation des caractéristiques morfo-dimensionnelles de produits. Dans un second temps nous présenterons ici différents travaux de recherche utilisant déjà ces réseaux de capteurs dans des applications de métrologie dimensionnelle.

### **2.1. Concept de base**

Les réseaux de capteurs sans fil, sont le résultat des avancées récentes de différentes technologies : circuits numériques, communication sans fil, composants et logiciels de type nanoWatt Technologies. Actuellement de nombreux travaux sur ces WSN et leurs applications sont menés par la communauté scientifique internationale. Techniquement, un WSN peut être défini comme un ensemble de petits nœuds ou capteurs, capables de récupérer les informations de l'environnement, et de les communiquer via une communication sans fil. Une application peut alors être exécutée pour prendre des décisions (Stojmenovic, 2005). Chaque nœud est divisé en trois composants principaux (Akyildiz, 2010) : le « Wireless module » supportant la communication réseau avec l'environnement, la « sensor board » regroupant le(s) capteur(s) et son conditionneur, la « programming board » ou carte mère du nœud. A ces trois composants principaux vient naturellement se joindre la source d'énergie. Le tout est communément nommé « mote ». (Hac, 2003).

Actuellement WSN ont été mis en œuvre principalement dans le suivi de l'environnement, que ce soit à l'hôpital industrielle, militaire, les milieux naturels, l'agriculture, de la domotique, entre autres. Son objectif global est d'obtenir des renseignements pertinents en temps réel, pour traiter cette information pour détecter les changements, les tendances, la prise de décision, entre autres. Dans ce sens, une

caractéristique nécessaire des réseaux de capteurs sans fil est la capacité de localiser, pour laquelle il existe différents techniques développées (Mao G., 2007): Angle of Arrival (AoA), Received Signal Strength (RSS), Time Difference of Arrival (TDOA).

Les principaux avantages de l'WSN sont: petite taille, fonctionnant de façon autonome, dynamique de la topologie, la tolérance aux pannes, portabilité, entre autres. En ce qui concerne les inconvénients, nous avons: les limites des ressources comme l'énergie, la mémoire et de puissance CPU, le manque de normes et de protocoles, la bande passante et la couverture limitée du réseau.

## **2.2. Usages en métrologie**

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 au paragraphe 3 nos propositions.

Le papier de (Martini, 2009) est un exemple de « on-board measurement system ». 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. Les informations récoltées, la position des nœuds étant connue, permet 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, dans la boucle de contrôle-commande de l'ajustement de la voile, des informations collectées 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) (Choset, 2001) 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 et la cartographie de 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 (Véjar, 2011) 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.

Les travaux sur le SLAM constituent certainement l'une des plus remarquables réussites de la communauté robotique de ces dernières années. 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 (Durrant-Whyte, 2006).

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 »). L'originalité du mode opératoire tient ici dans leur capacité à se déplacer dans celui-ci, ce qui justifie pleinement l'usage d'un WSN.

Les travaux de (Galetto, 2010) proposent un système de métrologie dimensionnelle pour des pièces de grande échelle (« Large Scale Metrology »). Ce système est constitué de trois parties, à savoir :

- Une constellation de capteurs sans fil en réseau qui joue le rôle de référentiel par sa fonction à trouver les coordonnées d'un capteur mobile particulier ou sonde mobile. Elle est disposée au dessus de l'objet à mesurer.
- Sonde mobile, manipulée par un opérateur humain, qui au contact de la pièce à mesurer, est localisée par la constellation de capteurs.
- Une unité centrale(ou puits) pour la récolte des coordonnées des points mesurés et le traitement de ceux-ci.

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. Elle 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.

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 positionné directement sur ou dans le produit à mesurer. Les données de localisation des nœuds permettant de déterminer les informations utiles au dimensionnement des produits.

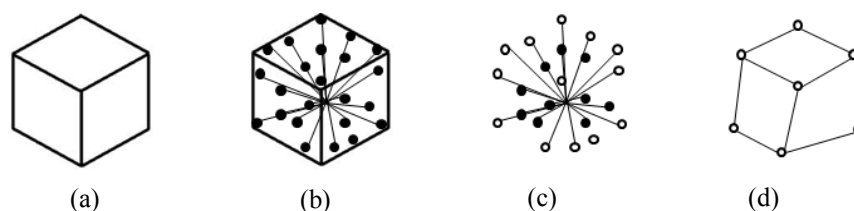
### **3. Propositions**

Le principe original que nous proposons ici 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, il fait corps avec lui, et le tout constitue un système apte à s'auto-mesurer. Nous dénommerons ce système SMS pour Self-Measurement System. Ce système est également capable de communiquer ses dimensions à son environnement.

Les paragraphes suivants décrivent le processus proposé pour aboutir à ces caractéristiques du SMS. La taille de l'objet n'y est pas présentée explicitement. En effet, le principe proposé est suffisamment générique pour pouvoir être appliqué aux objets de grandes comme de petites tailles. En l'état actuel de la technologie, il est tout à fait envisageable de mesurer, en déployant des nœuds de quelques centimètres cubes de volume dans le produit, et en suivant notre proposition, les dimensions de ce produit. Les multiples travaux sur les « smart dust particles », réseau de poussières intelligentes pouvant être intégrées dans le produit, laissent à penser qu'elles pourront être utilisées à des mêmes fins à des échelles beaucoup plus réduites.

### 3.1. Principe proposé : SMS

Le principe proposé est présenté Figure 2. On considère un produit (ici, un cube) (a) avec des « motes » déployés à l'intérieur de celui-ci (b). Pour déterminer les dimensions du produit, le réseau des capteurs doit être capable d'identifier les nœuds qui sont situés en bordure du produit (c). L'estimation de la distance entre ces nœuds de bords fournit des informations sur les dimensions du produit (d).



**Figure 2.** Le « Self-Measurement System »: (a) le produit, (b) le produit instrumenté, (c) découverte des nœuds de bords, (d) estimation des distances entre nœuds de bord.

Chacune des étapes de ce processus est maintenant détaillée.

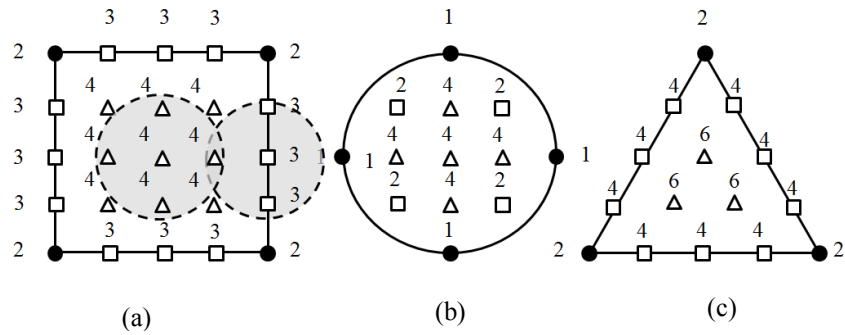
#### 3.1.1. Produit instrumenté

La première étape (Figure 2.b) consiste en doter le produit d'un réseau de capteurs WSN. En fonction de la nature du produit, composite ou non, on peut imaginer déployer ce réseau ou en surface ou dans le volume même du produit. La figure 1 représente à ce titre plutôt un matériau de type composite.

#### 3.1.2. Les nœuds du bord

L'idée de base du concept de SMS est de déterminer les nœuds du bord (Figure 2.c) du réseau. Des techniques liées au WSN permettent de découvrir la quantité  $q$  de nœuds dans une région donnée. Nous nous appuyons ici sur ces techniques pour identifier les nœuds possédant le moins de voisins, qui sont en réalité les nœuds de

bord. La Figure 3 montre la quantité de voisins pour chaque nœud dans un réseau distribué sur différentes formes géométriques (avec  $r = 1$ ,  $r$  étant le rayon de couverture de chacun des nœuds). Par exemple dans le carré (a) : les nœuds frontières (cercles noirs) représentent les capteurs avec la quantité de nœuds la plus faible dans leur domaine de couverture ( $q = 2$ ). Les nœuds représentés par carrés possèdent 3 voisins ( $q = 3$ ), et les triangles 4 voisins ( $q = 4$ ) dans leur rayon de couverture respectif avec  $r = 1$  (zone grise). Ce principe est extensible à d'autres figures géométriques, avec les mêmes hypothèses, voir la Figure 3 (b) et 3 (c).



**Figure 3:** Détermination du nombre de voisin pour chacun des nœuds sur 3 figures géométriques simples

Au final, ne sont conservés que les nœuds présentant le moins de voisins : les nœuds de bords.

### 3.1.3. Estimer la distance relative

La dernière étape (Figure 2.d) consiste à estimer la distance entre les nœuds de bord afin d'obtenir les dimensions du produit. L'ensemble des distances entre chacun des nœuds doit être déterminée. Cette détermination peut être basée basés sur les techniques vues au paragraphe 2 Received Signal Strength (RSS) ou temps de vol (ToF) mesures).

Dans le cadre de notre projet, des expérimentations doivent être menées pour étudier la performance de ces techniques. L'idée est d'estimer, dans un premier temps, ces distances sur des surfaces planes (où se positionnent les nœuds frontières).

#### 4. Conclusion

Le principe d'auto-mesure proposé permet à un produit de déterminer par lui-même ses dimensions (sans l'intervention d'un agent externe) à tout moment. Nous avons tenté de représenter (Tableau 1) montre un résumé des avantages et inconvénients du SMS.

<b>Avantage</b>	
Autonomie	Le produit n'a pas besoin d'un agent externe, ni de ressource externe pour effectuer son auto-mesure
Produit communicant	Le produit peut communiquer avec son environnement via son instrumentation embarquée.
Permanence/ dynamique	Le produit porte intrinsèquement ses dimensions quelque soient les transformations qu'il subit (découpe, assemblage, ...)
<b>Inconvénient</b>	
Précision et fiabilité	L'usage de réseaux de capteurs sans fil et des différentes techniques de localisation ne sont pas actuellement les plus précises pour un usage en métrologie dimensionnelle.
Coût	Pour obtenir une bonne estimation de la dimension, il est nécessaire d'instrumenter tous les produits, d'où un coût supplémentaire.

**Tableau 1.** Avantages et inconvénients du SMS

Le principe de SMS proposé dans ce papier est actuellement encore en cours de développement. Il laisse entrevoir de nouvelles et importantes opportunités de recherche. Le produit capable de s'auto-mesurer, quelque soit son étape de transformation dans son cycle de vie, est une contribution importante et concrète au concept de produit intelligent.



## 5. Bibliographie

- Akyildiz F., Can M., « Wireless Sensor Networks », *Series in Communication and Networking*, 2010, p. 25-27.
- Bailey T., Durrant-Whyte H., « Simultaneous Localisation and Mapping (SLAM): Part II State of the Art », *Robotics & Automation Magazine, IEEE*, vol. 13, pp. 108 – 117, Sept 2006.
- Choset H., Nagatani K., « Topological Simultaneous Localization and Mapping (SLAM): Toward Exact Localization without Explicit Localization », *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 17, n° 2, April 2001.
- Durrant-Whyte H., Bailey T., « Simultaneous Localisation and Mapping (SLAM): Part I The Essential Algorithms », *Robotics & Automation Magazine, IEEE*, vol. 13, pp. 99, June 2006.
- Galetto M., Pralio B., « Optimal sensor positioning for large scale metrology applications », *Precision Engineering* 34, 2010, p. 563-577.
- Galetto M., Mastrogiacomo L., Pralio B., « A wireless sensor network-based approach to large-scale dimensional Metrology », *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, Vol. 23, No. 12, December 2010.
- Hac A., *Wireless Sensor Network Designs*, Wiley Editions, 2003, p. 31-58.
- Hsu V., Kahn J. M., Pister K. S. J., « Wireless Communications for Smart Dust », *Electronics Research Laboratory Technical Memorandum Number M98/2*, February, 1998.
- Kurfess T., Hodgson T., *WTEC Panel Report on International Assessment of Research and Development*, Chapter V- Metrology, Sensors and Control, October 2005, U.S., p. 65-78.
- Khan S. U., Ardil C., « On the Optimal Number of Smart Dust particles », *International Journal of Information Technology*, vol. 5, no. 2, pp. 93-96, 2009.
- Martini D., Mazerolle F., Cherles J-P., Hochard Ch., « Présentation d'un système de mesure embarqué - Description, Réalisation et Extension », *19 ième Congrès Français de Mécanique*, 2009.
- Mao G., Fidan B., Anderson B., « Wireless sensor network localization techniques », *Elsevier Computer Networks*, 2007 Volume 51, pp. 2529-2553
- Pister K. S. J., Kahn J. M., Boser B. E., « Smart Dust: Wireless Networks of Millimeter-Scale Sensor Nodes », *Highlight Article in 1999 Electronics Research Laboratory Research Summary*.
- Stojmenovic I., *Handbook of Sensor Networks Algorithms and Architectures*, Wiley Editions, 2005, p. 22-27.