



HAL
open science

AVANCEES DU LCPC DANS LE DOMAINE DES RESEAUX DE CAPTEURS SANS-FIL

Vincent Le Cam, Laurent Lemarchand, Louis-Marie Cottineau, Cyril Nguyen van Phu, Christian Tessier, Daniel Bruhat, Richard Michel

► **To cite this version:**

Vincent Le Cam, Laurent Lemarchand, Louis-Marie Cottineau, Cyril Nguyen van Phu, Christian Tessier, et al.. AVANCEES DU LCPC DANS LE DOMAINE DES RESEAUX DE CAPTEURS SANS-FIL. Journées Sciences de l'Ingénieur, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Dec 2006, Marne La Vallée, France. hal-04473818

HAL Id: hal-04473818

<https://hal.science/hal-04473818>

Submitted on 22 Feb 2024

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

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

AVANCEES DU LCPC DANS LE DOMAINE DES RESEAUX DE CAPTEURS SANS-FIL

Vincent LE CAM¹, Laurent LEMARCHAND², Louis-Marie COTTINEAU³, Cyril NGUYEN VAN PHU⁴
Christian TESSIER⁵, Daniel BRUHAT⁶, Richard MICHEL⁷

1,2,3 LCPC Nantes – Service Métrologie & Instrumentation

4 LCPC Paris – Service Métrologie & Instrumentation

5,6,7 LCPC Nantes – Unité Métaux, Armatures et Câbles pour Ouvrage d'Art

Résumé

Les technologies de transmission sans-fil (wireless) ont toujours intéressé les physiciens et ce domaine est actif depuis sa naissance. Néanmoins, stimulé par le secteur des télécommunications, ce domaine connaît un regain d'intérêt et un fort développement depuis une dizaine d'années. Parler du sans-fil c'est, concrètement, parler d'une tendance mondiale à la communication, la mobilité, l'information temps réel,... Cette évolution technologique sans précédent touche la plupart des domaines d'application connus : les télécommunications (Internet et téléphonie), le médical, l'industrie et l'aéronautique, mais on constate maintenant aussi une forte réceptivité du génie civil qui fonde beaucoup d'espoirs sur ces techniques et leurs potentialités. C'est la raison pour laquelle le LCPC s'investit fortement sur ces sujets pour prendre une part active et occuper une place de choix au sein de la communauté scientifique du « Structural Health Monitoring (SHM) » et de la profession du génie civil dans les développements qui commencent à se faire jour.

1 Introduction

La surveillance de structures, l'auscultation de chaussées ou encore la sécurité routière font déjà l'objet d'instrumentation à base de réseaux de capteurs filaires. Or, ce lien filaire avec un système de supervision gérant un ensemble de capteurs a priori anodin est souvent source de défaillances et de limitations. Ces limitations sont généralement physiques : défaillances liées à la connectique (étanchéité, usure), superviseurs traditionnels gérant difficilement plus de 100 voire 1000 capteurs, fils déroulés sur de longues distances,... Ceci se manifeste par une dégradation dans la transmission des informations et une perte de fiabilité de la communication. Ces limitations peuvent aussi être financières : on constate, parfois, que les coûts de la connectique (achat, installation, ...) sont souvent supérieurs à ceux de la mesure elle-même.

Aussi les secteurs du génie civil, cités ci-dessus, constituent autant de cibles potentielles pour des réseaux de capteurs sans-fil. Le RST en général mais aussi le Service Métrologie & Instrumentation du LCPC en particulier s'est naturellement attelé, ces 3 dernières années, à acquérir ces technologies et les compétences associées afin de les décliner dans les applications faisant appel à de l'instrumentation. Le but de cet article est de faire découvrir ces technologies et leurs potentialités, puis, de présenter au moyen d'exemples les premières réalisations concrètes du LCPC en la matière.

2 Les technologies du sans-fil

2.1 Définition

Par capteur (filaire ou non) il s'entend un système électronique complet comprenant :

- un (ou plusieurs) point(s) de mesure issu(s) d'un élément sensible à une grandeur physique donnée : accéléromètre, jauge, thermocouple, etc.
- un étage de conditionnement et de conversion analogique / numérique,
- un processeur (microcontrôleur ou signal-processor), relié à une capacité de mémoire, a pour fonction d'exécuter les algorithmes « métier », cœur de l'intelligence du capteur,
- un étage de communication avec le système de supervision voire avec d'autres capteurs.

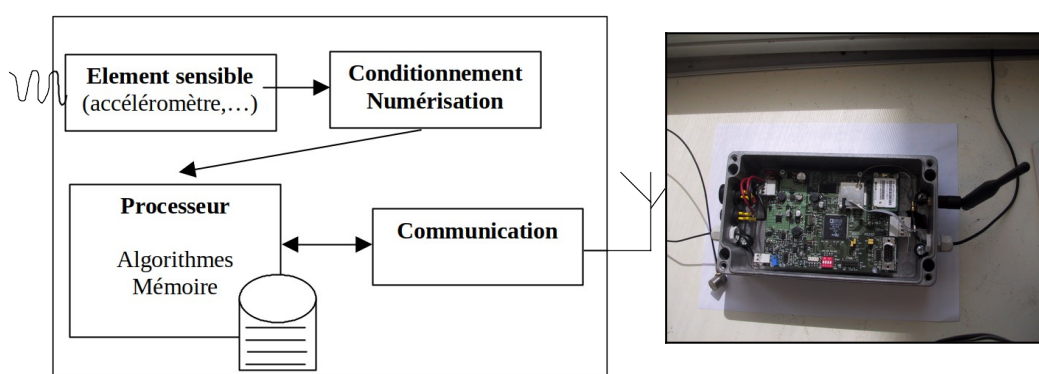


Figure 1 – a) Synoptique type d'un capteur sans-fil.

b) Photo d'un capteur prototype

Les capteurs dits « intelligents » développés au sein du LCPC, disposent sensiblement des mêmes capacités que celles d'un ordinateur classique muni d'une carte d'acquisition, hormis, bien entendu, l'absence d'écran, de clavier et de souris (figure 1).

2.2 Premières approches – Mise en évidence de nouvelles contraintes

2.2.1 La contrainte énergétique

Une approche erronée serait de penser que la différence entre un réseau de capteurs filaires et un réseau de capteurs sans-fil résiderait simplement dans le fait du remplacement des fils par des systèmes à antennes et de la disposition d'une alimentation par batterie au niveau du capteur. En réalité, la réalisation de systèmes électroniques sans-fil nécessite de revoir totalement les schémas traditionnels de conception. Deux premiers éléments essentiels peuvent être donnés pour souligner ces nouvelles exigences :

- « La communication sans-fil nécessite beaucoup d'énergie »,
- « L'énergie disponible au niveau d'un capteur sans-fil est le plus souvent très limitée ».

Aussi, dans ce domaine, le concepteur électronique doit intégrer dans la conception que la mesure physique fournie par le capteur (accélération, déformation, température, etc.) revêt la même importance que la consommation énergétique. Il convient donc d'ajouter un bloc « source d'énergie » au synoptique de la figure 1. Ainsi, si l'application nécessite beaucoup

d'échanges de données, l'aspect « énergie » devient primordial voire bloquant. C'est la raison pour laquelle une optimisation est à trouver entre le volume de données échangées et la consommation d'énergie souhaitable. La meilleure façon d'économiser de l'énergie, c'est de limiter autant que faire se peut la communication des capteurs sans fil.

2.2.2 La contrainte de synchronisation temporelle

Une autre difficulté apparaît souvent dès qu'une application est envisagée sous l'angle du sans-fil : la synchronisation. Comme tout système électronique (montres à quartz, ordinateur, etc.), les capteurs ont une base temporelle qui peut dériver (vieillesse électronique, température, etc.). Or, dans de nombreux cas, les phénomènes physiques traités et datés par les capteurs sans-fil doivent être synchrones pour corrélés les événements. Exemples : propagation d'onde, détermination de modes vibratoires, corrélation à la température ou au trafic, etc. Lorsqu'un fil reliant chaque capteur pouvait être utilisé pour distribuer un « top synchro » électrique, en sans-fil cette solution est à réinventer.

2.2.3 Première conclusion : pas de solution universelle mais une approche multicritères

Les deux contraintes développées ci-dessus et une analyse plus exhaustive des cas d'utilisation de système à base de capteurs sans-fil amène à une conclusion : **il n'existe pas de solution technologique unique pouvant répondre à toute contrainte possible** ou encore : **les solutions sont « case-dependent »**. Néanmoins, pour lever certaines limitations, le travail consiste à appréhender les principales contraintes du sans-fil et à étudier les technologies émergentes pouvant faire preuve d'un maximum de généricité d'une application à l'autre.

Les résultats issus des études bibliographiques et des premières plates-formes développées ont permis de dresser une approche multicritère permettant de guider les tâches à accomplir et les solutions à envisager en fonction des cas. Le tableau I, ci-dessous, traduit le fruit de cette longue analyse.

Tableau I. Approche multicritère des réseaux de capteurs sans-fil

Critère	Problématique
Energie	Le Capteur communique en permanence, souvent ou « sur événements » : <ul style="list-style-type: none"> - Maintien d'un simple fil d'alimentation par rapport à une connectique blindée incluant alimentation et communication - Récupération d'énergie : solaire, vent, vibrations, télé-alimentation (RFID) - Optimisation et réduction la consommation du capteur
Synchronisation	La synchronisation : <ul style="list-style-type: none"> - Non nécessaire si le capteur transmet ses données en permanence et en temps réel au superviseur - Simple à résoudre si le besoin en synchronisation est inférieur à la milli-seconde - Complexe à solutionner si le besoin en synchronisation est de l'ordre de la micro-seconde
Communication sans-fil	Les exigences du moyen de communication sans-fil doit : <ul style="list-style-type: none"> - Fiable, robuste aux intrusions, pérenne (pas de protocole « maison »), répondant aux protocoles standardisés de l'IEEE - Haut débit - Adapté à des distances de 1 à 1000 m ou relevant de l'architecture « multi-hop »
Topologie réseau	Le placement des capteurs : <ul style="list-style-type: none"> - Vis à vis de leur lien dans le réseau, la configuration peut varier : « bus », « étoile », « arbre », « mesh », etc.
Intégration et packaging	Le conditionnement du capteur en fonction de l'application et du domaine d'emploi : <ul style="list-style-type: none"> - Faibles dimensions : quelques cm² - Insensible aux conditions extérieures et fiable à long terme, - Peu accessible voire noyé dans la structure

Intelligence (smart sensor)	La capacité de traitement du capteur : <ul style="list-style-type: none"> - Quasi illimitée dans les cas d'applications complexes - recours alors à des O.S. embarqués, - Orientée traitement de signal, - Adaptée à communiquer avec d'autres capteurs ou à changer de comportement « à chaud », - Prévues pour l'auto-évaluation : énergie restante, performance de la communication,...
--------------------------------	--

3 Mises en œuvre des technologies du sans-fil

Les critères identifiés, ci-dessus, débouchent sur un ensemble de solutions technologiques très nombreuses et les choix sont d'autant plus difficiles à fixer que ces critères sont inter-dépendants. A titre d'exemple, dans le choix d'une communication multi-hop (i.e. lorsque les octets sont diffusés par « bond » à travers le réseau de capteur en capteur, ceux-ci assurant un rôle de relais), la consommation d'énergie sera nettement affectée car, à un instant t de transmission, chaque capteur doit pouvoir communiquer. Compte-tenu du nombre et de leur diversité, le présent paragraphe se limite à présenter quelques technologies étudiées et mises en œuvre.

3.1 Les modes de communication sans-fil

S'il existe de multiples façons de communiquer sans-fil (voie hertzienne), les technologies évaluées ont été sélectionnées au vue de leur pérennité (eu égard aux durées de surveillance parfois très longues) et de leur fiabilité en refusant la moindre perte d'information entre un capteur et le reste du réseau. Trois technologies majeures ont été évaluées voire implémentées :

1°) **Le WiFi** (ou 802.11) : c'est la couche basse du modèle OSI permettant de communiquer sans-fil en utilisant, à plus haut niveau, l'Internet Protocol (TCP/IP) (figure 2). L'utilisation de ce protocole est très attractive pour l'ingénieur. En effet le TCP/IP est le protocole mondial fourni nativement dans l'OS de tout PC et de plus en plus disponible dans les processeurs électroniques servant de cœur de capteur. Ainsi avec des moyens très simples de mise en œuvre, capteurs et superviseur sont placés au même niveau que les ordinateurs d'un réseau de PC.

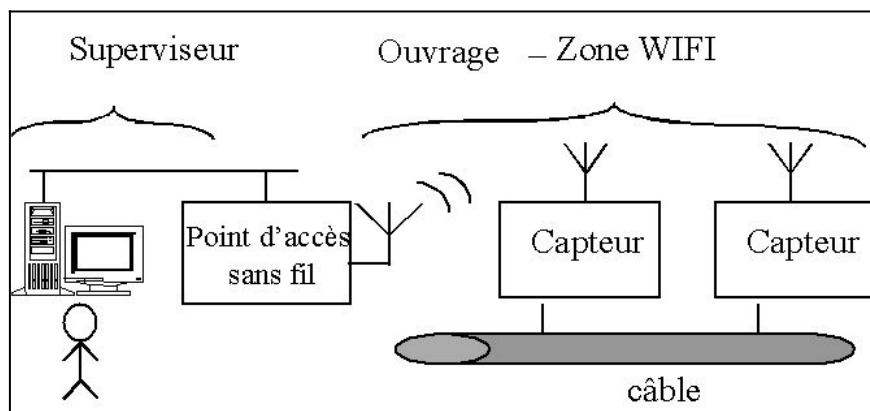


Figure 2 – Le TCP/IP déployé par WiFi place les capteurs comme dans un réseau de PC.

De par son origine bureautique, l'IP est un protocole de haut niveau, très fiable, de grande portée (de 100 à 1000m) et de haut débit ($\sim 1 \text{ MO.s}^{-1}$) mais dont l'implémentation physique en WiFi demeure très consommatrice d'énergie ($\sim 200 \text{ mW}$). Aussi, même si des travaux sont menés pour intégrer au maximum les piles IP dans les processeurs, il ne peut être déployé que

pour des instrumentations « sur évènements », de courte durée ou gardant une liaison filaire pour l'énergie. Plusieurs plates-formes intègrent la solution TCP/IP / WiFi.

2°) **Le protocole Zigbee** est dédié, dès son origine, à permettre la communication des réseaux de capteurs sans-fil (cf. « Alliance Zigbee »). Comme l'IP il s'agit d'un protocole connecté, c'est à dire sans perte de données, qui a fait l'objet d'une normalisation IEEE 802.15.4 couvrant ainsi la plupart des couches de l'OSI. Parmi ses principaux attraits, sa très basse consommation (~20 mW max.) et le mode multi-hop transparent pour l'utilisateur constituent des atouts importants. Le réseau Zigbee actualise en permanence et en temps-réel la liste des chemins possibles pour l'acheminement des octets via les nœuds. Ainsi si la portée de communication d'un nœud est inférieure à 30m, la « transitivity » permet d'étendre sans limitation la dimension physique du maillage de capteurs. Ce mécanisme n'est toutefois possible que si les capteurs sont bien en mode de communication (i.e. en consommation importante) à l'instant précis où des données sont échangées. Il y a donc une « stratégie » dans les alternances des modes de communication à développer. Par ailleurs, ce protocole nouveau n'est pas disponible nativement dans les PC et les processeurs du commerce. L'électronicien a donc un travail d'intégration à fournir. Néanmoins, ce protocole conçu par et pour le secteur des capteurs sans fil est aujourd'hui le plus envisageable pour des instrumentations massives et de longues durées, au vu de sa consommation. Le Zigbee a été validé au LCPC sur une application dédiée.

3°) **Les réseaux de capteurs MOTE** : cf. « Réseau de Capteurs sans fils : application à la mesure de vibration » - Cyril NGUYEN VAN PHU - JSI 2006.

3.2 Le « challenge » de la synchronisation sans fil

Comme indiqué plus haut, de nombreux cas nécessitent que des capteurs distincts datent un même événement avec une précision pouvant atteindre la micro-seconde. Trois types de solution ont été développés ou analysés.

1°) **Synchronisation par protocole dédié** : il s'agit de mécanismes - le plus souvent logiciels-implémentés sur tout nœud du réseau qui, par échange de messages particuliers (sémaphores), assurent une synchronisation entre les bases de temps locales de chaque capteur. Les plus connus sont : Network Time Protocol (NTP) compatible sur une couche TCP/IP ; Timing-sync Protocol for Sensor Networks (TPSN) ; Time Diffusion Protocol (TDP).

Ces protocoles sont des modèles, des mécanismes qui restent à programmer puis à implémenter dans le capteur. C'est donc un travail certain auquel il faut ajouter que la précision temporelle décroît avec le carré de la distance entre 2 nœuds du réseau et nécessite des échanges inter-capteurs augmentant sensiblement leur consommation. Aujourd'hui, seul le TPSN, natif dans les réseaux de MOTE et l'OS TinyOS, émerge et permet d'atteindre des écarts de base de temps inférieurs à 20 μ s (sous certaines conditions).

2°) **Synchronisation « post facto » ou « ratiométrique »** : dans ce cas, chaque capteur dérive selon une loi connue et évaluée en temps-réel par le superviseur. Une fois les évènements acquis et transmis par les capteurs, le superviseur corrige *a posteriori* leur datation.

Comme précédemment, il s'agit d'algorithmes (rarement normalisés) à écrire, à implémenter puis à valider sur chaque nœud du réseau. Même si certains ont une réelle efficacité, ils sont non déterministes et contribuent tous à augmenter l'énergie consommée par le capteur.

3°) **Synchronisation par PPS (GPS)** : la particularité consiste à utiliser le signal PPS fourni par chaque module GPS. Cette sortie est un signal numérique fournissant un « Dirac » numérique à une période rigoureusement précise : « 1 sec +/- 50 nsec ». En intégrant un micro-module GPS dans le capteur et en synchronisant le reset de la base de temps sur le signal PPS, on obtient des capteurs synchrones à la μ s près et ceci quelle que soit la distance qui les sépare (figure 3). Ce mécanisme amène le concepteur à ajouter un module au capteur qui n'est efficient qu'en extérieur (GPS). Néanmoins, les résultats sont intéressants pour le génie civil, notamment dans le domaine des propagations d'ondes où la précision est déterminante et le tirage de fil souvent complexe. Le LCPC a physiquement implémenté ce mécanisme dans plusieurs plates-formes.

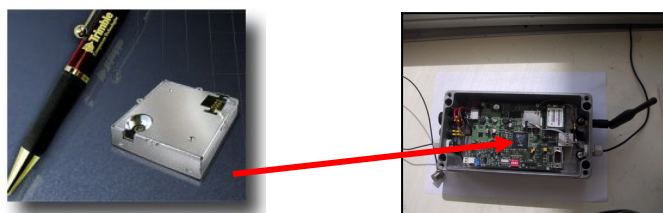


Figure 3 – Micromodule GPS intégré dans un capteur sans fil pour une datation à la μ s.

3.3 « Operating System » embarqué dans le capteur sans-fil

Doter un capteur sans-fil d'un Operating System embarqué complexifie l'architecture logicielle mais présente bien des avantages. Notamment, le capteur se rapproche de la fonctionnalité d'un ordinateur. Il devient alors possible de télécharger de nouveaux algorithmes, de nouvelles applications dans le capteur sans avoir à le démonter. Ce travail de conception complexe rend de véritables bénéfices d'exploitation et de pérennisation du réseau de capteurs. Dans cette optique, deux actions ont été menées au LCPC : l'intégration d'un « **μ Linux embarqué** » et l'évaluation du « **TinyOS** » des capteurs MOTE («Réseau de Capteurs sans fils : application à la mesure de vibration » - C. NGUYEN VAN PHU - JSI 2006).

4 Applications concrètes du sans-fil – Conclusion

La première application mettant en œuvre le sans-fil et validant par la même les choix technologiques retenus est le nouveau Capteur Acoustique pour la Surveillance des Câbles (CASC) (figure 4) qui a pour but de détecter et de localiser les ruptures éventuelles de fils élémentaires sur les câbles des ponts. Le système se base sur une distribution de capteurs sans-fil fixés au câble. Ils enregistrent et datent précisément, via un accéléromètre et un module GPS intégré, la propagation de l'onde de compression générée lorsqu'une rupture de fil élémentaire se produit. L'industrialisation du système est en cours et des installations « pilote » sont déjà en service.

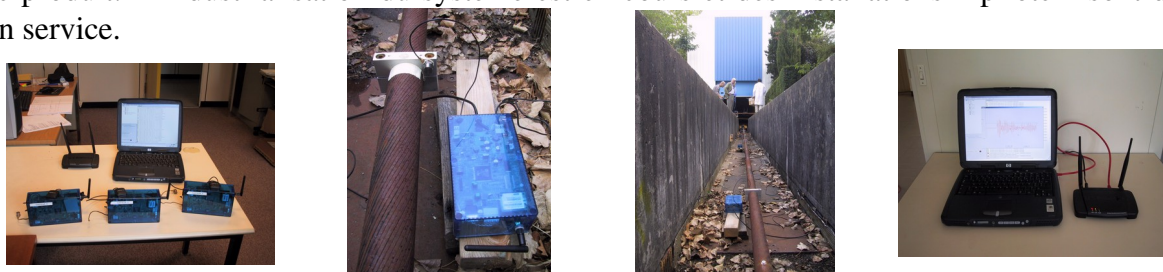


Figure 4 – Nouveau système CASC sans-fil (WiFi) installé sur le banc de test de MACOA.

Néanmoins, de nombreux travaux d'optimisation du système restent à mener, notamment, en matière de consommation d'énergie. In fine, l'objectif est de capitaliser et d'exploiter ces avancées très prometteuses au sein d'une Plate Forme Sans-Fil Générique pour couvrir de futures applications du sans-fil en génie civil, telles que : l'auscultation d'ouvrage par drone ou encore le suivi des mouvements de terrain.