



HAL
open science

Applications des réseaux de capteurs intelligents et de la communication sans fil à l'instrumentation des structures de génie civil

Vincent Le Cam, Cyril Nguyen van Phu, William Guillemaud, Laurent Lemarchand, Alain Fleury, Jean Luc Sorin, Louis Marie Cottineau

► To cite this version:

Vincent Le Cam, Cyril Nguyen van Phu, William Guillemaud, Laurent Lemarchand, Alain Fleury, et al.. Applications des réseaux de capteurs intelligents et de la communication sans fil à l'instrumentation des structures de génie civil. Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, 2008, 273, pp 9-37. hal-00376774

HAL Id: hal-00376774

<https://hal.science/hal-00376774>

Submitted on 20 Apr 2009

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.

Applications des réseaux de capteurs intelligents et de la communication sans fil à l'instrumentation des structures de génie civil

Vincent LE CAM^{*}, Cyril NGUYEN VAN PHU²
avec la participation de William GUILLEMAUD¹,
Laurent LEMARCHAND¹, Alain FLEURY¹,
Jean-Luc SORIN¹, Louis-Marie COTTINEAU¹

¹ LCPC, MI, Nantes, France

² Université de Paris-Est, LCPC, MI, Paris, France

■ RÉSUMÉ

Les technologies des transmissions sans-fil ont toujours intéressé les physiciens et ce domaine est actif depuis son origine. Néanmoins, stimulé par le secteur de la téléphonie et des télécommunications en général, ce domaine connaît un regain d'intérêt et un fort développement depuis une dizaine d'années. Les technologies sans-fil (ou *wireless*) s'inscrivent dans une tendance mondiale à la communication, à la mobilité, à la recherche de souplesse de mise en œuvre... Elles s'insèrent dans de nombreux domaines d'application, pour la plupart connus comme l'internet, la téléphonie, le monde médical, l'industrie, l'informatique et même depuis peu l'aéronautique, ou moins attendus comme le génie civil et la sécurité routière. Dans le cadre de ses travaux de recherche et développement en instrumentation, c'est tout naturellement que depuis plusieurs années la Division Métrologie et Instrumentation du LCPC intègre ces technologies et fait évoluer, à son niveau, l'instrumentation du sans-fil appliquée au génie civil. Dans l'objectif de dresser le panorama de cinq années de révolution technologique en matière de sans-fil, cet article présente les axes de recherche qui ont été suivis, les nombreuses manipulations et expérimentations qui ont été menées à fins de validation, ainsi que les premiers produits qui en ont découlé.

Applications of smart sensor networks and wireless communications to the instrumentation of civil engineering structures

■ ABSTRACT

Wireless transmission technologies have always attracted the interest of physicists and this field of study has been a dynamic one since its inception. However, stimulated by the telephony and telecommunications sector in general, this field has experienced renewed interest and intense development over the past ten-year period. Wireless technologies are encompassed in the worldwide trend favoring communication, mobility, search for more flexible modes of implementation, etc. They get absorbed into many fields of application, for the most part visible via Internet, telephony, the medical sector, industry, computing and, over the more recent past, aerospace ; some of the lesser expected areas of application include civil engineering and road safety. As part of these research and development efforts in equipment, it's only normal that over the last several years, LCPC's Division for Metrology and Instrumentation has been incorporating such technologies and has been advancing, at its own level, wireless equipment as applied to civil engineering. In the aim of providing an overview of five years of revolution in wireless technology, this article presents the research themes pursued, as well as the multiple manipulations and experiments conducted for validation purposes and the initial generation of products derived.

* AUTEUR À CONTACTER :

Vincent LE CAM
vincent.le-cam@lcpc.fr

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 [1]. Or, ce lien filaire avec un système de supervision gérant un ensemble, plus ou moins essentiel, de capteurs souffre de défaillances et se heurte à des limitations [3] dont voici les plus courantes.

- Étanchéité, usure, vandalisme provoquent autant de défaillances de la connectique inacceptables pour des systèmes critiques.
- Les systèmes traditionnels de supervision/acquisition gèrent difficilement plus de cent capteurs à défaut d'employer des baies d'acquisition et de numérisation lourdes.
- La connectique limite par nature la distance supervision/capteurs, d'où pertes de données, atténuation du signal, problèmes de compatibilité électromagnétique (CEM), nécessité de redresseurs, etc.
- On constate parfois que les coûts de la connectique (achat, installation et maintenance) sont supérieurs à ceux liés à la mesure elle-même et l'on peut s'interroger sur la justification financière.

Aussi les secteurs du génie civil constituent-ils autant de cibles potentielles pour des réseaux de capteurs sans-fil. Le Réseau scientifique et technique du ministère en charge des transports en général et la Division Métrologie et Instrumentation du LCPC en particulier se sont donc naturellement appliqués ces quatre dernières années à acquérir ces technologies et développer 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 [4] et leurs potentialités, de mettre en évidence les nouveaux défis de ces transmissions sans support filaire [2], puis de présenter à l'aide de quelques exemples les premières réalisations concrètes du LCPC en la matière.

DÉFINITIONS

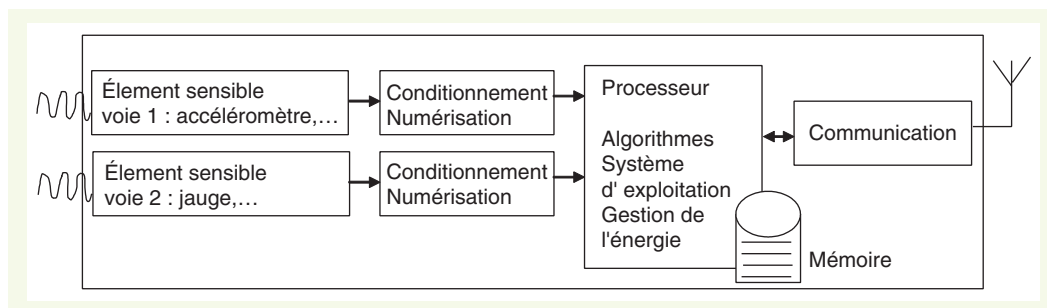
■ La notion de capteur

Pour une meilleure compréhension de l'article et des notions évoquées, il convient de définir ce que l'on entend par capteur. Selon les pays, les entreprises et les communautés de travail, le capteur peut représenter l'élément sensible de la mesure seule (le senseur) ou bien ce même élément sensible couplé à une certaine intelligence, à tout le moins une électronique qui joue un rôle dans l'établissement de cette mesure. Les capteurs que nous présentons dans cet article, qu'ils fassent l'objet d'une transmission filaire ou sans-fil, sont des systèmes complets comprenant :

- une (ou plusieurs) voie de mesure, à laquelle est connecté un élément sensible à une grandeur physique à mesurer ; un accéléromètre, une jauge, un thermocouple, un MEMS [5] en sont des exemples ;
- pour chaque voie de mesure, un étage qui met en forme l'information analogique (électrique, optique, mécanique) du senseur et la convertit en une information numérique (octets, niveaux logiques) ;
- un processeur dont la fonction minimale est d'acquérir les données issues de chaque voie de mesure ; ce processeur a une capacité d'intégrer et d'exécuter des algorithmes *métier*, voire d'héberger un système d'exploitation ; ce peut être, selon le cas, un simple microcontrôleur 8 bits ou un processeur dédié au traitement de signal tel un Digital Signal Processor (DSP) ; dans certains cas, le processeur assure également une gestion évoluée de l'énergie électrique dont dispose le capteur ;
- éventuellement une capacité de mémorisation externe au processeur lorsque sa mémoire interne ne suffit pas à répondre au besoin de stockage des données et des programmes ; les mémoires RAM ou FLASH en sont des exemples ;
- un étage de communication permettant au processeur de dialoguer avec le système de supervision, voire avec d'autres capteurs ; cette communication peut être filaire (liaison série point à point de type RS232, Bus série de type RS485, Ethernet ; etc.) ou sans-fil (Wifi, Zigbee, Bluetooth, ISM, etc.).

La **figure 1** représente le synoptique d'un capteur sans-fil complet possédant 2 voies de mesure et les liens entre les différents étages qui le composent.

figure 1
Synoptique type d'un capteur sans-fil.



■ Des capteurs *intelligents*

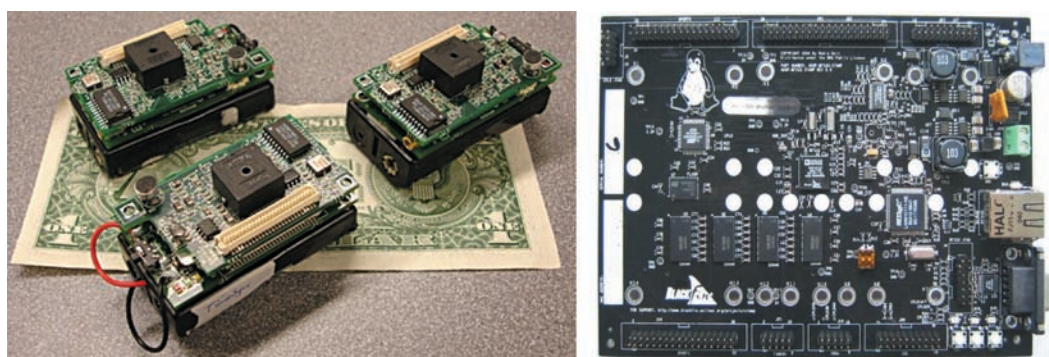
Un capteur est dit *intelligent* [6] dès l'instant qu'il remplit plus que la seule fonction d'acquisition/transmission immédiate des données. Le simple fait qu'un capteur sache pallier une coupure du lien de communication au superviseur, par exemple en mémorisant les données jusqu'au rétablissement du lien, lui confère une forme d'intelligence. L'intelligence d'un capteur relève communément de sa plus ou moins grande capacité à :

- exécuter des algorithmes plus ou moins complexes sur les données relevées comme calculer des minimums et maximums, filtrer, moyenner, calculer des transformées de Fourier, des corrélations intervoies, etc.
- réagir dynamiquement à des ordres reçus du superviseur comme (dés)activer une voie, modifier un seuil, ajouter un autre type de traitement sur les données, communiquer avec un autre capteur, etc.
- réagir à des dysfonctionnements de son environnement comme une voie qui ne répond plus, un seuil atteint de façon intempestive qui désactive en permanence la mesure, un lien de communication défaillant, etc.
- s'auto-identifier, s'autolocaliser, s'autoreconfigurer, s'autoréparer, etc.

Même s'il est clair qu'un capteur *ne possède que l'intelligence qu'on lui a assignée*, une nouvelle forme de structuration de cette intelligence émerge dans le domaine des systèmes embarqués et notamment des capteurs sans-fil du fait de l'hébergement par le capteur d'un système d'exploitation tels Windows ou Linux dans le monde bureautique, ou encore Operating System (OS). Un OS offre au concepteur une exploitation simplifiée des capacités du processeur et de ses périphériques, et permet surtout à l'utilisateur final de reconfigurer totalement le capteur sans avoir à le manipuler ni le reprogrammer en laboratoire. En outre, le capteur intégrant un OS peut être totalement reconfiguré à chaud et à distance, ce qui contribue fortement à diminuer les coûts de maintenance et d'exploitation du système.

Les capteurs *intelligents*, tout particulièrement ceux intégrant un OS, disposent sensiblement des mêmes capacités qu'un ordinateur classique muni de cartes d'acquisition (sans écran, clavier ni souris). Plus *l'intelligence* embarquée est élevée, plus il y a d'électronique dans le capteur comme l'illustre la **figure 2**. Si l'on se rapproche d'une configuration de type réseau d'ordinateurs, les cap-

figure 2
Quelques capteurs intelligents intégrant des OS (TinyOs et μ CLinux) utilisés par le LCPC.



teurs intégrant un OS permettent d'envisager du calcul distribué, d'alléger les tâches et la quantité des algorithmes centralisés et – parfois – de diminuer même le nombre des communications (et donc la consommation globale du système).

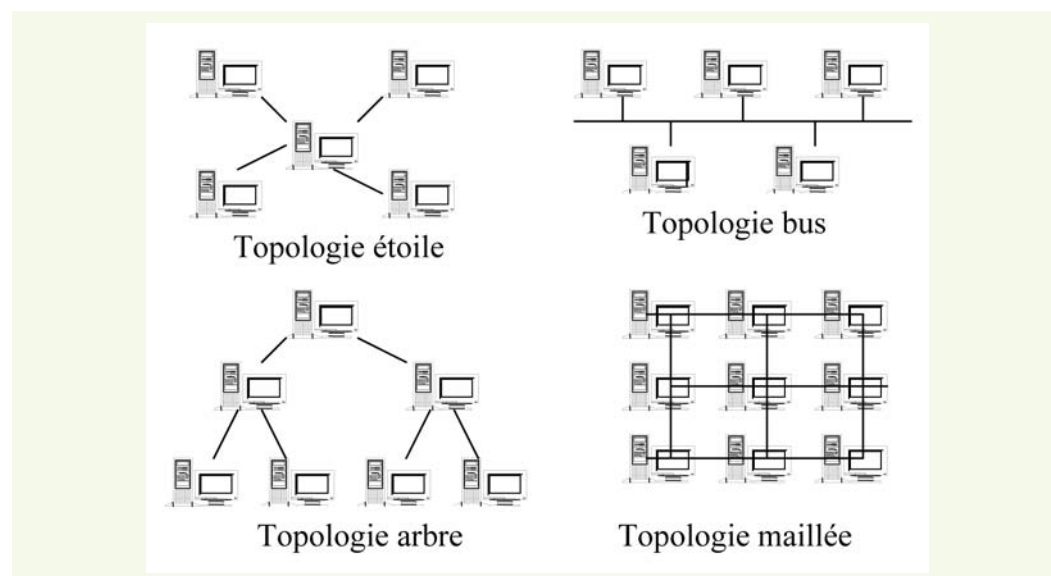
■ Des réseaux de capteurs

Les besoins des structures en instrumentation massive et diversifiée incitent le concepteur à développer des systèmes dont les nœuds (les capteurs) peuvent être organisés en de multiples topologies [7], c'est-à-dire selon des configurations qui permettent à l'utilisateur de faire correspondre physiquement l'instrumentation déployée sur le terrain à la vision logique qu'il en a depuis la supervision.

Le développement des capteurs intelligents et des capteurs sans-fil répond tout naturellement à ce besoin en étendant à l'infini le champ des topologies possibles. En effet, la déconnexion physique inhérente au sans-fil permet *a priori* à chaque capteur de communiquer avec tout autre capteur présent dans sa sphère d'influence radio. Par ailleurs, un capteur intelligent est systématiquement un capteur *identifié* ou *identifiable*, de sorte que, si l'on associe les données captées à la source à l'identifiant du capteur, les octets peuvent transiter par n'importe quel chemin du réseau sans que les données perdent la mémoire de leur origine.

La **figure 3** donne quatre exemples de topologies de réseaux de capteurs. Les deux topologies les plus répandues sont les topologies *en étoile* et *en bus*, dans lesquelles chaque nœud ne *connaît* que le superviseur et où les chemins de communications nœud-superviseur sont uniques et physiquement figés.

figure 3
Quatre exemples de topologies de réseaux de capteurs.



DES IMPLÉMENTATIONS COMPRENANT SYSTÈME D'EXPLOITATION ET PROTOCOLE

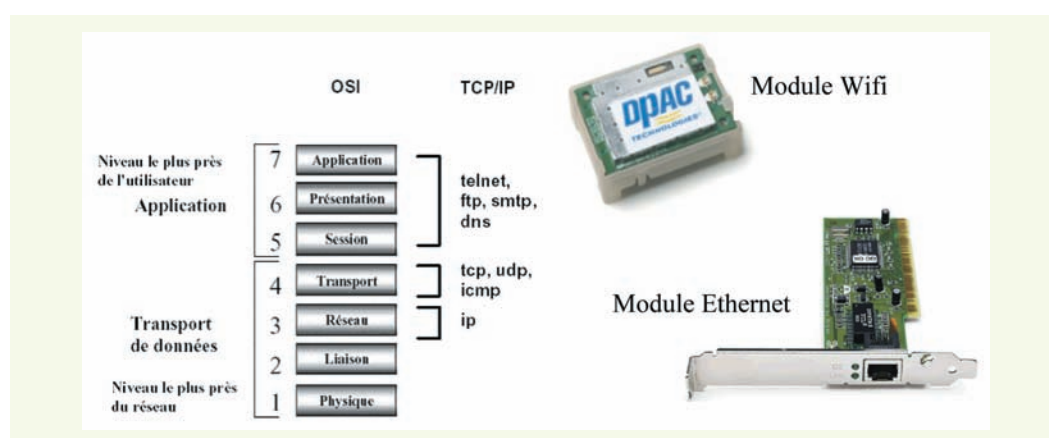
La conception de capteurs intelligents, capables de fonctionner en réseau et de communiquer sans fil, s'aborde globalement. Le fonctionnement en réseau notamment correspond physiquement à l'implémentation logicielle et matérielle de protocoles de communication au niveau de chaque capteur et du superviseur. Les protocoles de communication retenus sont ceux qui relèvent d'un standard reconnu par une instance officielle telle que l'IEEE. Chaque standard, ou norme, décrit précisément la prise en charge et le transport des données entre deux nœuds d'un réseau. Les travaux du LCPC excluent le développement non pérenne et onéreux de protocoles propriétaires au profit de protocoles durables et fiables. Un protocole est souvent décrit comme un ensemble de couches

assurant, chacune à son niveau, des actions de codage/décodage, émission, réception, contrôle d'intégrité des données véhiculées. Chaque protocole – souvent appelé également pile – est implémenté sur des ressources matérielles, qui sont des composants électroniques. Il est important de noter qu'un même protocole logiciel peut matériellement être implémenté de plusieurs façons. Nous en donnons quelques exemples dans les paragraphes suivants.

■ Le protocole TCP/IP

Ce protocole, ou Internet Protocol, est le plus connu et mondialement répandu. Il est natif à tous les OS des PC du commerce, tels Windows, Linux, Unix, MacOS, etc. Il est également implémenté dans de nombreuses applications comme les imprimantes ou les téléphones cellulaires (GPRS, UMTS). La pile TCP/IP est décrite par le modèle OSI (figure 4). Si, physiquement, la déclinaison la plus connue du TCP/IP est l'Ethernet (cas des prises bureautiques au format RJ45), il existe sous de nombreuses autres formes filaires (TokenRing, ATM, etc.) et non filaires [8] (GPRS, UMTS, Wifi [9], Wimax, etc.).

figure 4
Le protocole TCP/IP
a : OSI modélisant le
TCP/IP
b : deux modules
électroniques implémentant
l'IP, respectivement en Wifi
et en Ethernet.



a | b

■ Caractéristiques des protocoles existant sur le marché

Chaque protocole possède ses particularités et ce sont les spécificités de l'application qui déterminent les critères de choix du protocole à implémenter.

- Selon que l'on accepte ou non de perdre des données, on choisira un protocole plus ou moins fiable et un protocole connecté ou non.
- Selon la capacité énergétique du capteur, on choisira un protocole plus ou moins consommateur de ressources.
- Selon la gamme des distances entre capteurs, on choisira un protocole incluant le multi-saut, la possibilité de relais, etc.
- Selon la topologie souhaitée pour les nœuds, on choisira un protocole permettant le multi-saut, la communication entre capteurs, la connexion du nombre souhaité de capteurs.
- Selon le temps de latence accepté pour la communication, le débit visé, la présence d'échanges à durée déterministe, on choisira un protocole à haut débit, un protocole déterministe.

Par ailleurs, les systèmes d'exploitation embarqués prennent toujours en charge de façon native un standard de communication ; en effet, l'intérêt de ces OS issus du monde bureautique est d'offrir un mode de communication de base, en plus d'ajouter une couche d'abstraction logicielle entre les ressources électroniques du capteur et l'application métier (étage de conditionnement, divers ports d'entrée/sortie, etc.). Citons, à titre d'exemple, les OS embarqués μ Linux ou Windows CE qui proposent nativement le protocole TCP/IP ou TinyOS offrant le 802.15.4 (couche basse du Zigbee, autre protocole sans-fil).

Dans la conception des capteurs sans fil intelligents, l'intégration de protocoles de communication fiables et standard est donc possible car le marché de l'électronique offre aujourd'hui de petits modules de communication protocolaires clés en main, intégrables aux développements électroniques de la carte capteur : dans ce cas le processeur émet ou reçoit des données en communiquant avec ce module via un de ses ports d'entrée/sortie. Mieux, certains processeurs peuvent héberger des OS dédiés aux applications embarquées, lesquels prennent directement en charge un mode de communication protocolaire : dans ce cas la conception se *résume* à l'écriture du *driver* qui permet au processeur de reconnaître et de lier les couches basses du protocole à un module radio.

À NOUVELLES TECHNOLOGIES, NOUVELLES CONTRAINTES, LES DÉFIS DES TECHNOLOGIES SANS-FIL

Il serait erroné de penser que le passage d'un réseau de capteurs filaires à un réseau de capteurs sans-fil s'effectuerait par le simple remplacement des fils par des modules radio et l'intégration d'une alimentation de type batterie au niveau de chaque capteur. En réalité, la réalisation de systèmes électroniques sans-fil nécessite de revoir totalement les schémas traditionnels de conception. L'aspect énergétique est souvent mis en avant, mais les besoins en énergie du capteur sans fil [10] sont souvent moins cruciaux que de nouvelles contraintes qui apparaissent et nécessitent la même attention.

■ La contrainte énergétique

Quelques postulats peuvent être donnés pour souligner cette contrainte. Communiquer sans-fil (avec des modules radiofréquence) consomme généralement beaucoup d'énergie. L'énergie disponible au niveau d'un capteur sans-fil est souvent très limitée, voire inexistante. Plus un capteur est distant (de son interlocuteur) ou enfoui (dans une structure), plus il a besoin d'énergie pour communiquer.

Aussi dans le domaine du sans-fil, le concepteur électronique doit-il tenir compte du fait que mesurer correctement la grandeur physique que l'on désire connaître revêt la même importance que maîtriser la consommation énergétique.

Il n'y a aucun schéma ni solution unique et générique couvrant tous les besoins possibles. Néanmoins le concepteur cherchera toujours à choisir les composants électroniques les plus sobres et son choix devra être dicté, entre autres, par les considérations suivantes.

- Si l'instrumentation est prévue pour une courte durée (quelques heures à quelques jours) : les technologies actuelles des batteries permettent de pallier presque toutes les situations, y compris celles des communications radio en continu (batteries au plomb et NiMh), tout en restant de dimensions raisonnables (quelques cm³).
- Si l'instrumentation ne nécessite pas de communications ou de mesures fréquentes : le processeur peut véritablement optimiser la consommation en n'activant les modules d'acquisition/conditionnement et de communication radio qu'aux seuls moments nécessaires. De plus, de nombreuses familles de processeurs proposent des modes de veille permettant à ceux-ci de ne presque rien consommer. Les sorties des états de veille peuvent être paramétrées sur événement, sur dépassement de seuil, à un moment précis, etc. Par exemple, la mesure et la transmission de la température ou d'une déformation ne nécessitent pas de capteur sans-fil fonctionnant à 100 % de leur capacités durant 100 % du temps. Ainsi, si l'on fait le choix de batteries, à condition d'avoir la place de les intégrer, le capteur peut tenir des mois, voire des années selon la dynamique de l'application.
- Si l'instrumentation est prévue pour durer très longtemps et/ou nécessite des communications radio fréquentes, les solutions sont plus délicates à trouver. Il faut viser la sobriété extrême de la carte constituant le capteur, minimiser le nombre de composants électroniques, employer tous les modes de veille possibles, optimiser les rapports cycliques des phases d'écoute ou de communication sur le réseau, utiliser les protocoles réseau dédiés aux basses consommations (Zigbee, Bluetooth) en étudiant, dans ce cas, les possibilités d'employer des répéteurs intermédiaires et de

diminuer les distances entre capteurs et supervision. Une voie complémentaire consiste à adjoindre au capteur une ou plusieurs sources de récupération d'énergie pour charger les batteries et assurer le fonctionnement continu. Pour les systèmes placés à l'extérieur, on utilisera des panneaux solaires ou de minicentrales éoliennes, des systèmes piézoélectriques récupérant l'énergie induite par les vibrations de son milieu d'emploi. Enfin la télé-alimentation est une autre forme d'alimentation qui offre ses premières solutions (mais pour des consommations faibles) ; dans ce cas, des ondes électromagnétiques dans des gammes de fréquence et d'amplitude déterminées excitent un transducteur intégré qui délivre au capteur des charges électriques (la technique du RFID est la plus connue dans ce domaine).

Plus généralement, la meilleure façon d'économiser de l'énergie consiste à limiter la durée des communications et leur nombre. Les capteurs intelligents peuvent répondre à ce besoin. On privilégiera tout système pouvant exécuter les traitements du signal et de ses divers algorithmes au plus près de la source, c'est-à-dire capables de traiter les données mesurées au niveau des capteurs. C'est au niveau de chaque capteur que se décidera quelles données transmettre et à quelle cadence. En effet, sauf si les données doivent faire l'objet d'une interprétation globale en temps réel, chaque capteur peut mémoriser ses propres données, éventuellement les traiter en partie, et ne les transmettre au superviseur que par blocs et de façon sporadique. En envoyant moins de données et moins souvent, on diminue les besoins en communications.

■ La contrainte de synchronisation temporelle

Une difficulté autrement importante apparaît dès lors que les capteurs doivent être synchronisés, c'est-à-dire quand les données collectées par des capteurs distincts du réseau doivent être datées avec précision [11].

Selon l'application, la synchronisation peut être simplement souhaitable ou être un besoin crucial. Par exemple, si l'on mesure une température sur ouvrage, grandeur physique qui évolue lentement, un écart de datation de l'ordre de la seconde entre deux mesures distinctes n'influence généralement pas les algorithmes de thermocontrôle ; en revanche, dans le domaine de la propagation des ondes dont la dynamique est élevée (de l'ordre de $5\,000\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ dans l'acier ou le béton), les données résultant de l'échantillonnage de ces ondes doivent souvent être corrélées avec une précision de l'ordre de la microseconde.

Comme tout système électronique (ordinateur, magnétoscope, etc.), le capteur intelligent intègre nativement un quartz, c'est-à-dire un composant électronique qui lui permet de compter le temps. Comme chaque quartz possède sa propre incertitude et que les capteurs ne démarrent pas en même temps, les bases de temps des capteurs ne peuvent être parfaitement en phase sans un mécanisme de synchronisation. Par construction donc, ainsi qu'en matière de vieillissement électronique et de sensibilité à la température, les composants différant l'un de l'autre, les capteurs qui en associent plusieurs diffèrent encore plus, et la corrélation de leurs données nécessite donc un mécanisme de synchronisation.

S'il semble simple de mettre en œuvre un mécanisme de synchronisation dans les réseaux filaires où l'on peut par exemple employer l'un des fils pour véhiculer un *top synchro* resynchronisant les capteurs, c'est bien plus complexe dans le cas des liaisons sans-fil. Ce *top synchro*, qui pourrait être envoyé par radio aux capteurs depuis le superviseur, doit se propager à travers le réseau, marqué par sa topologie, être capté par le module radio du capteur, décodé et interprété comme une interruption de synchronisation. À ce délai, il faut ajouter ceux, non déterministes, dus au transit des données, aux échecs (mécanisme d'échec/rémission des trames, *transparent* pour l'utilisateur), à l'exécution des protocoles au niveau de chaque capteur, à la topologie et à la mise en œuvre physique du protocole sans-fil (*ad hoc*, broadcast ou diffusée, etc.). Ces délais additionnés constituent la latence d'un réseau. Du fait de cette latence et des topologies des réseaux, la simple distribution

d'un signal de synchronisation ne permet pas d'obtenir en précision mieux que quelques dizaines de millisecondes.

Une analyse des techniques implémentées pour synchroniser des réseaux de capteurs sans-fil permet de classer les solutions en trois catégories que nous passons en revue dans les paragraphes suivants.

› La synchronisation distribuée

Le superviseur distribue aux capteurs régulièrement et selon une période précise et constante un signal de synchronisation (une balise). À réception de cette balise, le capteur resynchronise (*reset*) sa base de temps. Pour pallier l'effet de latence déjà cité, les capteurs *connaissent* la durée précise de la période de synchronisation et, à chaque réception de la balise, ils comparent le temps écoulé en pratique (calculé par leur TIMER) à la valeur théorique de la période. Par apprentissage et moyennage, chaque capteur détermine la latence du réseau *de son point de vue*, ce qui lui permet de corriger (i.e. de redater) les échantillons collectés.

Pour mettre en œuvre ce mécanisme, des protocoles dédiés ont été développés et sont intégrables logiciellement dans les capteurs sans-fil. Étant donné le lien fort entre la communication, la réception et la resynchronisation de la base de temps, certains protocoles de synchronisation sont directement liés à des protocoles de communication comme :

- le Network Time Protocol (NTP), compatible avec la mise en œuvre du protocole de communication TCP/IP, mais ne permettant pas le mécanisme du multi-saut, pourtant nécessaire pour qu'un signal franchisse par *saut* les différents nœuds qui séparent un capteur du superviseur émettant le *top synchro* (précision de l'ordre de la μ s) ;
- le Reference Broadcast Protocol (RBS), similaire au NTP, mais non lié au protocole TCP/IP, offrant le mécanisme du multi-saut à travers le réseau (précision de l'ordre de 10 μ s) ;
- le Timing-sync Protocol for Sensor Network (TPSN) [12], compatible avec la mise en œuvre du protocole de communication Zigbee, offrant le mécanisme du multi-saut (précision de l'ordre de 20 μ s).

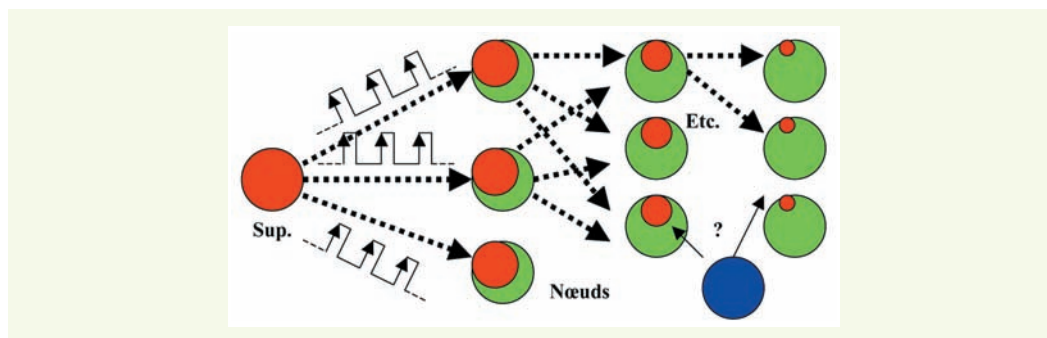
Ce type de mécanismes fait l'objet de nombreux travaux de recherche et développement, car bien que ces protocoles soient efficaces en théorie, dans la pratique leur mise en œuvre augmente sensiblement la consommation des capteurs. En effet, pour recevoir la balise de synchronisation, voire la réémettre, le capteur doit communiquer aussi souvent que l'impose la période de synchronisation. Par ailleurs, l'approche statistique englobée par ces protocoles dans l'évaluation de la latence réseau se dégrade fatalement avec le nombre de sauts et avec la distance. Aussi la précision de la synchronisation n'est-elle pas la même pour tous les capteurs d'un même réseau. Les capteurs les plus proches peuvent être synchronisés avec le superviseur à quelques microsecondes près, tandis que les plus éloignés le seront selon le cas à plusieurs dizaines, voire centaines de microsecondes près. Selon l'application visée, des compromis entre distance, période de synchronisation et période de réveil radio du capteur peuvent être trouvés au niveau de la mise en œuvre.

› La synchronisation a posteriori

Il s'agit d'un mécanisme statistique qui s'appuie sur la capacité de chaque nœud du réseau à agir, à l'instar du superviseur, comme source de synchronisation potentielle pour d'autres capteurs. Ce mécanisme cible les applications pour lesquelles la communication multi-saut est implémentée.

Le superviseur distribue à travers le réseau une balise de synchronisation et, à réception de cette balise, chaque capteur en écoute à ce moment précis (écoute périodique ou sur événement) synchronise sa base de temps sur cette balise (de façon similaire à la synchronisation distribuée) (**figure 5**). Ensuite, chaque nœud synchronisé réémet une balise de synchronisation dès qu'il est *réveillé* (périodiquement ou sur événement). Enfin, lorsqu'un capteur détecte un événement, il compte le temps jusqu'à capter la balise de synchronisation du capteur agissant comme source de synchronisation qui a été synchronisé le plus récemment.

figure 5
Distribution d'une balise de synchronisation à travers un réseau à architecture multi-saut.



Les inconvénients de ce mécanisme sont une précision faible (de l'ordre de la milliseconde) et qui décroît rapidement avec la distance et le nombre de sauts. De plus, comme pour la synchronisation distribuée, cette méthode n'est pas déterministe. En revanche, elle présente l'avantage de ne pas ou peu augmenter la consommation unitaire de chaque capteur et de fournir une solution aux réseaux multi-sauts. Le Post Facto synchronization Protocol (PFP) est un exemple de protocole expérimental développé avec ce mécanisme.

› La synchronisation absolue [13]

Il s'agit d'un mécanisme implémenté au niveau de chaque capteur et permettant à celui-ci de se synchroniser sur une base de temps absolue – au moins commune au réseau de capteurs –, indépendamment du réseau lui-même et des autres capteurs. Cette double indépendance résout le problème de latence non déterministe du réseau, ainsi que celui de l'influence de la topologie et de la présence ou non d'un chemin minimum à travers le réseau pour relayer d'éventuelles balises de synchronisation.

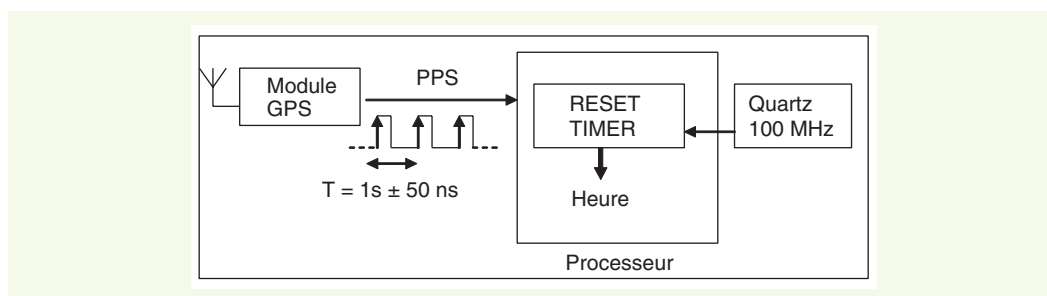
Le principe est le suivant : chaque capteur intègre une fonction lui permettant de capter directement un signal de synchronisation et de générer, sans latence, une interruption commune qui permet au processeur de synchroniser son TIMER en comptant le temps.

La solution la plus connue, et aussi la plus précise, est celle du GPS. Tout module GPS fournit chaque seconde deux informations au processeur auquel il est connecté : la trame de géolocalisation (contenant la localisation et l'heure absolue GMT) et le signal PPS (**figure 6**). Ce dernier est un simple signal carré périodique dont la période est de $1\text{ s} \pm 50\text{ ns}$, c'est-à-dire une période d'une seconde extrêmement précise et stable. À tout instant, tous les modules GPS situés dans un même cône d'influence satellitaire délivrent des tops PPS précis et parfaitement synchrones (moins de 50 ns d'écart).

En connectant le signal PPS du module GPS comme entrée de *reset* de la base de temps interne du processeur, on resynchronise celui-ci chaque seconde à quelques dizaines de nanosecondes près.

La solution par module GPS présente de nombreux intérêts, en premier lieu une très bonne précision, de l'ordre de la μs , voire moins, indépendamment du nombre de capteurs du système, de la qualité du réseau et de sa topologie, ainsi que des distances entre capteurs. Cette haute précision, sans dérive et calée sur l'heure universelle, rend le système et ses algorithmes parfaitement déterministes d'un point de vue temporel.

figure 6
Synchronisation de capteurs par technique GPS.



Les inconvénients de cette solution résident dans la nécessité d'ajouter un petit module GPS qui consomme de l'énergie et augmente un peu le volume du capteur et dans le fait que le capteur ne peut être synchrone qu'en extérieur (*outdoor*). Mais les développements récents donnent chaque jour des réponses appropriées à ces limitations. Tout d'abord les modules GPS sont toujours plus miniaturisés, au point d'être désormais intégrables directement à la carte mère du capteur comme un composant parmi d'autres (figure 7). De plus, leur consommation est toujours plus faible (les constructeurs tenant compte du phénomène de nomadisme) et, pour des utilisations intérieures pour lesquelles les signaux satellitaires seraient filtrés par les caissons en béton des tabliers de pont par exemple, des solutions de réémetteur GPS sont disponibles.

figure 7
Quelques modules GPS
a, b : petits modules
directement intégrables
c : modules GPS en
composants électroniques.



■ La contrainte d'intégration

Pour le gestionnaire de structures, le développement de capteurs sans-fil peut, sous certaines conditions, répondre à des besoins réels, dans le cas de lieux difficiles d'accès pour lesquels des équipements de faibles dimensions seront précieux ou dans le cas où les capteurs doivent être enfouis dans la structure elle-même par exemple. Il est difficile de fournir des données chiffrées, mais après analyses, tests, ainsi que discussions avec d'autres organismes de recherche, on peut lister quelques principes en matière d'intégration des capteurs.

- Moins un capteur est complexe en termes de traitements à effectuer, de nombre de fonctions électroniques à implémenter, etc. plus il est *intégrable* ou susceptible d'être optimisé.
- Plus un capteur est intégré, moins il consomme.
- Si un capteur est difficile d'accès du fait de son lieu d'installation, il le sera chaque fois qu'il faudra remplacer les batteries.
- Un capteur enfoui, par exemple noyé dans le béton, porte moins loin (quelques mètres au maximum suivant la technologie) qu'un capteur *accessible*.
- Un capteur enfoui doit être soit autonome en énergie pour toute la durée de l'instrumentation, soit télé-alimenté, mais, dans ce cas, depuis une source relativement proche (quelques dizaines de centimètres au maximum en RFID [14]).
- Un capteur télé-alimenté ne peut subvenir aux besoins d'une électronique complexe, aussi les capteurs de ce type doivent-ils être sobres en fonctions logicielles et matérielles.
- La fabrication d'un micro-capteur intégré dédié à une application est très onéreuse (développement d'ASIC ou de FPGA) et l'application doit amortir ce coût spécifique.

TECHNOLOGIES MISES EN ŒUVRE ET MAÎTRISÉES

Certaines des technologies citées ci-dessus ont été mises en œuvre afin d'être évaluées et leur capacité à être adaptées aux contextes du génie civil a été appréciée. Cette mise en œuvre intervient dans certains cas dans le cadre d'applications en cours de recherche et développement au LCPC.

■ Validation du Wifi (TCP/IP) sur ouvrage d'art

› Pourquoi valider le Wifi ? Précisions sur le TCP/IP

Comme décrit précédemment, le Wifi [9] représente l'un des supports physiques possibles du protocole TCP/IP. D'autres supports existent, filaires (Ethernet, TokenRing, etc.) ou non (UMTS, GPRS, Wimax, etc.), mais la très grande fiabilité, la robustesse et surtout la pérennité du protocole TCP/IP (plus de trente ans d'existence et toujours en phase d'extension) rendent incontournable la validation de ses déclinaisons.

Quel que soit le lien physique, l'emploi de l'IP au niveau des capteurs et du superviseur leur garantit des communications fiables. La fiabilité d'un tel protocole signifie que :

- l'émetteur est assuré que les octets émis sont reçus par le destinataire ;
- le destinataire est assuré que les octets reçus de l'émetteur sont intègres.

En outre, le TCP/IP fait partie des protocoles qui permettent de gérer de très grands nombres de points du réseau. Les meilleurs exemples sont l'Internet mondial qui relie des millions d'ordinateurs ou encore les nombreux réseaux d'entreprises qui peuvent intégrer des milliers de nœuds (imprimantes, PC et autres terminaux IP). Ainsi, dans le domaine des WSN, l'IP – décliné en Wifi – permet d'envisager des réseaux de plusieurs centaines de capteurs.

Bien que robuste, tout type de réseau – filaire ou non – peut subir des coupures (coupure d'un fil, perte de la porteuse RF, etc.). L'avantage des protocoles de haut niveau tel que l'IP est d'être capable de réagir en cas de problème sur le réseau. La pile IP notifie alors à l'application, capteur ou superviseur, qu'un problème est intervenu (avec un numéro d'erreur normalisé correspondant à l'anomalie). L'application, capteur ou superviseur, peut alors réagir en conséquence, par exemple en réessayant la transmission dix secondes plus tard, en allumant une led rouge, etc.

Lorsque le protocole IP est implémenté en Wifi, une coupure de communication courante est due à la perte de couverture radio. Un espace de communication Wifi est généré par un Access Point (AP). Son rayon d'action est limité par la puissance d'émission qui lui est propre (de 0,1 à 1 W), par la propriété du canal de propagation et l'adaptation de l'antenne, par l'absorption du milieu environnant (obstacles, métal, etc.) et par le bruit (concurrence électromagnétique, etc.). Tant qu'un capteur Wifi se trouve dans la zone de couverture de l'Access Point, les communications réussiront. En revanche, en dehors ou à la limite de cette zone, les communications peuvent échouer.

Pour évaluer la portée courante d'un Access Point Outdoor générant une zone Wifi, des tests ont donc été menés sur un véritable ouvrage d'art, dans le cadre du système de Contrôle acoustique pour la surveillance des câbles (CASC). Nous décrivons ci-après le premier de ces tests, tandis que le second le sera dans le paragraphe consacré à CASC.

› Description de l'ouvrage

Les tests *in situ* ont été effectués sur le pont d'Ancenis. Bien qu'âgé de plus de cinquante ans, ce pont demeure l'un des plus grands ponts suspendus de France (figure 8). Ses dimensions, ses éléments en métal et de maçonnerie en font une cible parfaite pour valider le Wifi. Voici une description sommaire de l'ouvrage, livré en 1953 par la société Baudin-Châteauneuf :

- ce pont relie la ville d'Ancenis (44) à la commune de Lire (49) en franchissant la Loire ;
- il est suspendu par deux plans amont et aval de câbles, chacun comprenant 17 suspentes de part et d'autre de la travée centrale qui en compte 52 ; pour chaque ferme, la suspension comporte 19 câbles toronnés réunis en faisceau continu d'un ancrage à l'autre ;
- sa longueur totale est de 412 m, sa portée principale est de 238 m ;
- la hauteur au dessus de la Loire est de 10 m, la hauteur en tête de pylône est de 28,7 m ;
- les pylônes sont en béton armé, le treillis de la poutre est en acier.

figure 8
Pont d'Ancenis, cible des tests de portée Wifi.



› Description des tests menés en configurations réalistes et extrêmes

Les tests ont été menés dans des conditions proches d'une utilisation sur site du système CASC, à savoir que :

- le superviseur (un PC portable standard) est placé au niveau d'une chambre d'ancrage, lieu sûr et inaccessible au public, disposant de réseaux électrique et téléphonique ;
- l'Access Point Wifi Outdoor sur trépied est positionné de façon dégagée à une dizaine de mètres de la chambre d'ancrage et relié au PC superviseur par un câble Power Over Internet (i.e. intégrant réseau et alimentation) ;
- il est demandé à des capteurs CASC Wifi autonomes sur batteries, positionnés en divers endroits de l'ouvrage, d'effectuer cinq mesures du rapport signal à bruit (en dB)¹ et de les transmettre au superviseur.

Les tests ont été menés selon des configurations typiques de l'installation d'un tel système sur ouvrage, bien entendu au regard des besoins en instrumentation et des possibilités de déploiement, ainsi que dans quelques configurations extrêmes du point de vue des communications hertziennes.

• Première configuration

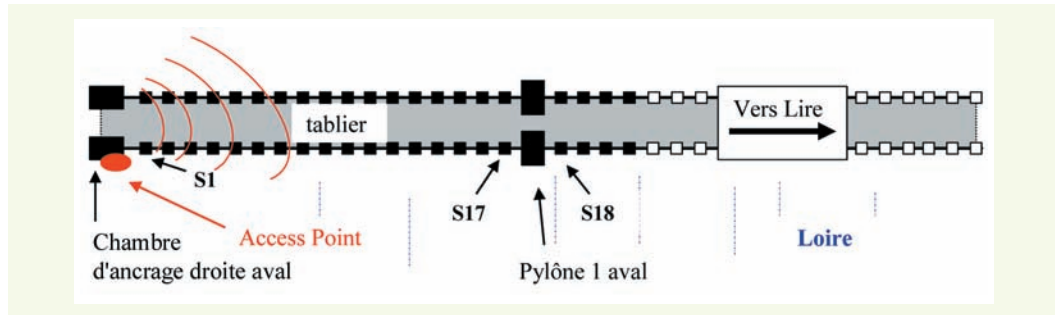
L'Access Point est positionné sur le toit de la chambre d'ancrage aval côté Ancenis (**figure 9**). Il se situe dans le plan des câbles aval. Les tests sont pratiqués en éloignant les capteurs Wifi de la chambre d'ancrage, depuis la suspente n° 1 (S1) jusqu'à la suspente n° 17 (S17) et même au-delà (**figure 10**). À mesure que l'on éloigne le capteur Wifi de la chambre d'ancrage se rencontrent de nombreux obstacles métalliques.

figure 9
Access Point Wifi Outdoor sur la chambre d'ancrage, i.e. dans le plan des câbles.



¹ Pour évaluer la portée du lien de radio-transmission Wifi entre un capteur et l'Access Point, le capteur intelligent CASC Wifi intègre une fonction permettant d'évaluer le rapport signal à bruit (RSB exprimé en dB) vu par un capteur en un lieu et un temps donnés. Il s'agit de la différence minimum de puissance entre le signal que l'on cherche à recevoir et le bruit (bruit thermique, bruit industriel, microondes, bruit dû aux autres réseaux Wifi, etc.). On le définit à l'aide d'un logarithme à base 10 par $RSB = 10 \cdot \log(\text{puissance du signal/puissance du bruit})$. Si le signal est plus puissant que le bruit, le RSB est positif, si le signal est noyé dans le bruit, le rapport est négatif. Le RSB minimum dont un capteur CASC a besoin pour dialoguer correctement est donné par le constructeur des composants Wifi qui le constituent. En règle générale, des communications fiables Wifi sont garanties dès lors que le RSB atteint 5 dB au moins. En-deçà, on a atteint la limite de portée du Wifi.

figure 10
Schéma de la première configuration vue de dessus.



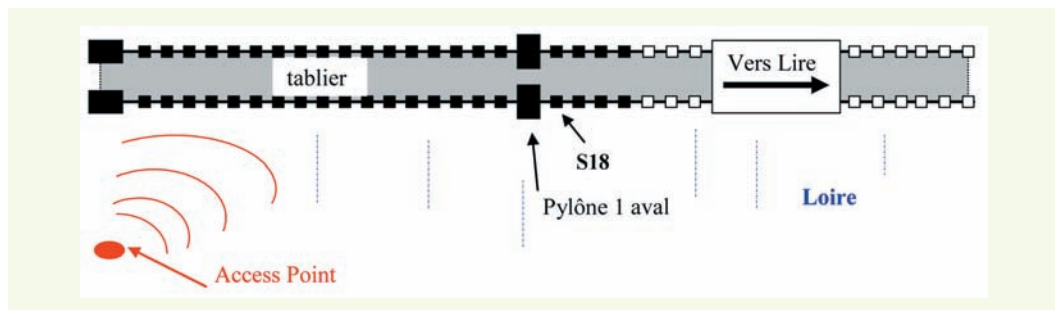
• **Seconde configuration**

L'Access Point est à présent positionné à 20 m en aval du pont (figure 11). Dans cette configuration qui permet d'élargir le champ d'action de l'Access Point, c'est-à-dire d'améliorer le rayonnement de ses antennes, une nouvelle série de tests est pratiquée (figure 12). En retrait du plan des câbles, l'Access Point couvre mieux l'ensemble de l'ouvrage, ce qui diminue les risques de masquage du Wifi par rapport à la situation précédente où l'Access Point était situé sur le toit de la chambre d'ancrage, autrement dit dans le plan des câbles.

figure 11
Access Point situé à 20 m en aval du pont sur la rive droite.



figure 12
Schéma de la seconde configuration vue de dessus.

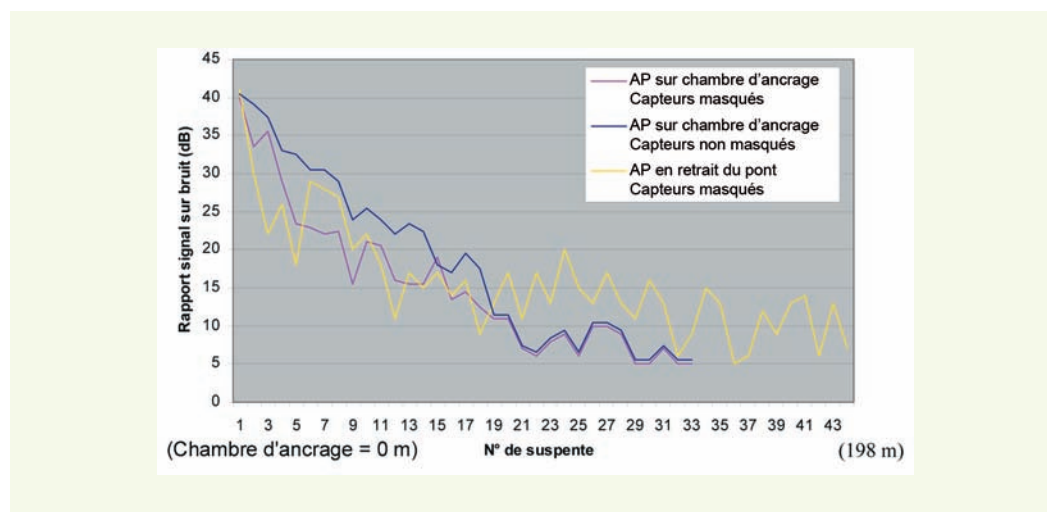


› **Résultats et conclusions**

Des séries de tests sont menés dans les deux configurations. Pour évaluer le rapport signal à bruit d'une configuration, on moyenne les mesures effectuées par deux capteurs à raison de cinq mesures chacun. La figure 13 donne la répartition du RSB en fonction de la position des capteurs sur l'ouvrage et pour les trois séries de mesures : en configuration 1 avec des capteurs masqués ne voyant pas l'Access Point (courbe mauve), en configuration 1 avec des capteurs voyant l'Access Point (courbe bleue), en configuration 2, l'Access Point Wifi étant donc en retrait de l'ouvrage (courbe jaune).

Nous voyons qu'avec un Access Point positionné sur le toit de la chambre d'ancrage, les communications avec des capteurs même masqués sont fiables (RSB au moins égal à 5 dB) jusqu'à la suspenso n° 33, soit une couverture de plus du tiers de l'ouvrage. Cette couverture est évidemment étendue si les capteurs sont sortis du plan des câbles, comme l'ont montré des tests complémentaires en nacelle. Lorsque l'Access Point est positionné en retrait de l'ouvrage, la couverture est, comme attendu, encore meilleure, avec plus de la moitié de l'ouvrage couverte (jusqu'à la suspenso n° 44) en communications fiables.

figure 13
Synthèse des portées Wifi
en fonction de la distance
et du masquage.



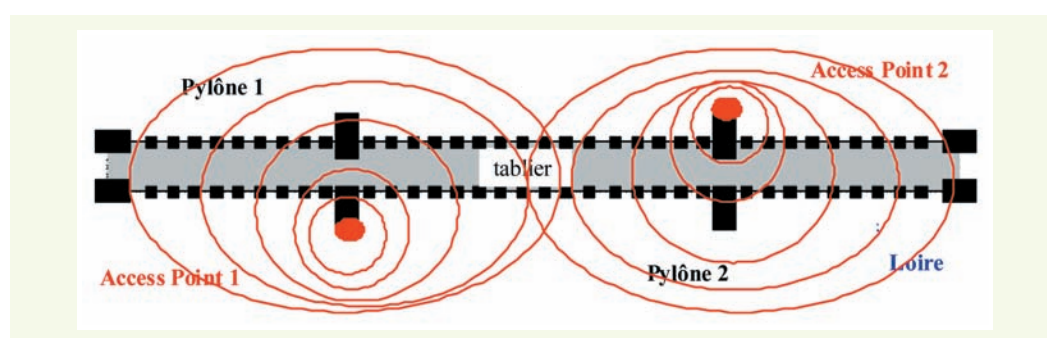
Globalement ces essais ont permis de conclure à la viabilité du Wifi comme moyen de communications inter-capteurs sur ouvrage d'art ; non seulement ils valident la couverture de la zone ciblée par un seul Access Point même dans une configuration très défavorable du point de vue radio-fréquence (capteurs masqués), mais ils démontrent que cette zone peut couvrir le tiers, voire la moitié de l'ouvrage.

Par ailleurs, comme on l'a vu en positionnant l'Access Point en léger retrait par rapport à l'ouvrage, les possibilités d'extension de la zone Wifi sont nombreuses :

- positionnement de l'Access Point en retrait et mieux centré par rapport à l'ouvrage ;
- ajout d'Access Points (un ou deux pour l'ensemble de l'ouvrage) fonctionnant en relais du premier et étendant d'autant la zone Wifi ;
- choix d'Access Points plus puissants (1 000 mW au lieu de 800 mW) ;
- possibilité de faire réaliser des capteurs et de choisir des Access Points à antennes directionnelles, ce qui augmente sensiblement les portées ;
- optimisation, dès l'installation d'un capteur, du positionnement de celui-ci et de son antenne (ce qui ne pouvait pas être le cas pour nos essais), ainsi que du positionnement de l'Access Point, en vue d'une couverture optimale.

En extrapolant les résultats, on peut suggérer un positionnement de deux Access Points susceptible d'assurer une couverture totale de l'ouvrage en Wifi (**figure 14**) compte tenu de la symétrie de celui-ci.

figure 14
Positionnement de deux
Access Points en vue
d'assurer une couverture
totale de l'ouvrage en Wifi.



Le cas du pont d'Ancenis est intéressant, car représentatif à la fois des structures à câbles et de bon nombre d'ouvrages composés de nombreux éléments métalliques hostiles aux propagations radio (treillis du tablier, pylônes câbles). Cette validation dépasse donc largement le simple cadre du pont suspendu d'Ancenis.

■ Mise en œuvre du Zigbee sur une plate-forme existante

› Origine et objectifs du Zigbee

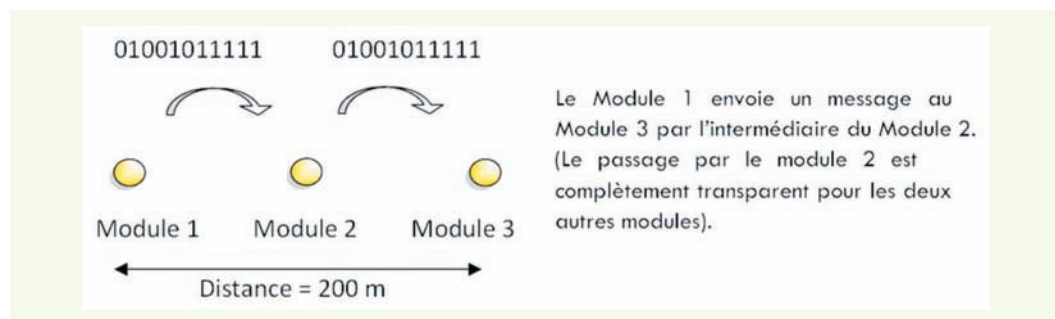
Le Zigbee [15] est un protocole récent (standard IEEE 802.15.4 obtenu en décembre 2004), imaginé et spécifiquement conçu pour réaliser des réseaux de communication sans fil à consommation très réduite rendant possibles des instrumentations de longue durée.

À l'origine de ce protocole et de ses spécifications il y a une alliance de fabricants et d'industriels de l'électronique qui, prenant conscience des défis et de l'attente en matière de communications sans-fil, décident de définir un protocole à très basse consommation visant à pallier les faiblesses des systèmes existant alors (Wifi, protocole *lourd* et consommateur ; BlueTooth, protocole de faible portée, limité aux petits réseaux) et principalement dédié aux applications à réseaux denses et aux finalités domotiques ou industrielles. L'objectif est également de proposer des solutions à moindre coût (quelques dollars pour un module Zigbee contre une dizaine pour le BlueTooth et plusieurs dizaines pour le Wifi). Cependant, si Zigbee présente l'avantage d'une pile protocolaire de petite dimension (environ 40 koctets) et de faible consommation, il est limité en termes de débit maximum ($30 \text{ koctets} \cdot \text{s}^{-1}$) et de portée maximum (100 m), ce qui risque d'être un problème pour de nombreuses applications. Le LCPC a donc mis en œuvre ce *jeune* protocole afin d'évaluer ses capacités réelles en comparaison des capacités théoriques affichées par ses promoteurs.

› Zigbee, une architecture multi-saut *ad hoc*

Un des points forts de la norme Zigbee est que chaque nœud du réseau est capable de jouer plusieurs rôles en même temps : émetteur, récepteur, retransmetteur, coordinateur. En particulier, le mode retransmetteur est caractérisé par un principe de transitivité (si le nœud A voit B et que B voit C, alors A voit C) totalement transparent pour le module qui assure la retransmission. Cette transitivité transparente fait des réseaux Zigbee des réseaux multi-saut *ad hoc*, fondamentalement différents des réseaux en mode *infrastructure*, tels que le Wifi ou le GSM, pour lesquels des cellules intermédiaires sont indispensables pour assurer le routage des données échangées, par exemple des Access Points (figure 15). Par ailleurs, au moins un nœud du maillage Zigbee joue en permanence le rôle de coordinateur en tenant à jour en temps réel les nœuds éveillés et en évaluant la liste des chemins possibles entre tous les nœuds du réseau. D'autres types de routage réseau peuvent également être implémentés (OLSR, AODV).

figure 15
Positionnement de deux
Access Points pour une
couverture totale de
l'ouvrage en Wifi.



Tests du Zigbee au LCPC

Après une mise en œuvre fonctionnelle en laboratoire de modules Zigbee standard, on a équipé trois capteurs CASC Wifi en technologie Zigbee, afin d'évaluer ce protocole dans des conditions réelles (figure 16). Le système CASC (voir le paragraphe consacré à ce système) prévoit que N capteurs, physiquement répartis en ligne le long des câbles des ouvrages, ne dialoguent qu'avec un superviseur (et non entre eux). Les dimensions visées, de l'ordre d'une à quelques centaines de mètres, et la linéarité caractérisant l'installation des capteurs semblaient correspondre, *de facto*, aux avantages mis en exergue pour le Zigbee. Une fois le travail d'intégration et d'adaptation matérielles et logicielles réalisé et validé pour les trois capteurs et le superviseur CASC, l'ensemble du dispositif est placé dans le banc de test du LCPC (figure 17).

Les tests consistent à utiliser la fonction de base du capteur CASC pour acquérir et dater des ondes de choc et retransmettre les données au superviseur. Des chocs sont appliqués en trois endroits du câble, soit à proximité du capteur C1, lequel communique directement avec le module Zigbee associé au PC superviseur (jouant le rôle de coordinateur du réseau Zigbee), puis à proximité du capteur C2, le transit des données nécessitant alors un saut par le capteur C1, puis à proximité du capteur C3, la transmission des données nécessitant dans ce cas deux sauts par les capteurs C2, puis C1 (figure 18).

figure 16
Le capteur CASC équipé d'un module Zigbee et d'un module Wifi en vue d'une évaluation comparative
a : le module Zigbee
b : le capteur CASC prototype
c : le module Wifi.

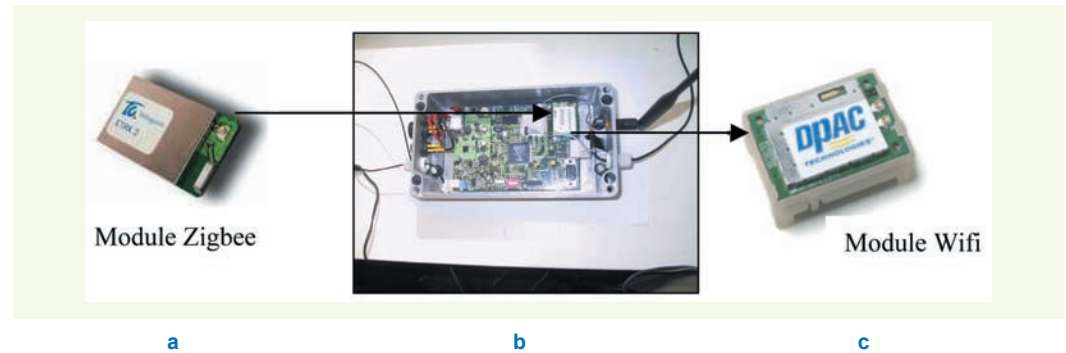
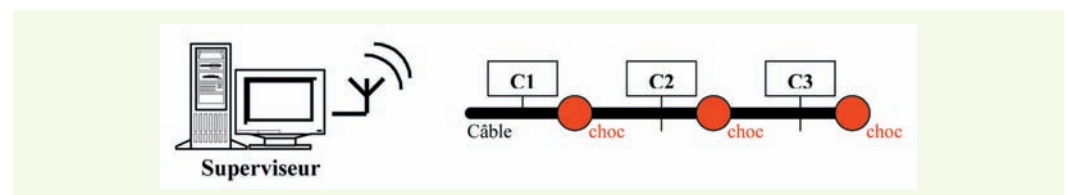


figure 17
Tests de transmission de données réalisés avec un système CASC équipé du protocole Zigbee
a : placement des trois capteurs CASC sur le banc de test
b : simulation de chocs.



figure 18
Chocs provoqués en trois endroits de la ligne de capteurs CASC équipés en Zigbee.



► Résultats et retour d'expérience

La programmation des capteurs pour exploiter le réseau Zigbee est relativement aisée et l'appropriation du protocole a été rapide. La documentation est complète.

On a tout d'abord appliqué des chocs d'intensité assez faible pour ne faire réagir qu'un seul capteur à la fois. Les résultats sont satisfaisants sur le plan fonctionnel, car la norme tient ses promesses : les transmissions sont fiables, les données sont intègres et parfaitement acheminées par le protocole quel que soit le routage et le nombre de sauts.

Les chocs de forte intensité appliqués par la suite déclenchent simultanément les trois capteurs, lesquels cherchent alors à transmettre en même temps des données au superviseur. Mais comme la norme Zigbee ne prévoit pas de connexions multiples simultanées, le module Zigbee associé au superviseur reçoit les données des trois capteurs successivement sans notion de priorité. Remarquons que le protocole TCP/IP autorise pour sa part la communication simultanée entre un quelconque nœud IP et plusieurs autres nœuds par le mécanisme des *sockets*. Les modules Zigbee n'ayant pas

de file d'attente, il a fallu programmer, pour chaque capteur, un mécanisme d'essai/relance, qui, lorsque le superviseur est déjà en communication avec un autre capteur du réseau, réitère la requête de connexion jusqu'à ce que la transmission des données réussisse. La taille *a priori* modeste du protocole est liée aussi au fait que manquent des fonctions de ce genre. De telles fonctions doivent souvent être ajoutées *a posteriori* par le concepteur (écriture de *drivers*), ce qui augmente la taille.

La consommation électrique des modules Zigbee est effectivement basse (environ 20 mW) et le mode de veille fonctionne correctement. Néanmoins, l'incapacité d'un module Zigbee à être *réveillé* depuis l'extérieur du nœud auquel il est associé limite beaucoup le déploiement de ce protocole. En effet, lorsqu'il est en veille, le module Zigbee n'assure plus le mécanisme de transitivité ; aussi, pour qu'à tout moment le capteur C3 de notre montage d'essai puisse dialoguer avec le capteur C1, il faut impérativement que le capteur C2 soit en éveil. Ce principe peut, dans de nombreux cas, être restrictif car, pour les capteurs ne transmettant (donc ne consommant) que sur *événement*, il impose que chaque nœud situé sur le plus court chemin au superviseur demeure toujours (ou souvent) en éveil. C'est l'infériorité des réseaux *ad hoc* par rapport aux réseaux à base d'infrastructures (type Wifi, GPRS), dans lesquels les nœuds consomment certes plus, mais sont toujours assurés lorsqu'ils communiquent de *voir* le superviseur quel que soit le routage.

La distance théorique maximum de 100 m entre deux nœuds n'a pu être atteinte en extérieur dans un environnement pourtant moyennement bruité (présence de métal, pas de masquage direct, etc.). Empiriquement la distance moyenne de 30 m maximum a pu être atteinte entre deux nœuds Zigbee. Les antennes Zigbee ne sont pas optimisées.

Les débits sont faibles et augmentent sensiblement les durées des échanges mais, au regard du volume des données classiquement acquises et transmises dans l'instrumentation en génie civil, ces débits de l'ordre de la dizaine de koctets par seconde restent acceptables.

Sauf à faire partie de la Zigbee Alliance et contrairement à l'IP, la pile Zigbee n'est pas directement intégrable au processeur que le concepteur a retenu (selon d'autres critères). La pile Zigbee n'est accessible que via des modules contenant eux-mêmes un processeur qui interface et gère les couches physiques et logiques du module radio Zigbee. Si ce principe facilite considérablement l'écriture des fonctions d'exploitation du réseau Zigbee, il n'en demeure pas moins que cette situation marketing implique la présence de deux processeurs sur une carte où un seul suffirait et ceci augmente la consommation et le volume du capteur.

Les tests menés pour évaluer la technologie Zigbee ont été limités à une simple application et toutes les potentialités de cette norme n'ont pas été approfondies. Néanmoins, le retour d'expérience présenté ci-dessus montre que ce protocole pourrait répondre à des besoins en phase avec ses spécificités. Notons que, dans le cas présent, l'évaluation a été faite à partir de modules Zigbee *clés en mains* dont la seule interface côté processeur – cœur du capteur – est un port série. La Division métrologie et instrumentation du LCPC évaluera bientôt une solution *intégrée* où la couche Zigbee sera directement accessible au développeur via un petit OS embarqué dans un monoprocesseur. La plate-forme Mote, décrite dans un paragraphe qui lui est consacré, est représentative de ce type de solution intégrée.

■ Optimisation de la synchronisation de capteurs par GPS [13]

Les contraintes de synchronisation des capteurs sans-fil ont été détaillées et les solutions les plus connues ont été présentées dans cet article. Le LCPC a en particulier mis en œuvre et optimisé le mécanisme de synchronisation par GPS pour celles de ses applications qui nécessitent un très haut niveau de précision en termes de datation (ex : la propagation d'ondes).

Nous avons montré qu'en connectant simplement le signal périodique PPS du module GPS (1 s \pm 50 ns) à l'entrée RESET de la base de temps interne du processeur, celui-ci est alors resynchronisé chaque seconde à quelques dizaines de nanosecondes près. Cependant, si, en une seconde, la température ou le vieillissement électronique n'influent pas, il persiste une erreur qui est l'imper-

fection naturelle du quartz exprimée en p.p.m. (nombre de pulses par millions de cycles). Par exemple, pour un quartz donné à 100 MHz à 100 p.p.m. le compteur de temps (le *timer*) synchronisé sur le signal PPS donnera une valeur comprise dans l'intervalle [99 999 000, 100 001 000] nombres de cycles. Dans ce cas, sur chaque PPS, le timer donnera une seconde précise à $\pm 10 \mu\text{s}$ par seconde. Cette erreur est relativement constante dans le temps, car il s'agit de l'erreur native du quartz lors de sa fabrication en usine. Une première amélioration a consisté à estimer cette erreur pour s'en affranchir.

Une seconde amélioration vise à diminuer la consommation du module GPS.

› Estimation de l'erreur native du quartz

Partant de cette capacité du capteur à estimer l'erreur native de son quartz sur chaque PPS, le LCPC a développé un algorithme simple sur la base duquel le processeur peut améliorer la datation des événements. L'algorithme consiste à relever dix valeurs de l'erreur entre les 100 000 000 cycles attendus sur chaque PPS et le nombre de cycles comptés en pratique par le *timer*. Le capteur calcule l'écart type de ces dix valeurs, puis la moyenne E des N valeurs issues du filtrage des écarts compris dans l'écart type.

Ensuite, sur chaque événement que le capteur doit dater, le capteur lit la valeur du *timer* à l'instant T_i et corrige cette valeur en T_i' en effectuant une simple règle de 3. Pour une erreur native moyenne E estimée à 9 700 cycles, l'équation (1) montre comment corriger la datation des événements pour en tenir compte.

$$T_i' = T_i \cdot \frac{100\,000\,000}{100\,009\,700} \quad (1)$$

En pratique, même lorsque le quartz est de qualité moyenne (p.p.m. élevé), l'erreur qui lui est due excède rarement les 10 à 50 μs par seconde. Grâce à ce mécanisme, dès qu'un capteur du LCPC capte le GPS, les événements sont datés avec une précision de 1 μs . Par ailleurs, comme le processeur qui reçoit la trame d'information GPS contient l'heure absolue GMT, le capteur LCPC date ses données avec l'heure absolue à la microseconde près.

› Optimisation de la consommation du module GPS

Même si les modules GPS du commerce consomment de moins en moins, il est intéressant d'optimiser leur fonctionnement pour tenir compte de la contrainte énergétique évoquée précédemment.

Partant de la capacité du capteur à estimer précisément l'erreur native de son quartz et de l'influence quasi nulle de l'évolution de la température et du vieillissement électronique sur de courtes périodes (quelques centaines de secondes à quelques minutes), le LCPC a pu optimiser la consommation du capteur. En effet, comme expliqué ci-dessus, le capteur sait estimer précisément la période réelle de son quartz (par rapport à la période théorique). L'optimisation consiste simplement à démarrer un deuxième *timer*, synchronisé non sur le signal PPS mais sur une période tenant compte de l'erreur native estimée du quartz, à éteindre le module GPS intégré au capteur et, dès lors, à dater les événements sur la valeur du deuxième *timer*. Le module GPS n'est rallumé que de loin en loin pour resynchroniser les *timers*. Les périodes d'allumage/extinction du module GPS se déterminent alors suivant les divergences constatées empiriquement (mais constantes) et selon le degré d'exigence dans la datation d'un événement.

Par la mise en place de rapports cycliques dans l'allumage du module GPS, cette optimisation permet également de pallier les situations de pertes temporaires, mais parfois longues de la couverture GPS.

› Résultats

Une manipulation a permis de mettre au point un capteur divergeant d'une microseconde toutes les 45 s. Comme l'erreur de datation maximale tolérée par l'application est de 30 μs , le capteur doit allumer son module GPS toutes les 22 min. Il doit le laisser allumé pendant 3 min, période de

recouvrement de la constellation satellitaire et durée nécessaire à l'estimation de l'erreur du quartz. La consommation moyenne est alors de 8,2 mW à comparer aux 60 mW qu'aurait nécessités un fonctionnement continu du module GPS.

APPLICATIONS CONCRÈTES DU SANS-FIL

■ Le système CASC

› Origine et objectif de ce système

Il s'agit dans le principe d'un ancien système mis au point par le LCPC dans le but de détecter et de localiser les ruptures des fils élémentaires constituant les câbles des ponts. En effet, connaître l'état de santé des câbles suspendant les ponts est un enjeu stratégique pour le gestionnaire de l'ouvrage. Le système CASC contribue ainsi au suivi et au contrôle de la santé des ouvrages (ou SHM pour Structural health monitoring).

Plusieurs générations du système ont été mises au point par le LCPC au cours des trente dernières années, l'une d'entre étant industrialisée par la société Quasar Concept [16]. Cette génération particulière équipe et surveille encore aujourd'hui plusieurs ouvrages en France : ponts d'Aquitaine, de Foix, de Merlebach, d'Ancenis, etc. Ces déploiements, les retours d'expérience et les analyses *post-mortem* d'ouvrages surveillés par le système CASC en ont prouvé l'efficacité et la pertinence. Dans la panoplie des moyens actuellement disponibles pour prévenir en temps réel la dégradation des câbles des ouvrages, ce système est une référence.

Le CASC se veut un outil d'aide à la décision pour le gestionnaire, à qui il offre en temps réel une information sur les ruptures survenant dans les câbles de l'ouvrage. En tenant compte des emplacements des ruptures et des autres informations à sa disposition, le gestionnaire peut mettre en place des stratégies allant de la simple réduction du trafic à la démolition de l'ouvrage.

› Principe de détection/localisation et objectifs de la nouvelle génération

La détection des ruptures est fondée sur le principe suivant : lorsqu'un fil tendu rompt, la libération de l'énergie génère une onde acoustique qui se propage dans le câble de part et d'autre du point de rupture ; des capteurs, régulièrement distribués le long du câble, détectent² cette onde par comparaison à un seuil et en datent le passage ; chaque capteur ayant détecté le passage de l'onde transmet l'information à un superviseur (figure 19).

figure 19

Système CASC de surveillance de câbles
a : capteurs CASC fixés au niveau d'un collier
b : armoire de supervision.



Ce superviseur connaît les positions relatives des capteurs (L12, L23, etc.) et peut calculer les écarts temporels séparant les détections par différents capteurs (ΔT_{12} , ΔT_{23}). Il est alors capable de localiser la rupture. Dans l'exemple de la figure 20, une rupture est survenue entre les capteurs C1 et C2. Les capteurs C1, C2 et C3 ont détecté le passage de l'onde acoustique et envoient l'in-

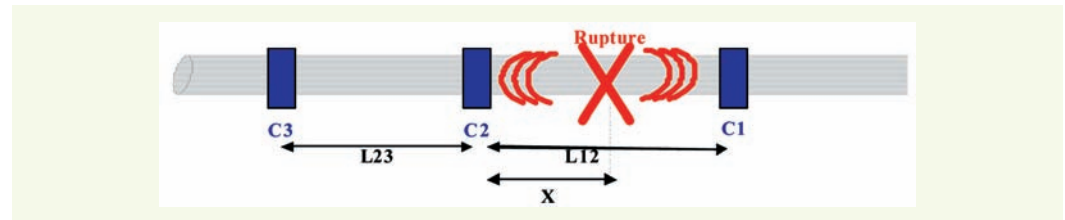
² L'élément sensible intégré à chaque capteur CASC est un accéléromètre. Celui-ci, positionné dans le sens longitudinal du câble lors de l'installation, permet au capteur CASC de mesurer en permanence l'accélération longitudinale (en g) du câble vue à son niveau ; lors du passage d'une onde due à une rupture, l'accélération dépasse un seuil paramétré (en g). Le capteur enregistre le niveau (en g) de l'onde et le temps (en μs) lors du dépassement du seuil.

formation de temps au superviseur, qui calcule la distance X entre le point de rupture et le capteur C2 à l'aide de l'équation (2).

$$X = \frac{1}{2} \cdot (L_{12} - V \cdot \Delta T_{12}) \quad (2)$$

où $V = \frac{L_{23}}{\Delta T_{23}}$

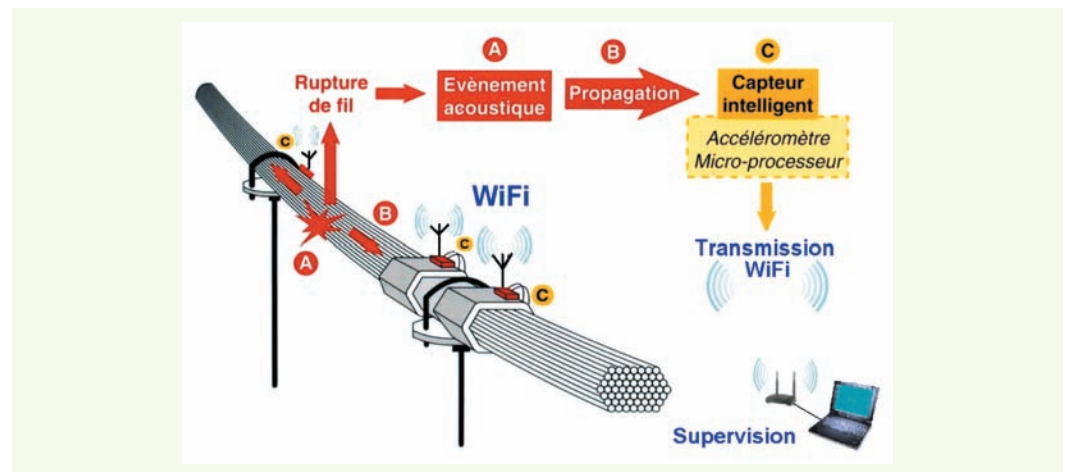
figure 20
Principe de localisation
d'une rupture par le
système CASC.



Bien qu'efficace et fonctionnel, le système CASC a fait l'objet, ces quatre dernières années, d'une évolution globale. Tout d'abord, à des fins de recherches visant à mieux comprendre le phénomène et à vérifier certains modèles, il était souhaitable que le capteur CASC puisse, en cas de dépassement du seuil, enregistrer la forme complète du signal sur une fenêtre de temps (et non pas seulement une valeur maximum). Le système CASC était un système filaire, soumis aux contraintes exposées en introduction : lourdeur et défaillance de la connectique, coûts. Le redéveloppement du système en une version sans-fil (au moins partiellement) semblait pertinent. Enfin, l'armoire de supervision comportait des matériels et des logiciels propriétaires coûteux, que l'emploi de nouvelles technologies tels que les réseaux intelligents et les logiciels à architecture objet a permis de simplifier grandement.

La résolution de ces différentes contraintes a conduit à la mise au point d'un nouveau système CASC (figure 21).

figure 21
Principe de
fonctionnement du
nouveau système CASC.



› Conception du nouveau capteur

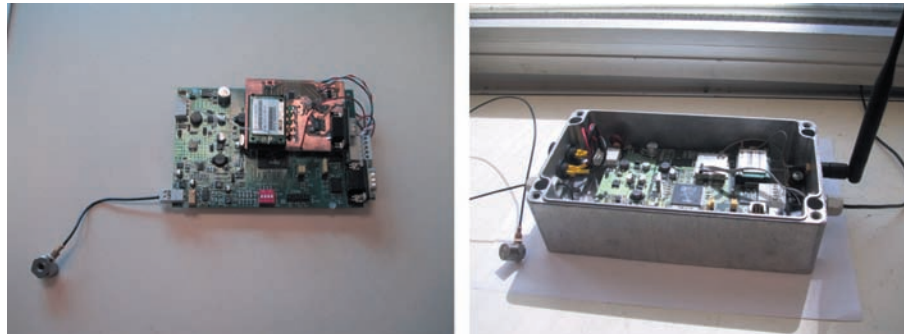
La conception, *ex nihilo*, du nouveau capteur CASC sans-fil (figure 22) a fait l'objet de plusieurs choix et validations de technologies. Le nouveau capteur CASC a les propriétés suivantes :

- il conditionne, mesure et compare en permanence à un seuil les signaux acoustiques depuis la sortie de l'accéléromètre ;
- lorsque le seuil est dépassé, il acquiert 8 ms de signal à une fréquence de 250 kHz, soit deux mille échantillons ;

- il assure une datation absolue des échantillons (précision de la μs) à partir des techniques de synchronisation GPS, tel qu'exposé dans le paragraphe *Validation du Wifi sur ouvrages d'art* ;
- sur la base de sa validation sur ouvrage d'art, il communique avec le superviseur suivant le protocole TCP/IP au moyen du Wifi ; le nouveau capteur CASC intègre donc une pile TCP/IP et l'électronique intégrant la norme physique Wifi (802.11b) ;
- il exécute en permanence et en parallèle des algorithmes programmés dans un processeur DSP (Digital Signal Processor) dédié signal ; ces divers algorithmes lui permettent de transmettre les ondes acquises, ainsi que de prendre à *chaud* et sans les reprogrammer des ordres concernant par exemple une nouvelle valeur de seuil.

figure 22

Le nouveau capteur CASC
a : en développement
b : intégré en boîtier.



a | b

► Conception du nouveau Superviseur

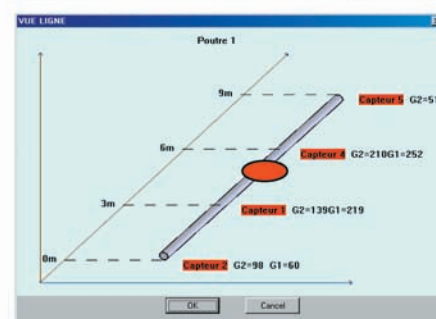
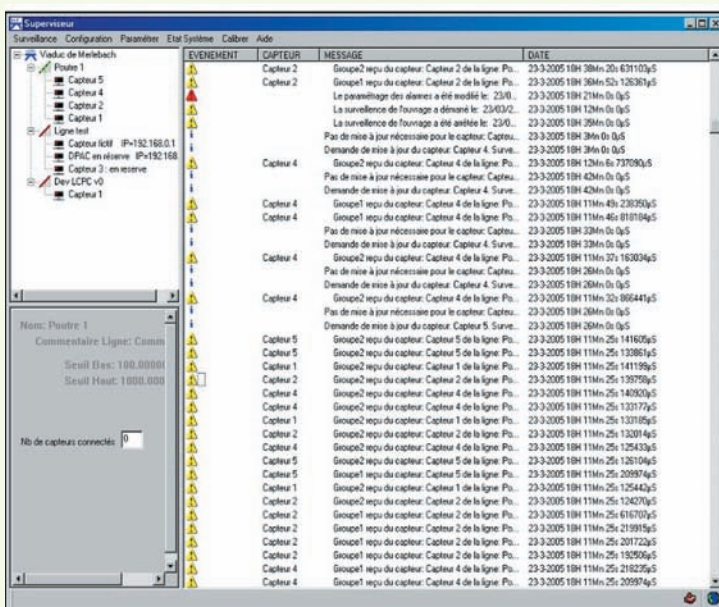
Tirant partie de l'intégration systématique du TCP/IP comme protocole de communication par défaut de tout ordinateur, le redéveloppement du superviseur s'est résumé, pour l'essentiel, au développement d'un logiciel, la partie communication étant largement prise en charge par l'OS du PC. Le Superviseur CASC a été développé en langage orienté objet (Visual C++) de manière à rendre ses fonctions réutilisables pour d'autres applications similaires et intégrables à d'autres progiciels (Matlab, Scilab).

figure 23

Fonctionnement du nouveau superviseur CASC
a : vue principale
b : onde acquise et transmise par un capteur
c : localisation d'une rupture par le superviseur.

Les principales fonctions du nouveau Superviseur CASC (figure 23) sont les suivantes.

- Offrir, à partir d'Interfaces Homme-Machine (IHM) intuitives, une représentation globale et directe de l'instrumentation de l'ouvrage par des lignes de capteurs CASC.
- Donner une vue globale et temps réel du système : état des capteurs, événements, etc.



- Configurer l'instrumentation déployée en quelques clics : ajout de lignes et de capteurs, localisation d'un capteur, gamme de vitesse des ondes, etc.
- Paramétrer les capteurs à chaud : valeur de seuils, période de réveil, état inactif/actif, etc.
- Enregistrer et afficher les signaux en provenance des capteurs.
- À partir des événements fournis par les capteurs, exécuter en permanence la routine de détection des ruptures (voir supra).
- Le cas échéant, transmettre une alarme au gestionnaire par GSM.

› Résultats

Les développements du nouveau système CASC ont abouti à la réalisation d'une plate-forme prototype complète composée d'un superviseur, d'Access Points de différentes capacités et de cinq capteurs CASC prototypes (figure 24).

figure 24
Photos de la plate-forme CASC prototype développée pour les tests de validation.



Par la suite, plusieurs séquences de tests d'intégration et de validation ont été menées pour optimiser puis valider le fonctionnement du système. En particulier, le système CASC, installé dans le banc de 200 m du LCPC, a fait l'objet de nombreux tests dans le cadre d'un plan de test et de validation (figures 25a et b). *In situ*, le système a équipé la poutre du VIPP de Merlebach portée à la rupture lors d'essais menés par le Réseau scientifique et technique du ministère en charge des transports (figures 25c et d). Le système a également servi à l'instrumentation d'un échantillon de câble sollicité en traction dans le banc de fatigue des câbles du laboratoire ELSA du centre de recherches de la Commission des Communautés européennes à Ispra, Italie (figure 25e). Une version prototype de trois capteurs CASC a été acquise par le CCR d'Ispra pour l'occasion.

› Perspectives industrielles

Durant l'année 2007, le LCPC fait développer sur fonds propres une présérie industrielle d'une vingtaine de capteurs CASC. Ils seront installés sur le pont d'Ancenis, qui fait déjà l'objet d'un contrat de surveillance des câbles par l'ancienne version du système CASC. Le choix de ce site est pragmatique : cet ouvrage appartient au patrimoine des ponts suspendus ; des ruptures sont régulièrement avérées ; sa situation permet des interventions rapides de maintenance ou de contrôle du système CASC ; enfin, le nouveau système sera en concurrence avec l'ancienne génération, ce qui permettra de conforter les résultats observés.

Parallèlement à cette validation de terrain, le LCPC effectuera un transfert industriel du nouveau système CASC par vente de licences non exclusives à des sociétés spécialisées dans l'instrumentation d'ouvrages. Des contacts ont déjà été pris.

› Perspectives technologiques et scientifiques

Malgré les résultats positifs du nouveau système CASC, de nombreux travaux d'optimisation restent à mener, notamment en matière de consommation d'énergie. Le nouveau système CASC est

a | b

figure 25

a et b : tests de validation dans le banc du LCPC
 c et d : poutre de Merlebach
 e : essais avec le système CASC vendu au CCR d'Ispra.



encore de nature filaire pour l'alimentation électrique des capteurs. Même si un fil d'alimentation simple réduit largement le coût de mise en œuvre du système (par rapport à un câble série spécifique et blindé) en intégrant les avancées des technologies de récupération et de sauvegarde de l'énergie citées plus haut [17], l'autonomie totale est parfaitement envisageable. Actuellement la consommation du système CASC est de l'ordre de quelques dizaines de milliwatts. Si l'on réduit cette consommation à quelques milliwatts, l'autonomie est possible, car le boîtier choisi présente un volume et des surfaces suffisants pour intégrer des batteries de stockage et des panneaux solaires.

Sur le plan scientifique, les travaux de recherche sur la propagation des ondes dans les câbles, notamment l'analyse de ces signaux pour en déduire des pathologies, devraient trouver une première application grâce au nouveau système CASC. Celui-ci est désormais capable d'enregistrer et de traiter en temps réel des signaux de très haute dynamique, tout en conservant une datation absolue. Au niveau de chaque capteur ou de façon centralisée au niveau du superviseur, les modèles scientifiques pourront être implémentés sous forme d'algorithmes temps réel opérationnels.

■ La Plate-forme mobile d'instrumentation

Les technologies sans-fil ont été intégrées au développement de l'instrumentation embarquée du drone acquis par le LCPC dans le cadre du projet de Plate-forme mobile d'instrumentation (PMI) (figure 26). Ce projet vise à compléter, voire à automatiser l'inspection des ouvrages d'art à l'aide d'un drone [18].

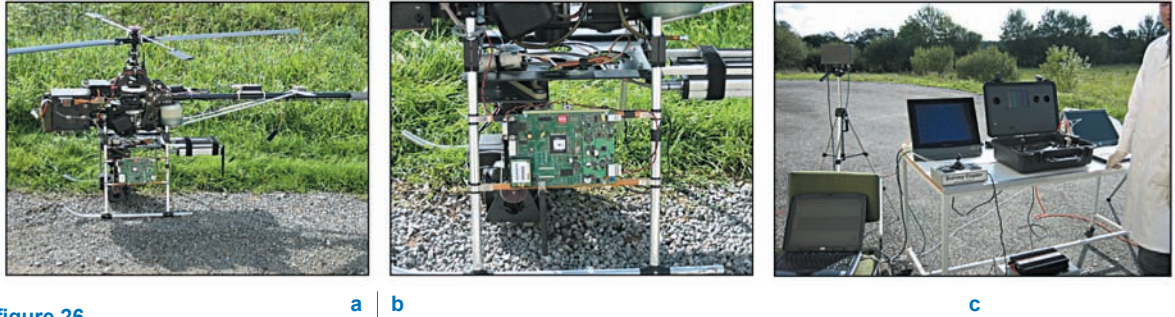


figure 26
a et b : le drone instrumenté
c : le poste de pilotage de la plate-forme mobile d'instrumentation.

Le projet suppose, dans un premier temps, le développement d'une instrumentation embarquée, intelligente, fiable, communicante, capable d'intégrer et de traiter des données hétérogènes en provenance de sources diverses : appareil photo numérique, télémètre laser, accéléromètre, GPS, etc.

La nature du projet exclut tout développement de protocoles propriétaires pour l'échange des données numériques entre le drone et la station au sol. Aussi, outre la communication protocolaire sur la base du TCP/IP, les technologies suivantes, mises en œuvre pour le développement du nouveau système CASC, ont-elles pu être reprises et adaptées pour la PMI :

- communications suivant le protocole TCP/IP et physiquement en Wifi ;
- algorithmes hébergés et exécutés par un DSP ;
- datation absolue des événements par méthode GPS (nécessaire pour le post-traitement des images acquises) ;
- acquisition de fenêtres temporelles d'accélération du drone selon plusieurs axes ;
- mise à disposition et exploitation des données en temps réel sur une station sol matérialisée par un superviseur aux interfaces homme-machine intuitives.

Par ailleurs, pour répondre aux besoins complexes des nombreux algorithmes implémentés ou prévus par l'instrumentation embarquée, l'OS embarqué μ CLinux a été intégré en 2007 au processeur de la carte embarquée. Le niveau d'abstraction ajouté entre les algorithmes et les ressources du processeur et de ses périphériques constitue une aide pour les développeurs.

■ Le projet de plate-forme sans fil générique

Les compétences et les connaissances inhérentes aux technologies sans-fil ont ensuite été confrontées aux domaines du génie civil afin d'en évaluer le potentiel. Après un audit des capacités du LCPC et de ses partenariats en cours ou potentiels pour faire évoluer les technologies et les connaissances, le consultant a rencontré de nombreux acteurs de l'instrumentation en génie civil. Ces acteurs font partie du Réseau scientifique et technique du ministère en charge des transports (Laboratoires régionaux des Ponts et Chaussées, CETE, etc.) ou du secteur marchand (groupements industriels et PME).

Il ressort clairement du rapport de cette étude que de nombreuses applications filaires pourraient évoluer avantageusement grâce à des technologies sans-fil (par exemple en sismologie ou en géotechnique) réduisant coûts, durées de déploiement et de mise en œuvre des systèmes. Il apparaît également que les nouvelles capacités tels que les OS embarqués associés à des protocoles de communication sans-fil natifs, ou encore l'intégration maximale nécessitée par les capteurs noyés dans les structures, pourraient motiver le développement de nouvelles applications.

Sur cette base, un projet de Plate-forme sans fil générique (PSFG) a été lancé. Son but est de synthétiser l'ensemble des briques fonctionnelles développées, maîtrisées et déclinables pour d'autres applications. Le cahier des charges de cette plate-forme a été rédigé. L'objectif global est de rendre le LCPC capable de délivrer (sous formes de licences) une plate-forme dont le superviseur est ouvert à l'ajout et à l'intégration d'algorithmes métiers de l'instrumenteur (sous forme de lien à des progiciels ou par intégration de bibliothèques logicielles telles les DLL). Le superviseur

possède et offre nativement un ensemble de fonctions permettant de gérer un réseau de capteurs intelligents sans fil (exécuter une transformée de Fourier, une corrélation entre deux voies d'un capteur, envoyer des ordres, recevoir des données, etc.). Physiquement deux à trois modèles de capteurs intelligents sans fil et adaptables seront proposés pour répondre au maximum des besoins identifiés.

In fine, outre la cession d'un savoir-faire à des contractants, l'objectif est de constituer une plate-forme aux capacités ascendantes, qui capitalise et diffuse sous forme d'un standard les avancées du LCPC en matière de réseau de capteurs intelligents sans fil.

■ Mesure et acquisition sans-fil d'accélération par une plate-forme Mote

Parmi les plates-formes sans-fil existantes, le Mote, développé par l'université de Berkeley, se distingue, d'une part parce qu'il est pionnier de ce thème de recherche, d'autre part en tant que support du développement de TinyOs, un système d'exploitation très léger et économe en énergie. TinyOs est caractérisé par un mécanisme d'exécution événementiel et une programmation par composants [19].

Au niveau matériel, le Mote possède une architecture classique, avec cependant la particularité que les senseurs sont placés sur une carte fille et reliés au module de base par des connecteurs. Cela permet de disposer de cartes capteurs variées, pouvant contenir des éléments sensibles à l'intensité lumineuse, à la température, à l'accélération, etc. Les plans électroniques étant libres et ouverts, il est possible de développer des cartes capteurs sur mesure tel que dans [20].

Par ailleurs, le fait que l'environnement d'exécution TinyOs est *open source*, donc libre de droits, et fortement optimisé au niveau énergétique, a contribué à son implémentation sur d'autres plates-formes sans fil, telles que Btnodes [21], les Motes d'Intel [22], ScatterWeb [23], etc.

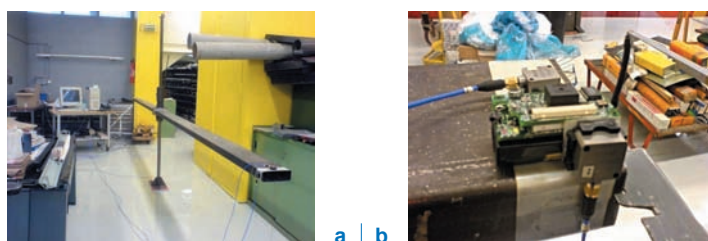
Pour illustrer ces qualités, une étude des performances de TinyOs a été menée, en comparaison avec le système multitâche temps réel Ecos. Les résultats montrent que les performances sont améliorées d'un facteur 8, les coûts en instruction et en mémoire sont réduits d'un facteur 2 et 30 respectivement, la consommation énergétique d'un facteur 12. Ces résultats montrent que le modèle événementiel et l'utilisation du concept de composant logiciel aboutissent à des résultats adaptés aux fortes contraintes des réseaux de capteurs sans fil [24]. En effet, dans le modèle événementiel, il existe deux contextes d'exécution : le premier est temps réel et ne peut être interrompu, l'autre exécute des traitements plus longs déclenchés par les gestionnaires d'événements. Enfin, la requête et son traitement effectif sont découplés dans le temps, souvent de manière asynchrone afin de ne pas bloquer le processeur de façon prolongée [19].

Il nous a semblé par ailleurs intéressant d'évaluer les performances de l'accéléromètre MEMS ADXL202 sur deux axes disponibles sur la carte senseur, en comparant lors d'une analyse modale les fréquences propres d'une maquette de pont en construction obtenues avec le Mote à celles obtenues avec un accéléromètre filaire.

Cette maquette de pont est conçue de telle manière que ses fréquences propres sont du même ordre de grandeur qu'un pont en construction (figure 27a). Le Mote et le capteur filaire sont placés côte à côte à l'extrémité de la maquette sur le tablier (figure 27b).

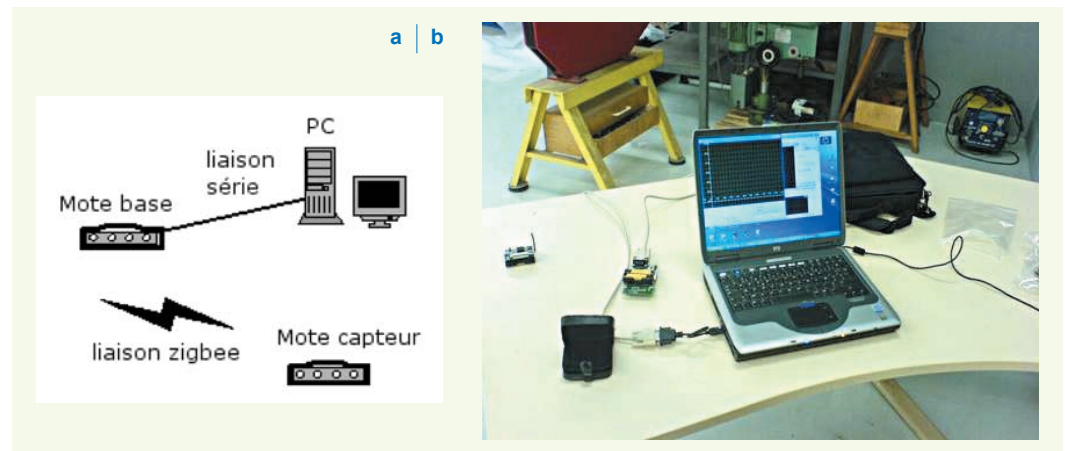
figure 27

a : maquette d'un pont en construction
b : capteurs filaire et sans-fil.



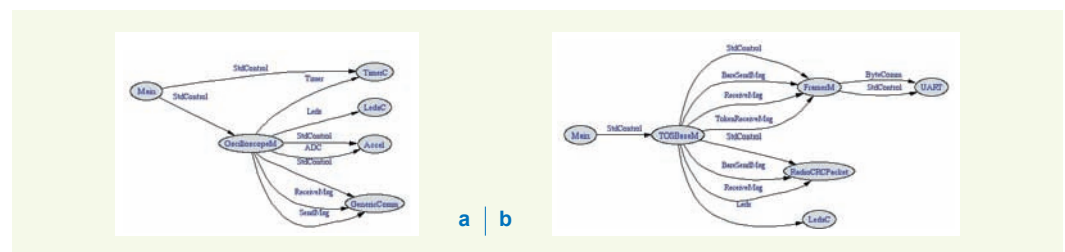
Dans cette expérience l'architecture du réseau sans fil est monosaut, avec un capteur mesurant les vibrations du modèle de pont et un autre Mote, relié à un superviseur, faisant office de station de base (**figure 28**).

figure 28
a : schéma du réseau
b : photographie du PC et du Mote utilisé en station de base.



Le Mote senseur qui effectue la mesure et le Mote station de base qui reçoit les données sont tous les deux programmés avec une application embarquée NesC, un langage de programmation par composants, extension du C et développé dans l'environnement TinyOs (**figure 29**).

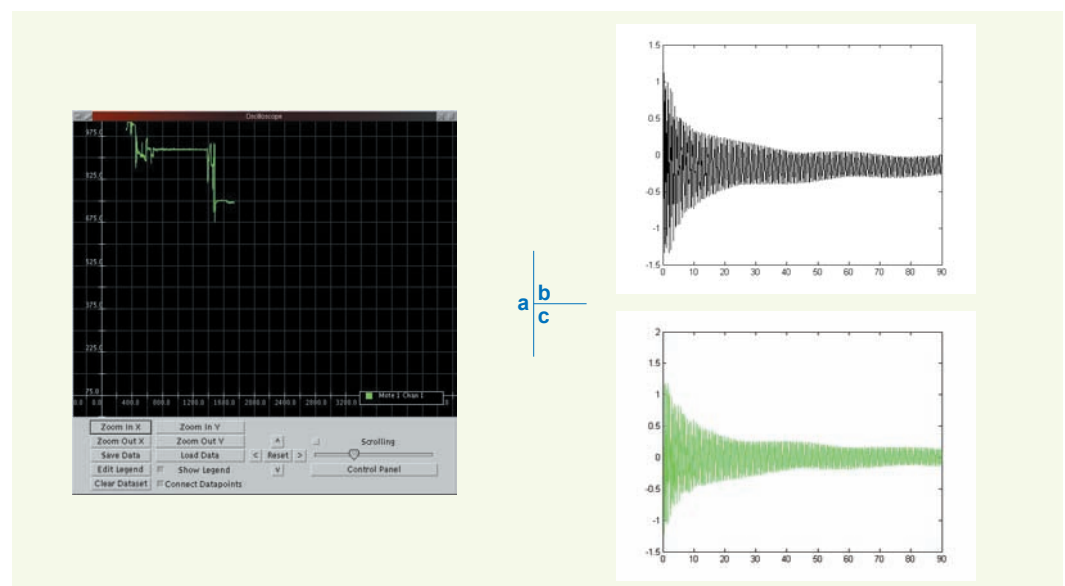
figure 29
a : application embarquée capteur
b : application embarquée station de base.



Un proxy TCP/IP redirige les trames reçues via liaison série depuis le Mote de base vers un superviseur modifié pour les circonstances (**figure 30a**).

On a mesuré en continu pendant 90 s les vibrations selon l'axe horizontal dues à une excitation de type impulsionnel. Les variations temporelles de l'accélération sont présentées pour le capteur filaire sur la **figure 30b** et pour le Mote sur la **figure 30c**.

figure 30
Mesures de l'accélérateur
a : le superviseur
b : mesures avec le capteur filaire
c : mesures avec le Mote.



À l'aide de Matlab, on a ensuite appliqué aux deux signaux une transformée de Fourier discrète afin de les comparer dans le domaine des fréquences (figure 31) et d'extraire les fréquences propres de la maquette de pont. On peut voir que la courbe du Mote est légèrement plus bruitée que la référence filaire. Cependant, les maximums locaux, qui correspondent aux fréquences propres de la maquette de pont, coïncident remarquablement. Ceci est confirmé par les maximums locaux du spectre extraits par un script Matlab afin d'en déduire les fréquences propres (tableau 1).

figure 31

Transformée de Fourier discrète de l'accéléromètre filaire (en noir) et de l'accéléromètre Mote (en vert).

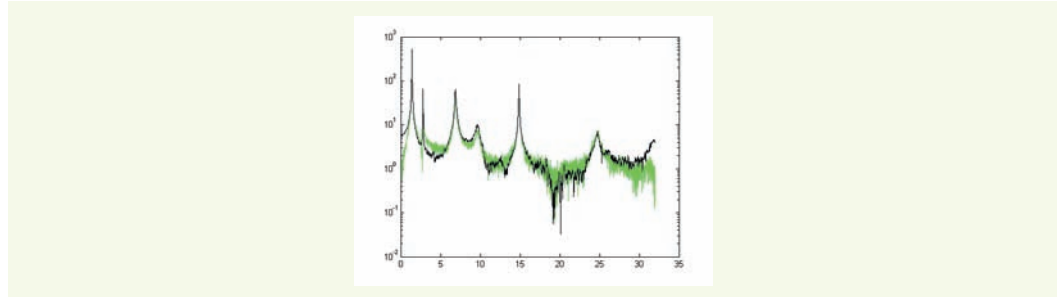


tableau 1

Fréquences propres de la maquette de pont.

Fréquences propres extraites (Hz) Accéléromètre filaire de référence	Fréquences propres extraites (Hz) Accéléromètre MEMS en réseau sans fil	Erreur relative (%)
1,411	1,411	< 0,001 %
2,800	2,811	< 0,393 %
6,877	6,877	< 0,001 %
14,888	14,888	< 0,001 %
24,733	24,788	< 0,222 %

Bien qu'un peu de bruit dans l'espace des fréquences soit présent sur le Mote, ce qu'avaient noté précédemment Spencer *et al.* [25], l'analyse des fréquences propres est satisfaisante relativement à la référence filaire. Si l'on ajoute la possibilité de développer une carte capteurs avec des accéléromètres de haute précision, l'application des Mote à l'analyse modale est très prometteuse.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Les travaux réalisés par le LCPC en matière de réseaux de capteurs sans fil intelligents ont été importants au cours des quatre dernières années et tous n'ont pas été présentés dans le cadre de cet article. Outre s'imprégner de la culture du domaine, il a fallu intégrer de nouvelles technologies et de nouveaux standards et penser différemment les développements qui les implémentent. Par une démarche pragmatique consistant à s'appropriier, puis à mettre en œuvre les technologies, la Division Métrologie et Instrumentation du LCPC a validé certaines technologies dans des contextes réels du génie civil (validation du Wifi sur un ouvrage d'art) ou lors d'applications concrètes (analyse modale par Mote, instrumentation d'un drone, etc.).

La durée de vie des ouvrages à surveiller, l'efficacité économique et la pérennité des développements électroniques au sein du Réseau scientifique et technique ont amené à privilégier l'implémentation de standards : protocoles TCP/IP ou Zigbee, OS embarqués de type Linux ou TinyOS. Leur utilisation confère aux capteurs conçus une longue durée de vie, les rend robustes, reconfigurables à chaud et réutilisables pour des applications similaires. La veille et l'appropriation technologiques sont devenues une attribution stratégique de la Division.

La liste des technologies décrites n'est pas exhaustive et de nouvelles technologies ou de nouveaux concepts sont à l'étude, comme l'intégration du protocole de communication sans-fil Bluetooth associé à des microprocesseurs à très basse consommation (par exemple le MSP430). L'héritage

culturel consistant à mailler les capteurs filaires en étoile ou en bus est aujourd'hui bouleversé ; l'infinité des topologies que présentent les réseaux sans fil permettra, sous peu, d'évaluer les possibilités et la pertinence, selon l'application, de faire communiquer les capteurs entre eux et de déporter au maximum les algorithmes centralisés dans les superviseurs, en visant ainsi une instrumentation à intelligence ambiante ou répartie.

Le passage de solutions filaires aux technologies sans-fil impose de nouvelles contraintes. L'analyse de ces contraintes (en termes d'énergie, de synchronisation, d'intégration) montre qu'aucune évidence technologique ne se fait jour, étant donné la variété des contextes d'instrumentation. L'application finale elle-même et les critères de mises en œuvre déterminent les choix de principes et de technologies. Quelle topologie, quelles distances à couvrir, quelle durée d'autonomie, quelles dimensions à respecter, quel environnement cible, etc. ne sont qu'un échantillon des nombreuses questions que le concepteur doit se poser afin de faire les choix adaptés. L'énergie étant la contrainte la plus forte, ce sujet fait l'objet d'études approfondies. La majorité des instrumentations visées étant *outdoor*, les solutions solaires seront particulièrement évaluées.

Ces constats amènent le LCPC, comme de nombreux acteurs du secteur (université de Berkeley, de Harvard, consortiums industriels) à envisager le développement de plates-formes génériques [25] intégrant le mieux-disant technologique qu'ils ont développé ou acquis afin de le rendre déclinable au mieux des besoins de chaque application. En effet, malgré la diversité des besoins et des solutions, les standards que sont les protocoles et les OS, ainsi que les fonctions traditionnellement utilisées dans l'instrumentation permettent des factorisations comme le prévoit la plate-forme sans fil générique du LCPC dont les déclinaisons seront orientées vers le génie civil (quand d'autres ont une orientation plus domotique ou télécom).

Les premières réalisations réussies, en particulier l'application CASC sans fil pour laquelle le LCPC envisage des transferts industriels en 2008, ont prouvé l'efficacité de ces technologies. D'autres développements en cours ou à venir devraient permettre d'asseoir encore ces technologies dans un monde promis à de grands bouleversements technologiques comme l'extension de ces technologies au domaine de la sécurité routière en général et de la voiture communicante en particulier. Le développement des réseaux universels de communications sans fil préexistants, assurés par des opérateurs tiers (UMTS, Wimax) devrait également simplifier la question de la présence ou de la création d'un réseau autour d'un ouvrage de génie civil.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1 LEWIS F.L., *Wireless Sensor Networks*, In : Cook D.J., Das S.K. (eds), *Smart Environments : Technologies, Protocols, and Applications*, University of Texas John Wiley, New York, **2004**.
- 2 PAEK J., CHINTALAPUDI K., GOVINDAN R., MASRI S., *A Wireless Sensor Network for Structural Health Monitoring : Performance and Experience*, *Second IEEE Workshop on Embedded Networked Sensors (EmNetS-II)*, Computer Science Department ; University of Southern California ; Los Angeles, Etats-Unis, mai **2005**.
- 3 COUSIN V., *Analyse économique du Système CASC*, Rapport interne commandé par le LCPC à la société Processus & Innovation, décembre **2005**.
- 4 CULLER D., ESTRIN, D. ; SRIVASTAVA, M., *Overview of Wireless Sensor Networks*, *IEEE Computer Society*, 37 (8), University of California, Berkeley, août **2004**, pp. 41-49.
- 5 WARNEKE B., PISTER, K.S.J., *MEMS for distributed wireless sensor networks*, *Proceedings of the 9th International Conference on Electronics, Circuits and Systems*, Dubrovnik, Croatie, 15-18 septembre **2002**.
- 6 SHIN YOUNG J., *Architecture of Smart, Distributed Sensor Systems*, University of California, Berkeley. 10 janvier **1996**.
- 7 LIU J., LI B., *Distributed Topology Control in Wireless Sensor Networks with Asymmetric Links*, *Proceedings of IEEE Globecom 2003 Wireless Communications Symposium*, San Francisco, Californie, Etats-Unis, 1-5 décembre **2003**, 3, pp. 1257-1262.
- 8 DUNKELS A., ALONSO J., *Making TCP-IP viable for Wireless Sensor Networks*, *Proceedings of the First European Workshop on Wireless Sensor Networks (EWSN 2004)*, Session Work-in-progress, Berlin, Allemagne, janvier **2004**.
- 9 GAST M.S., *802.11 Wireless Networks*, The definitive guide. O'Reilly edition, **2002**.
- 10 HASSANEIN H., LUO J., *Reliable Energy Aware Routing In Wireless Sensor Networks*, *Second IEEE Workshop Dependability and Security in Sensor Networks and Systems*, 24-28 avril **2006**, pp. 54-64.
- 11 ELSON J., ESTRIN D., *Time Synchronization for Wireless Sensor Networks*, *Proceedings of the 2001 International Parallel and Distributed*

- Processing Symposium (IPDPS), Workshop on Parallel and Distributed Computing Issues in Wireless and Mobile Computing*, San Francisco, Californie, Etats-Unis, avril **2001**.
- 12 **GANERIWAL S., KUMAR R., SRIVASTAVA M.B.**, Timing-sync Protocol for Sensor Networks, *Proceedings of the first international conference on Embedded networked sensor systems*, **2003**, pp. 138-149.
 - 13 **LE CAM V.**, Synchronization of wireless sensors : review of methodologies. Experience feedback of the very precise GPS solution, *Proceedings of European Workshop on Structural Health Monitoring*, Grenade, Espagne, **2006**, pp. 1339-1347.
 - 14 **VACHERAND F.**, Perspectives Technologiques en RFID, *FIEE et GIMELEC*, 3 avril **2007**, Paris.
 - 15 **COLERI ERGEN S.** ZigBee/IEEE 802.15.4 Summary, *University of Berkeley*, 10 septembre **2004**. <http://www.cs.wisc.edu/~suman/courses/838/papers/zigbee.pdf>
 - 16 **BREVET P., ROBERT J.-L., AUBAGNAC C.**, Surveillance acoustique des câbles de ponts, Application aux ponts en béton précontraint, *Instrumentation Mesure Métrologie*, 3. **2003**.
 - 17 **LE CAM V., BOURQUIN F., COTTINEAU L.-M.**, A wireless sensor network for damage detection and health monitoring of cables, *Proceedings of the third European Conference on Structural Control*, 12-15 juillet **2004**, Vienne, Autriche., section S6, pp. 112-115.
 - 18 **SORIN J.-L., DERKX F.**, Présentation du drone et des premières instrumentations, *Actes des Journées Ouvrages d'art*, Lyon France, 12-13 avril **2005**.
 - 19 **LEVIS, MADDEN, POLASTRE, SZEWCZYK, WHITEHOUSE, WOO, GAY, HILL, WELSH, BREWER, CULLER**, *TinyOs, an Operating System for Sensor Networks in Ambient Intelligence*, **2005**, pp. 115-148.
 - 20 **NAGAYAMA T., RUIZ-SANDOVAL M., SPENCER JR. B.F., MECHITOV K.A., AGHA G.**, Wireless Strain Sensor Development for Civil Infrastructure, *Newmark Structural Engineering Laboratory Report*, Series 001, **2007**.
 - 21 **BEUTEL J., THIELE L.**, Btnodes, a distributed environment for prototyping *ad hoc* networks, *Institut für Technische Informatik und Kommunikationsnetze (TIK)*. <http://www.btnode.ethz.ch>.
 - 22 **SCHILLER J., LIERS A., RITTER H., WINTER R., VOIGT T.**, ScatterWeb, Low Power Sensor Nodes and Energy Aware Routing, *Proceedings of the 38th annual Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS'2005)*, 3-6 janvier **2005**, pp. 286c-286c.
 - 23 **KLING R.M.**, Intel Mote : an Enhanced Sensor Network Node, *International Journal of Network Management*, 15 (4), juillet **2005**, pp. 255-267.
 - 24 **LI S.F., SUTTON R., RABAEY J.**, Low Power Operating System for Heterogeneous Wireless Communication Systems, *Compilers and operating systems for low power*, Kluwer Academic Publisher, **2003**.
 - 25 **SPENCER B.F., RUIZ-SANDOVAL M.E., KURATA N.**, Smart Sensing Technology : Opportunities and Challenges, *Journal of Structural Control and Health Monitoring*, **2004**.
 - 26 **MARCY H.O., AGRE J.R., CHIEN C., CLARE L.P., ROMANOV N., TWAROWSKI A.**, Wireless Sensor Networks for Area Monitoring and Integrated Vehicle Health Management Applications, *Proceedings of AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit*, Technical Papers, Portland, Oregon, Etats-Unis, **1999**, 1.

