



HAL
open science

L'acquisition de données sans fil dans le génie civil

Richard Palmer, George H Herlin

► **To cite this version:**

Richard Palmer, George H Herlin. L'acquisition de données sans fil dans le génie civil. 7ème Colloque Interdisciplinaire en Instrumentation, Jan 2016, Saint-Nazaire, France. hal-01280184

HAL Id: hal-01280184

<https://hal.science/hal-01280184>

Submitted on 29 Feb 2016

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.

L'acquisition de données sans fil dans le génie civil

G. H. Herlin

Palmer Consulting SàRL, HAEC SA

Abstract : Wireless data acquisition in civil-engineering

While wireless sensors are becoming common in many walks of life, civil engineering presents special challenges, both in the perception of new technologies in general and their costs, and also in the environmental conditions and extremely long life-time required.

This paper examines these challenges at a high level, concentrating particularly on those elements whose performance has improved significantly since the first attempts in the 1990s.

1. Introduction

Les avantages de l'adoption de nouvelles technologies de transmission de données en général ont été minimisés dans le domaine du génie civil. Les raisons principales, hormis la résistance explicite à l'inconnu, semblent être que :

- il y a une tendance générale à se concentrer sur le coût immédiat (de construction ou de réparation d'une structure) plutôt que sur le coût sur la durée de vie totale ;
- a contrario, le déplacement d'une fonctionnalité donnée d'une technologie vers une autre perçue comme moins « bien connue » est généralement sanctionné en amont de la décision finale.

En outre, les systèmes d'acquisition de données informatisés sont dans beaucoup de cas perçus comme des coûts sans bénéfice, imposés de façon réglementaire, plutôt que comme offrant des mesures utilisables dans la gestion de la maintenance et l'optimisation du coût de cette dernière. Cependant, cela va peut-être changer, grâce aux efforts consentis dans le développement et la promotion de systèmes de Building Information Modeling (BIM) en tant que mécanismes pour la rationalisation de la planification et l'exécution des activités de maintenance tout au long de la vie d'un ouvrage.

Il n'est pas question ici de la transmission de données sur de grandes distances géographiques, où le remplacement du modem et de la ligne téléphonique par des modems GSM est de plus en plus généralement acceptée. La technologie GSM est à la fois bien connue et inadaptée au support de capteurs individuels dans des systèmes plus locaux.

2. Obstacles à l'adoption

Les perceptions concernant la résistance à l'adoption de solutions sans-fil pour des applications de génie civil dans le présent se classent en 4 catégories principales, chacune d'entre elle engendrant ses propres éléments de coûts :

- Complexité du capteur (augmentation des coûts d'acquisition du système)

- Durée de vie opérationnelle du capteur (augmentation des coûts de l'entretien – changement de piles, quand c'est possible)
- Portée limitée (augmentation des coûts d'acquisition et d'installation)
- Stockage et conditionnement de l'énergie (augmentation du coût de l'entretien)

La lecture de rapports émis dans les années 2000 révèle que de multiples tentatives dans les années antérieures n'ont pas donné pleine satisfaction, souvent en raison de faiblesses dans la transmission de données sans-fil. Ceci est attribué en partie au simplisme du circuit des radios d'alors ainsi qu'à celui des protocoles de réseau utilisés.

Beaucoup de ces tentatives ont alors été faites en utilisant des circuits de mesure ad hoc, parce que les senseurs¹ très précis ont alors été jugés trop énergivores.

Le point le plus contraignant était le stockage de l'énergie nécessaire : les radios d'alors consommaient beaucoup. C'est un problème moindre aujourd'hui.

Ces considérations s'appliquent autant dans le génie civil que dans d'autres domaines. Mais le génie civil apporte souvent des contraintes plus strictes que les autres domaines (p. ex : distances plus grandes, durée de vie plus longue, fonctionnement à l'extérieur et dans des conditions de chantier), et aussi la culture de « l'économique par-dessus tout » y est très fortement ancrée.

3. La révolution mobile

La révolution mobile des 20 dernières années (combinée avec la révolution Internet commencée 10 ans plus tôt) a eu de profonds effets sur trois domaines fondamentaux pour les capteurs sans-fil. Ce sont :

- l'attitude générale d'alors : « la performance brute est primordiale, la puissance consommée n'est pas un problème » s'est transmutés en son contraire ;
- La transformation des « ordinateurs personnels » de « boîtes sous les bureaux » en nos tablettes et smartphones, minuscules mais musclés ; et
- la transformation de la connexion « dernier kilomètre » des réseaux câblés en réseau sans-fil.

L'effet sur l'industrie de l'électronique et des logiciels a été profond. Des sommes considérables ont été dépensées sur la réduction des besoins en énergie de tout ce qui va ou pourrait aller dans un smartphone. Les composants sans-fil ont été spécialement ciblés, bien que les plus grands avantages dans ce domaine sont venus de l'élaboration de protocoles radio qui gaspillent beaucoup moins d'énergie.

Comme on attend de plus en plus des smartphones qu'ils remplacent les consoles de jeux et autres divertissements nomades, ainsi que les appareils de navigation, on a conçu de nouveaux senseurs si petits (quelques mm³ à l'heure actuelle, à la baisse) et qui consomment si peu qu'ils peuvent être introduits dans ces dispositifs.

En contraste, la technologie des piles est restée presque inchangée. Des améliorations progressives ont été réalisées dans la densité de puissance (énergie stockée par unité de masse), mais les progrès dans ce domaine sont d'une lenteur décourageante ; s'est

¹ Pour mémoire, on distingue, dans ce document, le terme senseur (organe de mesure nu) du terme capteur (appareil complet) avec transmission de données

également améliorée de façon incrémentale l'efficacité des circuits de conditionnement de puissance (qui mettent la puissance de la pile à disposition des circuits sous une forme appropriée), et leur taille s'est réduite. Mais a plupart des progrès ont été accomplis des dernières années dans l'amélioration de la vitesse de charge – pour les rechargeables-, ainsi que la sécurité des piles et leur coût.

4. Introduction aux spécificités des capteurs sans-fil

Les divers organes d'un capteur sans-fil moderne sont généralement :

- A : le circuit applicatif, fournissant l'environnement électronique nécessaire au fonctionnement du senseur²
- H : un circuit d'hibernation³, permettant de conserver de l'énergie en coupant l'alimentation de certaines portions du capteur⁴,
- R : un circuit radio,
- C : un microprocesseur, fournissant le contrôle des autres organes électroniques, ainsi que des fonctions analogiques, notamment la numérisation des données.
- FA, FH, FR : le firmware applicatif, gérant l'électronique A, l'hibernation H et la radio R
- FS : le firmware sécurité

Fonctions principales nécessaires

Fonction	Organes	Notes
F1 : Traitement du signal du senseur (organe de mesure nu)	A, C+FA	*
F2 : Traitement des données (p.ex. numérisation)	C+FA	**
F3 : Sauvegarde locale des données application pendant l'hibernation	C+H+FH	
F4 : Maintien de la mesure du temps pendant hibernation (préparation de l'hibernation et traitement du réveil)	H+FH	
F5 : Réception des commandes externes, si nécessaire	R+FR+FS	
F6 : Transmission des données	R+FR+FS	
F7 : Gestion de la coupure des alimentations (en particulier la radio)	H+FH, R+FR	

Table 1: Fonctionnalité et répartition

Notes succinctes (pour plus de détails voir ci-dessous) :

* : Existent dans les capteurs industriels filaires (4-20mA, 0-10V, HART) sous une forme similaire ;

** : existent sous une autre forme dans les capteurs « intelligents » filaires (HART)

² Des portions significatives de ce circuit sont généralement intégrées au CPU, dont le choix est critique pour obtenir un capteur techniquement et économiquement efficace.

³ On enlève la tension d'alimentation entièrement des circuits lorsqu'ils en sont pas en usage.

⁴ notamment la radio ou le circuit applicatif, si leur courant « à l'arrêt » est trop élevé.

Comme on le voit, le nombre de fonctions à prendre en compte dans la conception d'un capteur sans-fil est nettement plus grande que dans le cas d'un capteur filaire classique. Toutefois, nombre d'entre elles sont indépendantes de l'application, et donc peuvent être de conception réutilisable ; une partie d'entre elles devrait même être normalisées avec avantage, notamment tout ce qui concerne la transmission radio⁵.

4.1. Hibernation(F3 et F4, F7)

Une longue durée de vie de capteur peut être obtenue intrinsèquement, avec des circuits ayant des modes opératoires de mise-en-veille à très-basse consommation ; mais quand ça n'est pas suffisant⁶, on peut obtenir de meilleurs résultats en coupant complètement l'alimentation d'autant de circuits que possible le plus longtemps possible, quand ils ne sont pas en usage – l'hibernation. Pour être efficace, un tel système exige une conception très minutieuse du matériel et du choix des composants.

Une attention particulière doit être donnée aux connexions entre les circuits en hibernation et ceux restant alimentés, pendant les transitions entre d'hibernation et éveil. Les données variables sont usuellement stockées dans les circuits en éveil, et des transitions aléatoires pourraient corrompre ces données, et causer des pannes.

4.2. Matériel d'application(F1 et F2)

Chaque senseur a besoin de circuits de conditionnement, servant à la fois de conversion électrique et de protection. La conception doit prendre en compte le senseur quand le capteur est en éveil mais aussi quand il est en hibernation.

4.3. Radio(F5 et F6)

Le choix de la technologie radio et de ses circuits de soutien est également critique.

Deux types de technologies existent, à large bande ou à bande étroite. Les premières sont caractérisées par des vitesses de transmissions élevées à relativement courte distance, et sont plus adaptées à la transmission de flux⁷. Les seconds ont des portées nettement plus longues (à puissance émise égale), mais des taux de transferts plus bas, et préférables pour les cas de faibles quantités de données⁸. Nous considérerons ici les seconds.

4.4. À propos des technologies de transmission radio

La portée obtenue est très dépendante de la fréquence porteuse de la radio utilisée : plus elle est élevée, moins la portée sera grande. Cet effet est particulièrement notable dans les

⁵ La transmission radio est sujette à des réglementations régionales (EU, UE et Japon principalement) assez draconiennes, et également à des règlements concernant les émissions de bruit électromagnétique EMI. Notamment, la puissance émise et le taux d'utilisation de la bande sont limitées, ainsi que le type d'usage (satellitaire, sécurité humaine,...) dans chaque bande, qui sont très nombreuses. Ces réglementations sont très variables, et il est judicieux dans la plupart des cas de concevoir la radio sous forme de modules certifiés.

⁶ Et pour une durée de vie en décennies, ça n'est jamais assez bas.

⁷ À titre d'exemples, WiFi et Bluetooth A2DB (audio), et évidemment GSM.

⁸ p.ex. LoRa.

cas hors ligne de mire (dans des immeubles ou zones urbaines). Les circonstances géographiques dicteront donc ces choix.

Les CI de radio modernes permettent une gamme de réglages (bande passante, type de codage, de redondance et de débits de symboles) qui permettent une grande liberté dans les arbitrages entre portée, géographie et consommation d'énergie. Toutefois, il convient de bien choisir préalablement également la bande⁹, qui n'est réglable par logiciel que dans certaines limites, et dont le choix affecte le circuit d'antenne.

Les circuits sans-fil consomment moins d'énergie lors de la réception que la transmission ; mais même en réception, leur consommation d'énergie est généralement nettement plus grande que la puissance consommée par l'application et le CPU. Il est donc important de choisir une topologie de réseau et un protocole radio qui minimisent non seulement la quantité de données transmises, mais aussi le temps passé en mode de réception.

4.5 Topologies et protocoles de réseau¹⁰

Deux topologies de réseau sont en usage courant dans les capteurs sans-fil : en étoile, ou en mailles. Les réseaux en mailles sont à la mode, grâce à leur robustesse intrinsèque contre les problèmes de communication, en particulier ceux dus à la variabilité de l'environnement et à des usages hors-portée. Mais comme ils doivent retransmettre les paquets de leurs voisins, ils sont nettement plus gourmands en énergie.

Pour des applications très basse-énergie, le meilleur choix est un (ou plusieurs) réseaux en étoile. Dans cette topologie, chaque capteur converse uniquement avec un concentrateur, qui sert de pont à tous les messages.

Pour des raisons similaires, un système anti-collision basé sur une division du temps en intervalles où un seul capteur peut transmettre (TDM), permet d'éviter les collisions, coûteuses en ré-transmissions.

Alarmes

La contrainte due à l'adressage fixe des intervalles de transmission peut être assouplie au besoin pour permettre une nouvelle classe de messages d'alarme nécessitant une « livraison immédiate » par introduction d'intervalles à transmission ouverts à tous les capteurs.. Cette pratique permet généralement des temps de latence beaucoup plus faibles pour certains types de messages rares.

Concentrateurs

Presque tous les réseaux en étoile nécessitent un concentrateur en réception permanente et en émission fréquente, au minimum pour les paquets de synchronisation pour la correction de l'heure des capteurs.

Horloge temps réel

⁹ Ici il s'agit du choix entre, par exemple, 169MHz, 464MHz, 868-915MHz, et 2.4GHz.

¹⁰ On entend par ce terme la façon dont les éléments communiquent entre-eux, c.-à-d. Qui envoie des messages à qui, ce qui est différent de l'usage dans le domaine des réseaux câblés.

L'horloge temps réel est un outil fondamental pour les protocoles très basse-consommation : s'il est possible de calculer le moment à laquelle on attend un message, ou à laquelle on peut transmettre sans risque de collision, on peut s'affranchir de temps d'attente variable en réception et minimiser le nombre des paquets à transmettre ou recevoir. En plus, il permet la collection autonome des données, dans les cas où la transmission immédiate n'est pas nécessaire.

Redondance

De multiples concentrateurs peuvent être installés, opérant sous-bandes différentes à l'intérieur de la même bande ou en division temporelle dans une même sous-bande. Le protocole doit permettre alors de changer de sous-bande ou d'allocation d'intervalle en cas de besoin.

4.6. Sécurité, authentification et cryptage

On entend souvent dire que l'encryptage n'est pas absolument nécessaire pour les réseaux de capteurs sans-fil. En effet c'est un coût, non seulement lors de la conception, mais aussi lors de la mise-en-œuvre et de la maintenance : il faut en effet utiliser les clés de cryptage sans les disséminer dans la nature ! De plus, dit-on des capteurs, ils ne sont pas (directement) connectés à Internet.

À notre avis, c'est une idée fautive, à plusieurs titres.

Authentification

D'abord, la nature même d'un réseau sans-fil est que n'importe qui peut à la fois espionner le flux, et émettre des paquets dans la bande utilisée par ce réseau. On peut donc, en l'absence d'authentification efficace, imiter les séquences de messages soit des capteurs vers l'amont, ou du système de commande vers l'aval. En l'absence d'authentification efficace, on pourrait donc substituer ou ajouter des données fausses aux flux, ou donner des commandes additionnelles aux capteurs.

Ces commandes pourraient aussi être de nature à causer des transmissions supplémentaires, et donc une diminution de la durée de vie du capteur¹¹.

Il est donc fortement recommandé d'implémenter au niveau du protocole radio au minimum une méthode efficace d'authentification des messages.

Cryptage des paquets

Un cas d'exemple où le cryptage serait efficace : on imagine sans difficulté le cas de malfaçons espionnant des capteurs de consommation d'eau ou d'électricité pour choisir le bon moment pour commettre leurs forfaits.

Les mises à jour par le réseau sans-fil sont un autre cas où l'encryptage est fortement recommandé.

¹¹ Cette diminution dépendra du protocole : si le réseau implémente un « ping » (ce qui est absolument à proscrire, évidemment) il serait éventuellement possible de vider les piles des capteurs en quelques jours, voire quelques heures.

4.7. Usage de la récupération de l'énergie ambiante

Un domaine associé dans lequel on voit naître un potentiel révolutionnaire est celui de la récupération de l'énergie ambiante. Plusieurs voies sont d'ores et déjà ouvertes : Les panneaux solaires, évidemment, mais aussi la thermo-électricité (par effet Seebeck), l'énergie vibratoire, et même la récupération de l'énergie électro-magnétique des ondes ambiantes.

Les 3 premiers nous promettent une puissance suffisante pour permettre leur usage en conjonction avec des capteurs sans-fil, le dernier étant trop peu puissant pour pouvoir contribuer beaucoup.

À noter que les batteries rechargeables ont aujourd'hui une durée de vie plutôt courte, de quelques années ou quelques centaines de charges, et donc qu'il vaut mieux considérer ces sources comme des appoints plutôt que comme source primaire.

5. Applications

Beaucoup de choses dans la conception d'un capteur sans-fil sont agnostiques par rapport à l'application elle-même. Toutefois, pas toutes les applications sont adaptées au sans-fil. En général, le capteur doit être économe en courant, doit pouvoir dans la plupart des cas être mis en veille ou même en hibernation, et les contraintes temporelles doivent permettre l'usage de protocoles radio du type envisagé plus haut.

6. Opportunités

Grâce à la vague de fond créée par l'usage de capteurs sans-fil dans d'autres domaines (le contrôle des machines, la surveillance des environnements et des flux), de notables progrès ont été faits dans la conception de capteurs sans-fil. Ces progrès peuvent être appliqués au profit d'applications dans le génie civil.

Un capteur sans-fil peut aujourd'hui être conçu pour satisfaire aux conditions, très strictes, du génie civil :

- être alimenté uniquement par pile¹²,
- avoir une durée de vie opérationnelle comptée en décennies,
- avoir assez de portée pour être intéressantes dans de nombreux cas.

À l'avenir (et en dehors d'évolutions favorables mais lentes des technologies existantes) la récupération de l'énergie ambiante devenant de plus en plus répandue, on tirera parti de diverses sources pour d'étendre la durée de vie des capteurs tant que la portée et les types de mesure envisageables.

¹² On peut aussi utiliser des systèmes de transmission sans-fil dans le contexte de la transmission des données de capteurs trop gourmands en énergie pour être alimentés par des piles. Dans ce cas, l'avantage n'est pas l'élimination du câblage, mais le remplacement de câbles spécialisés à l'installation complexe par des câbles de puissance traditionnels, bien plus simples et économiques à mettre en œuvre et à maintenir : des câbles 220V par exemple. De tels transmetteurs sans-fil peuvent eux-mêmes être alimentés de la même façon, et ne souffrent pas du même besoin de très basse consommation.

Les domaines d'application connus qui nous semblent offrir un potentiel immédiat sont :

- La surveillance de la stabilité, de la déformation et des mouvements des structures,
- La surveillance des caractéristiques des matériaux ou d'éléments de construction.

Et quand le câblage lui-même est problématique...

Le câblage constitue lui-même un problème dans certains cas, pour des raisons de fragilité, de longueur ou de nombre de câbles ou d'autres difficultés ou contre-indications à l'usage de câblage, par exemple : des raisons esthétiques, dans l'instrumentation de monuments historiques. Ce sont là les applications où le sans-fil apporte la plus grande valeur ajoutée.

Dans les autres cas, l'estimation des coûts peut souvent être fait sur une base rationnelle, mais mène dans le présent à des évaluations plutôt basses, sauf dans des cas très spécifiques de câblage très long ou très complexe. Ceci fait obstacle à un usage plus général des capteurs sans-fil dans des cas plus courants.

Point de vue économique succinct

Pour donner une idée des coûts, voici un petit extrait d'une analyse estimative réalisée autour d'un de nos projets de grande taille récents.

Pour le projet : 500 capteurs identiques, d'un genre très couramment utilisé, avec 80 m de câblage par capteur en moyenne dans des conditions marines très exposées. Coût estimé du câblage (câble + installation du câble) : 160'000 €, donc valeur par capteur à l'équilibre : 320 €. Pour mémoire, le capteur lui-même coûte entre 60 € et 100 € (additionnels) hors installation, elle-même estimée à environ le même montant.

Coût de conception du capteur : 60'000 €, coût de fabrication : 70'000 € (il y a des éléments mécaniques, l'électronique elle-même coûterait de l'ordre de 50'000 €).

Ce projet se situe dans un environnement très agressif et un système sans-fil est non seulement économiquement raisonnable à l'installation, mais réduira sans aucun doute le coût de la maintenance.

Et en trouvant des économies d'échelle, on peut entrevoir un coût de capteur nettement décroissant avec la généralisation de ces applications.

7. Défis

- Amoindrissement de la perception des risques associés aux capteurs sans-fil
- Développement de protocoles radio à consommation extrêmement basse¹³.
- Usage de sources d'énergie environnementales

¹³ et satisfaisant aux Normes, évidemment. Il serait très utile que ces protocoles soient « ouverts », à la fois pour garantir l'interopérabilité des divers matériels, et la pérennité des installations les utilisant.