



**HAL**  
open science

## Réalisation de capteurs sans-fils dans le cadre de la surveillance acoustique des câbles

Vincent Le Cam

► **To cite this version:**

Vincent Le Cam. Réalisation de capteurs sans-fils dans le cadre de la surveillance acoustique des câbles. Journées des Sciences de l'Ingénieur 2003, Réseau Scientifique et Technique, Dec 2003, Dourdan, France. pp.691917967. hal-04461806

**HAL Id: hal-04461806**

**<https://hal.science/hal-04461806>**

Submitted on 16 Feb 2024

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

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

Public Domain

# RÉALISATION DE CAPTEURS SANS-FILS DANS LE CADRE DE LA SURVEILLANCE ACOUSTIQUE DES CÂBLES

Vincent LE CAM

LCPC, Service Métrologie et Instrumentation, Section Recherche et Moyens d'Essais

## Résumé

Le développement de nouvelles méthodes et d'appareillage, à base « d'intelligence », permettant la surveillance des ouvrages du génie civil, notamment des ponts à câbles, répond à une demande forte des utilisateurs. Le but est de présenter ici les grandes évolutions données au projet de « capteur CASC » (Contrôle Acoustique pour la Surveillance des Câbles). Les évolutions principales sont la mise en œuvre d'un réseau de capteur sans-fils et l'utilisation d'un DSP (Digital Signal Processing) comme cœur de capteur pour mieux exploiter la richesse des signaux et rendre le système évolutif.

## 1 Introduction : Contexte et origine du projet

### 1.1 Objectif global - principe

Le LCPC développe de nouvelles méthodes et des instruments permettant la surveillance des ouvrages du génie civil et notamment les ponts à câbles. En outre, la surveillance des ruptures dans les câbles est un enjeu de taille pour le LCPC. Ces ruptures concernent aussi bien les câbles de pré-contraintes internes, externes que celles dans les haubans ou les câbles des ponts suspendus

Pour assurer cette surveillance une première génération de système de détection a déjà été mise au point par le LCPC. Ce système est appelé CASC : Contrôle Acoustique de Surveillance des Câbles.

Comme son nom l'indique, la surveillance des câbles s'effectue par un contrôle acoustique. Les câbles des ponts suspendus sont en général mono torons multicouches (fils de 4 à 5 mm) ou des ensembles de câbles mono torons multicouches placés parallèlement sous forme de nappe ou de faisceau.

Cette configuration implique que lorsqu'un fil se rompt, ses deux extrémités se ré-ancrent de part et d'autre du point de rupture à une distance donnée. Au moment de la rupture il y a génération d'une onde de part et d'autre. La détection de cette onde par différents capteurs permet de localiser la rupture et son importance. La détection d'une (ou plusieurs) rupture ainsi que sa localisation sont des informations stratégiques pour le gestionnaire de l'ouvrage. Le nombre et les lieux des ruptures contribuent à connaître l'état de santé de l'ouvrage.

### 1.2 Origine – première version

Une première version du système a déjà été développée et mise en place sur plusieurs ouvrages d'art français. Cette génération consiste en une série de capteurs fixés le long du câble et reliés les uns aux autres par une liaison série (de type RS485) jusqu'à un armoire dite « superviseur ».

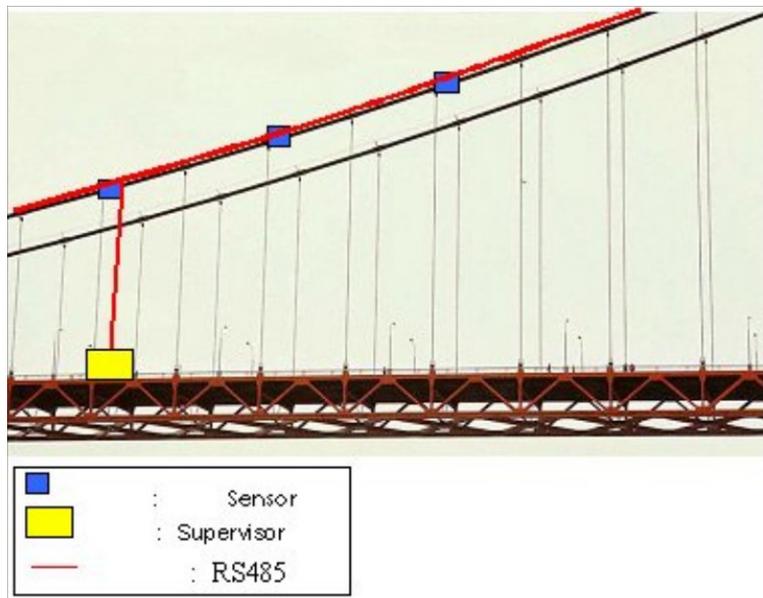


Figure 1 : Exemple de la première version installée sur un ouvrage

**Principe de fonctionnement :**

Chaque capteur utilise un accéléromètre qui, par l'effet piézo-électrique, produit des charges électriques à partir de « l'onde mécanique de rupture ». Un seuil de détection adaptable est fixé depuis le superviseur.

Lors du dépassement du seuil, le capteur le plus proche (celui qui reçoit l'onde en premier) initialise un compteur temporel à zéro et envoie un signal (échelon de tension) au superviseur et aux autres capteurs. Chaque capteurs recevant cet échelon démarre un compteur temporel et relève :

- L'amplitude crête, c'est à dire l'amplitude maximale du signal sur la première demi-alternance qui suit le dépassement de seuil,
- L'amplitude maximale sur une durée prédéfinie (dans le système actuel : 3 ms), après le dépassement de seuil, qui renseigne sur l'énergie libérée pendant la rupture.

A partir de ces données et par le calcul ci-dessous le logiciel fonctionnant sur le superviseur détermine l'endroit de rupture « X » :

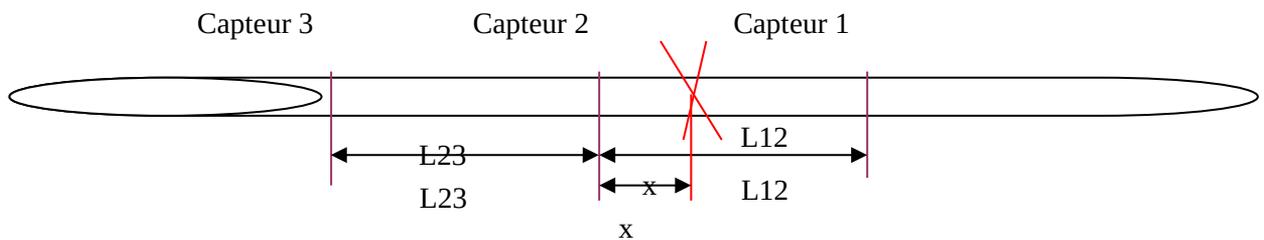


Figure 2 : Principe de localisation d'une rupture à partir de 3 capteurs

Le but est de déterminer « X » qui correspond à la distance entre le premier capteur ayant reçu l'onde et le point de rupture :

$$x = \frac{1}{2} * (L12 - v * \Delta t12) \tag{1}$$

$$v = L23 / \Delta t23 \tag{2}$$

L'ordre de grandeur de la vitesse de transmission de l'onde dans le câble est de 5000 m/s. La précision de la mesure dépendant surtout de l'évaluation des  $\Delta t$ . Les précisions constatées, sur la mesure de « X », sont de l'ordre de +/-15cm pour une longueur de 10 m entre chaque capteur.

### **1.3 Résultats**

Ce système a été conçu, industrialisé et équipe plusieurs ouvrages d'art. Les résultats, du point de vue des mesures et de la localisation sont concluants : lorsque le système détecte de nombreuses ruptures, on constate lors du démontage du câble et/ou des colliers l'endommagement du câble.

## **2 Objectifs pour une nouvelle génération de capteurs « CASC »**

### **2.1 Inconvénients de la première génération**

La première génération est opérationnelle et performante mais présente toutefois des inconvénients :

- Les capteurs fixés le long du câble sont reliés par des fils transmettant l'énergie électrique et permettant l'échange de données entre les capteurs et le superviseur. Les opérations de montage et démontage de ce système sont ainsi longues et très coûteuses. Le système est difficilement mobile pour surveiller un câble puis l'autre etc.
- L'information sur le signal détecté n'est pas assez riche : le capteur ne détecte qu'un dépassement de seuil pour mesurer ensuite des amplitudes maximum. Le système est sensible aux bruits et aux chocs parasites. Il y a un besoin de plus d'informations sur les signaux mesurés,
- La communication entre les capteurs et le superviseur est spécifique et bas débit (liaison série). Le système manque d'évolutivité si on désire véhiculer d'autres données et plus rapidement,
- Le capteur lui-même ne découpe pas vraiment la partie « traitement du signal » de la partie « communication » et ne s'adapte pas facilement à une autre nature d'instrumentation.

### **2.2 Objectifs pour une nouvelle génération**

Il a donc été décidé de faire évoluer le système avec les contraintes suivantes :

- Les Capteurs sont sans fil et conservent la possibilité d'une liaison filaire (dans les ouvrages les ondes radio se propagent difficilement et le passage d'un fil pose moins de problème),
- Les Capteurs enregistrent la forme complète du signal (plus seulement des relevés d'amplitude maximum) et permettent d'effectuer des traitements de type filtrage fréquentiel, FFT,... pour fournir plus d'informations à l'utilisateur,
- Le Superviseur supporte un logiciel évolué qui restitue de façon graphique les signaux et les analyses sur ces signaux,
- Le moyen de communication capteur/superviseur est plus rapide, protocolaire et évolutif pour faire passer facilement de nouvelles données et à un plus fort débit,
- Les Capteurs sont conçus de façon à isoler la partie traitement de la partie télé-communication.

## **3 Solution retenue**

Pour envisager une solution, le système est découpé de la façon suivante :

Tableau I. Découpe de la solution retenue pour le système CASC

<b>Superviseur</b>	un PC avec un logiciel de supervision développé en Visual C++ et supportant un « Access point » distribuer un réseau sans-fil
<b>Communication</b>	basée sur le protocole TCP/IP : <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ethernet pour la liaison filaire,</li> <li>• WIFI avec la norme 802.11b pour la liaison sans fil</li> </ul>
<b>Capteurs</b>	possédant chacun : <ul style="list-style-type: none"> <li>• un étage DSP (ADSP2991) pour l'acquisition et le traitement des signaux,</li> <li>• un module intégré WIFI pour la communication (module wireless Ubicom IP2022)</li> </ul>

Le capteur est, en fait, un petit ordinateur dont le cœur logique est le DSP programmé pour recevoir et traiter les signaux relevés (échantillonnage à 250KHz). La partie communication du capteur est assurée par la pile TCP/IP contenue dans le module IP2022. Les deux modules sont indépendants et dialoguent aux travers de zones mémoires communes et par interruption.

Le système « Superviseur – Capteurs » est un « Wireless Local Area Network ».

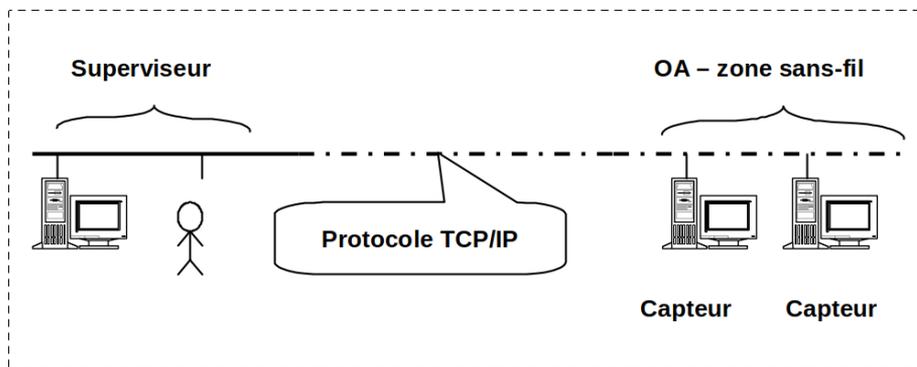


Figure 3 : Architecture du réseau de capteurs sans fils

## 4 Problématiques et solutions : Distribution d'une synchronisation temporelle à faible coût

### 4.1 La synchronisation temporelle des capteurs

**Problématique** : Un évènement détecté par les capteurs est une onde dépassant une valeur de seuil. Les capteurs numérisent en permanence la forme du signal et, à partir de l'instant de détection, datent et enregistrent les échantillons. La précision sur la localisation de la rupture dépend de la précision des instants de détection, les capteurs doivent donc dater les mêmes évènements avec la même base de temps.

Les ondes se déplacent à des vitesses d'environ 5000 m/s et la précision souhaitée est à +/- 15cm. Pour respecter cette précision, la datation d'un même évènement par 2 capteurs « i » et « j » du réseau ne doit pas dériver de plus 6µs de l'un à l'autre.

Or les capteurs sont constitués de modules électroniques utilisant des quartz dont la dérive est importante. Typiquement, un quartz dérivant à 50ppm fournit une horloge pouvant dériver de 5000µs en 1s. En pratique elle est moindre mais elle demeure suffisamment importante pour nécessiter la distribution d'une heure de référence.

## 4.2 Solutions étudiées

Trois solutions ont été étudiées :

1 – Chaque capteur est équipé d'un module permettant de « récupérer » l'heure absolue ; par exemple en captant l'heure GPS. Le problème est que si la précision est garantie, le coût de chaque capteur est élevé. De plus la réception GPS n'est garanti tout autour d'un ouvrage. La solution 1 n'est donc pas retenue.

2 – Le superviseur récupère l'heure absolue (avec un module GPS par exemple) et la distribue au réseau de capteurs. Ainsi, à chaque réception de l'heure, chaque capteur peut « re-dater » les évènements relevés par rapport à la dernière référence reçue du superviseur.

3 – Utilisation sur le réseau d'un protocole faible coût dédié à la synchronisation temporelle et compatible avec le protocole TCP/IP.

### Solution n°2 : recalcul ratio-métrique des évènements

En raison de la dérive des quartz à cause de la température, de l'âge,... la solution 2 fonctionne mais pour des précisions de l'ordre de  $10^{-5}$  seconde, or la précision souhaitée est inférieure à  $6 * 10^{-6}$  seconde. L'idée développée est la suivante :

Le superviseur est le chef d'orchestre du réseau de capteurs et émet régulièrement une trame de synchronisation « Sync » à tous les capteurs. A sa réception, chaque capteur sauve et remet à zéro son compteur de temps «  $T_i$  », «  $T_j$  »... et renvoie au superviseur :

- o Les échantillons de l'évènement mémorisés et (mal) datés ( $T_{ev i}$ ,  $T_{ev j}$ ...),
- o la valeur de compteur sauvé ( $T_i$ ,  $T_j$ ,...).

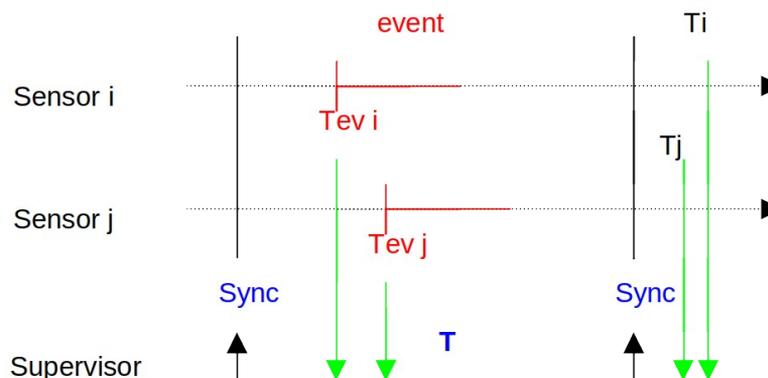


Figure 4 : Principe de resynchronisation temporelle des capteurs

Ainsi le superviseur a une vue globale des évènements mémorisés et de la dérive pour chaque capteur. Il peut redater et comparer les évènements les uns par rapport aux autres de façon ratio-métrique. Pour chaque capteur, le superviseur peut calculer le temps réel auquel l'évènement a été reçu durant la période  $T$ .

$$\text{Temps recalculé : } T_{ev i}' = T_{ev i} * T / T_i \quad (3)$$

Par ailleurs, pour respecter la précision, la trame de synchronisation doit être impérativement transmise et prise en compte pour chaque capteur avec un écart de  $6\mu s$  maximum entre chaque

capteur. Le message est envoyé sur le réseau WIFI en utilisant le mode broadcast offert par le protocole UDP/UP.

Le temps de transmission de la trame de synchronisation est la somme de 2 temps :

- o Le temps de transmission radio-électrique d'un message soit :  $180.10^6$  m/s. Ce temps ne pose pas problème parcequ'il est sensiblement le même pour chaque capteur (en l'absence de routeurs et de commutation, un LAN devient déterministe). Ceci autorise, pour  $6\mu s$ , un écart de 1080m entre 2 capteurs indépendamment du superviseur. Cette distance correspond, dans beaucoup de cas, au contexte ouvrage d'art.
- o Le temps de prise en compte du message. Il est non nul mais sensiblement le même pour tout les capteurs. Les capteurs sont identiques et dans le même état du point de vue de la télécommunication puisque le traitement est découplé de la communication par l'utilisation respective d'un module DSP et d'un module Wireless. De plus, il n'y a pas d'OS embarqué (Windows CE par exemple). La programmation de la prise en compte au niveau du capteur est déterministe.

Le principe décrit ci-dessus permet non seulement d'obtenir des précisions de l'ordre de quelques  $\mu s$  mais même au delà dans la mesure où sur de courte durée de resynchronisation (période T) la dérive d'un capteur à l'autre est faible (quelques dizaines de  $\mu s$ ). Cette solution est une solution précise et faible coût.

### Solution n°3 : Utilisation d'un protocole

La troisième solution envisagée est l'utilisation d'un protocole « clé en main » assurant la synchronisation temporelle sur un réseau TCP/IP tel que le NTP V3 (Network Time Protocol). Elle n'a pas encore été totalement mise en œuvre mais des précisions de l'ordre de la micro seconde voire la pico seconde peuvent être atteintes si les éléments du réseau et le réseau lui-même sont conçus de façon déterministe ce qui est notre cas.

## 4.3 Résultats

Tableau II. Tableau comparatif des solutions étudiées

	<b>Solution 2</b> : calcul ratio-métrique	<b>Solution 3</b> : NTP
<b>Précision</b>	Correcte. Difficile de faire plus	Correcte et évolutive (Ipv6, NTP V4...)
<b>Consommation des capteurs</b>	Contrôlée par la période de synchronisation	Non contrôlée et plus élevée. Dépend du protocole utilisé
<b>Heure des capteurs</b>	Relative à celle du superviseur sans GPS. Absolue si GPS	Absolument celle du superviseur
<b>Mise en œuvre</b>	Nécessite du développement mais le principe est valable pour tout système	Clé en main mais valable dans le domaine de l'IP seulement.

## 5 Conclusion

Le sujet présenté dans le document présente une application concrète contribuant à fournir un nouveau moyen de suivi de la dégradation des câbles d'un ouvrage par de la surveillance acoustique.

Les travaux à poursuivre sont l'intégration et l'optimisation de la consommation des capteurs.

La solution est novatrice car elle offre un système de capteurs sans fils ce qui le rend non seulement moins onéreux et plus facile à mettre en œuvre mais aussi plus mobile. De plus, l'utilisation d'un étage DSP pour le traitement de signal découpé de la partie communication rend le capteur évolutif pour

d'autres natures d'instrumentation où les précisions temporelles sont fortes (mesure sismiques ou vibratoires par exemple).