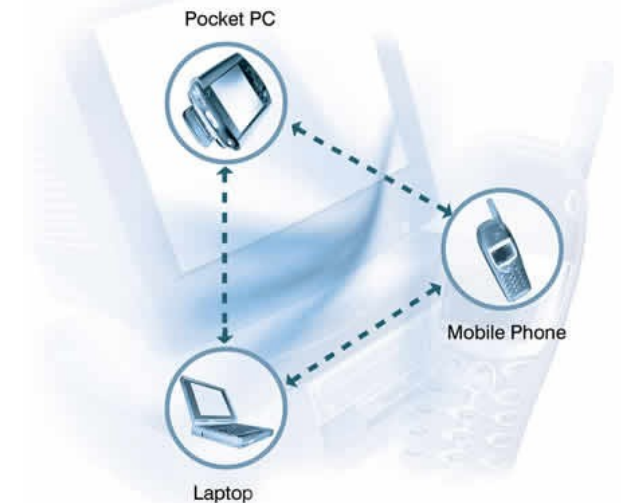


Sommaire :

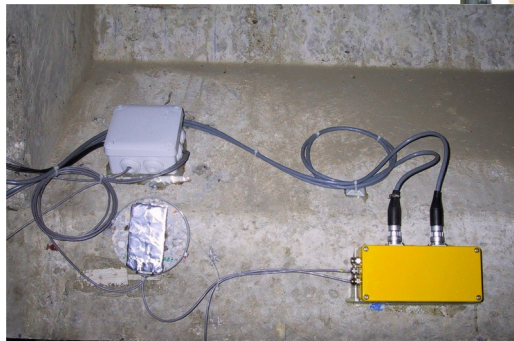
1. Contexte et origine des travaux
2. Nouveaux horizons ouverts par la technologie
3. Les réseaux de capteurs sans-fil
 1. Protocoles
 2. Topologies
 3. Energie
 4. Synchronisation
4. Une Plate-forme développée
Le système CASC
5. Conclusion et Roadmap pour un développement d'une PF générique au RST



1 - Contexte et Origine des Travaux

Le Service Métrologie & Instrumentation mène des travaux de recherche & développement, des essais et des projets dans le cadre du contrôle de santé des structures (Structural Health Monitoring). Paramètres mesurés et exploités : pression, vibration, température,...

Suivi des
déformations du
viaduc de
Roberval



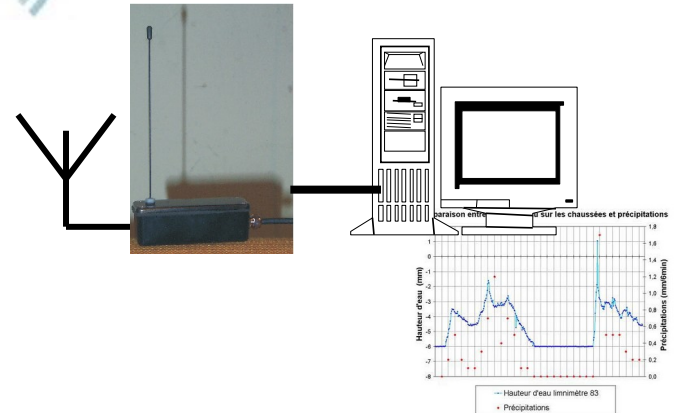
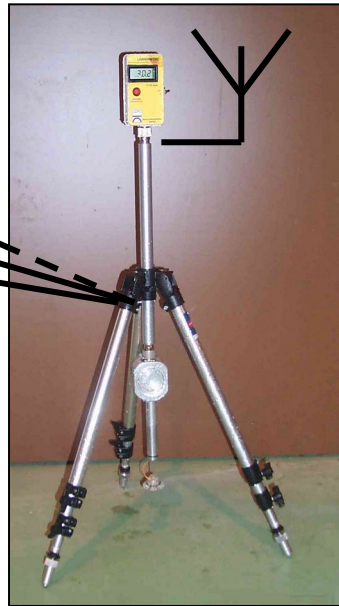
Mesure des rotations
d'ancrage des
haubans du pont de St
Nazaire



1 - Contexte et Origine des Travaux

Le sans-fil **un concept nouveau ?** Non...mais une R&D très propriétaire...

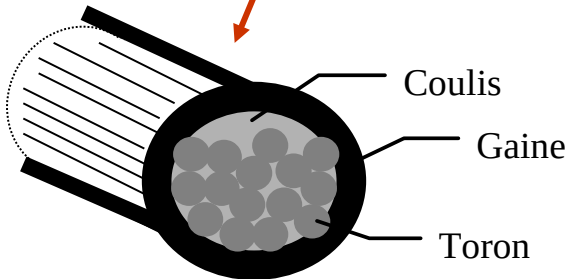
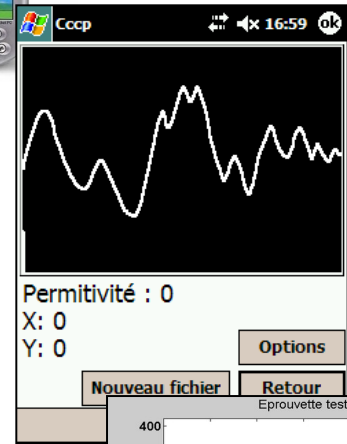
Mesure de la hauteur d'eau sur les chaussées : projet **LIMNIMETRE**



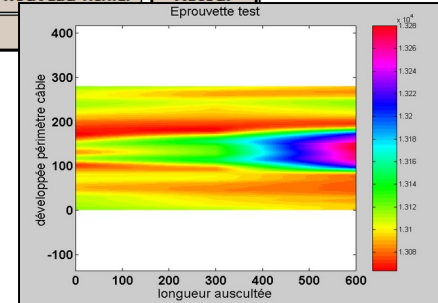
1 - Contexte et Origine des Travaux

Le sans-fil **un concept nouveau ?** Non...mais une R&D très propriétaire...

Détection d'hétérogénéité dans les gaines de pré-contraintes : projet **CAPTEUR CAPACITIF**



Vision 3D et Temps-réel de l'état du câble sur un Pocket-PC



2 Nouveaux horizons ouverts par la technologie

Quelle nouveauté ?

L'extension du « Sans-Fil » à d'autres domaines !

- Tendence mondiale au sans-fil (W.S.N) : recherche de souplesse, de mobilité et nomadisme. Coût et vulnérabilité des fils...
- Tout champ d'application : télécom, génie civil, industrie, sécurité routière, aéronautique, etc
- Grâce à des technologies validées :
Protocoles standards, autonomie des batteries & récupération d'énergie, μ et nano composants,...
- Autres mots clés : réseaux (de capteurs), intelligence embarquée et distribuée (smart sensors) synchronisation, scalabilité, instrumentation massive, hétérogénéité,...



2 Nouveaux horizons ouverts par la technologie

Rencontre d'un essor techno et d'un besoin :



A) Fort essor technologique :

Microélectronique (faible conso., RFID, nano et μ intégration) **Standardisation** (protocoles de comm'; env. de conception; OS embarqué μ Linux , TinyOS)
Moyens de Télécommunications (WiFi, Bluetooth, Zigbee, ISM, Motes...)



B) Besoins grandissants :

Contrôler les structures, connaître et **comprendre** les phénomènes, prévenir les anomalies : sécurité , coût, maintenance, mobilité. **Fiabilité** des infos

Structures de + en + nombreuses, à géométrie complexe, grandes (i.e. bcp de Capteurs)



Sociétal : difficulté à accepter la panne (Laval, E2 à Roissy)
trafic tendu, ouvrages de +en+ stratégique

2 Nouveaux horizons ouverts par la technologie

Des chiffres :



« Dans le viaduc de Saint Cloud nous avons posé 64 km de câbles. C'est la première ligne de coût »



« Pour l'instrumentation en système CASC, le câblage est l'élément le + vulnérable (maillage en série, usure...) et l'un des plus couteux.»

Ancenis = 129 kE de fourniture et pose
dont 18,2 kE de câbles. 14%

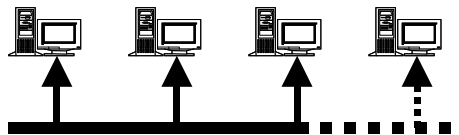
Aquitaine = 297,9 kE de fourniture et pose
dont 48,8 kE de câbles. 16%



3 - Les réseaux de capteurs sans-fil

Passez du monde “avec” au monde “sans” fils ne consiste pas seulement à remplacer les fils du Capteur par un module radio et à le connecter à une batterie.

filaire



sans fil



Sans fils (wireless), de nouvelles contraintes sont posées au développeur d'instrumentation :

- **L'énergie** : optimiser la consommation, récupérer l'énergie. Quelle portée...
- **Synchroniser** ou « Comment doter des entités sans lien physique d'une base de temps commune (et précise) ? »
- Quel **mode de communication radio** ? Robustesse (CEM, RF), protocole, fiabilité, débit, latence
- **Intelligence** ou « de quel capacité de travail ou de réaction le capteur est-il capable ? ». Le Capteur possède t il un OS, est il télé-reprogrammable ? ...
- Intégration physique : petite **dimension** voire capteur « noyé »
- Capteur pervasif (auto-id), mobilité & scalabilité. Réseau à grand nombre de capteur

Aucune « évidence technologique » => Approche Multi-critères

3 - Les réseaux de capteurs sans-fil

3.1 Les Protocoles de communication inter-Capteurs

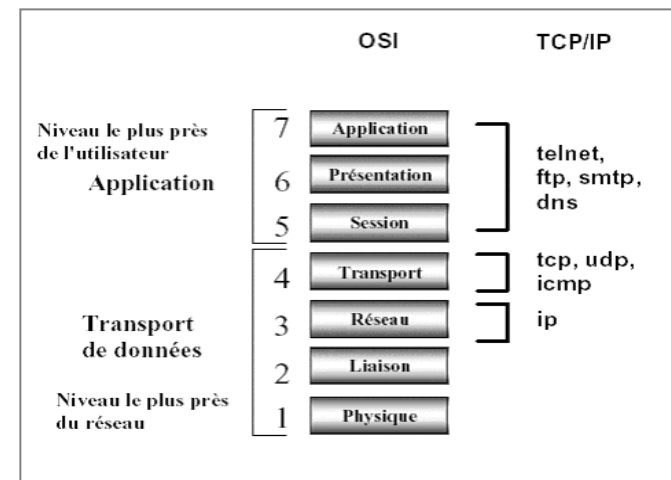
Un protocole assure que tout octet émis d'un point A du réseau à un point B y parvient dans les temps et sans perte. Sinon (coupure réseau, masquage), il « indique » à l'application qui l'utilise que le transfert a échoué.

Le programme assigné au Capteur peut réagir à cet d'évènement.

Un protocole est un ensemble de couches matérielles et logicielles INDEPENDANTES qui assurent la transmission des données.

Le modèle OSI est mondialement appliqué :

Le + connu = Internet Protocole ou TCP/IP



Exemple : pile TCP/IP complète intégrée en un module.

3 - Les réseaux de capteurs sans-fil

3.1 Les Protocoles de communication inter-Capteurs

Nombreuses façons de communiquer en wireless mais **un protocole** =

- Echanges inter-capteurs : standards, simples, reproductibles, sans perte,
- Gd nb de capteurs, sécurité (intrusion)
- Faible coût. Instrumentation pérenne

Le LCPC a **qualifié** les protocoles wireless standards et reconnus (IEEE) sur ses plates formes :

- Le **WIFI** = solution physique sans fil pour l'Internet Protocole (Ex.: Freebox)
- Le BlueTooth = petite portée et 7 clients max. Orienté bureautique et domotique
- Le **Zigbee** = protocole dédié aux réseaux de capteurs sans-fil et à la domotique. Qualité intermédiaire sur de nombreux aspects (portée, conso, débit)
- Wimax, GPRS, Wibro... : inadaptés au capteurs sans-fil (consommation)



3 - Les réseaux de capteurs sans-fil

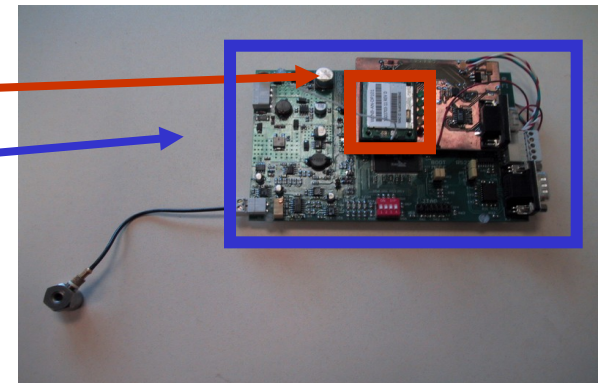
3.1 Protocoles et topologies de réseaux de Capteurs



Développement d'une sorte de « banc de test » permettant d'intégrer divers modules de communication radio.

Tests, mesures comparées, qualification en conditions ~réelles,...

Un module TcpIp-Wifi rendant un Capteur LCPC wireless.



3 - Les réseaux de capteurs sans-fil

3.1 Protocoles et topologies de réseaux de Capteurs

Deux protocoles émergent comme solutions efficaces:

Le **Wifi** et le **Zigbee**

La qualification du protocole de communication lui-même amène à une découpe multicritères...

Protocole	Norme IEEE	Puissance (en rx/tx)	Portée	Nb de capteurs	Débit	Multihop
Zigbee	802.15.4	10mW	30m	Milliers	250 kB/s	Oui
Wifi	802.11xxx	100mW	200m	Centaines	11 MB/s	Non

3 - Les réseaux de capteurs sans-fil

3.2 Topologies de réseaux de Capteurs

Biblio et qualification des diverses Topologies de réseaux de Capteurs.

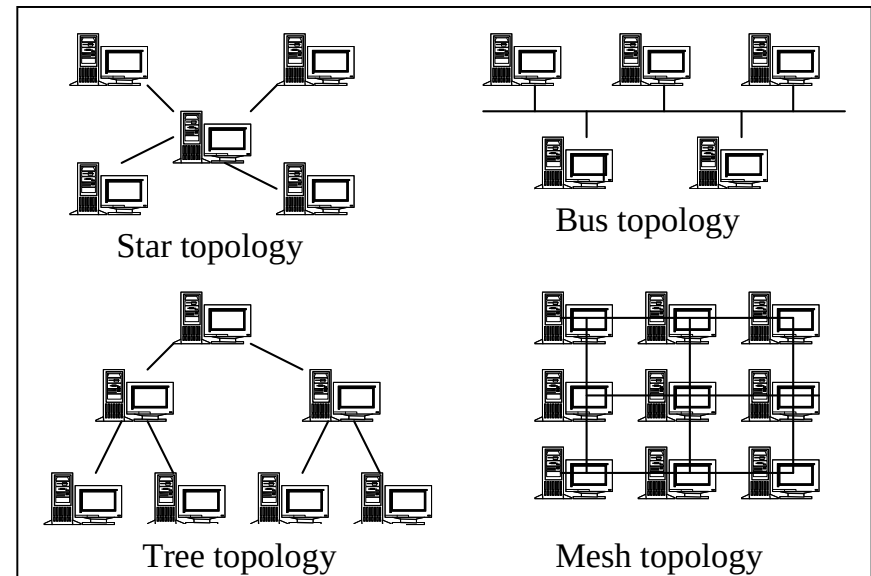
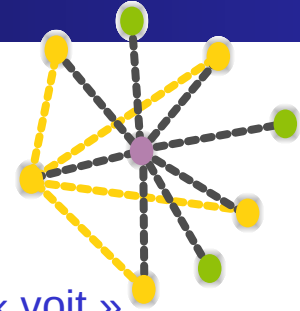
La **topologie** = façon dont se structure le réseau càd façon dont chaque capteur « voit » les autres capteurs.

Les protocoles standards permettent d'envisager la plupart des topologies

Remarque : *Tree* et *Mesh* rendent le réseau dépendant de capteurs intermédiaires alors qu'en *Bus* et *Star* tout le monde « voit » tout le monde

In fine, c'est l'instrumentation décidée sur le terrain (ou l'ouvrage) qui détermine la topologie à déployer.

La + courante : « en étoile » ou « star ».



3 - Les réseaux de capteurs sans-fil

3.3 Réseaux de Capteurs et...énergie

Trois « postulats » sur l'énergie :

« Plus un capteur sans fil communique, plus il consomme » donc si on communique en permanence...

« Moins on consomme (module radio sobre) et moins on porte (en distance)»

« Le mieux est (d'essayer) de faire communiquer les capteurs le moins possible »

=> Les rendre + intelligents :

- Capacité de traitement locale au capteur,
- Capacité de stockage

=> Récupérer de l'énergie

=> En dépenser le moins possible



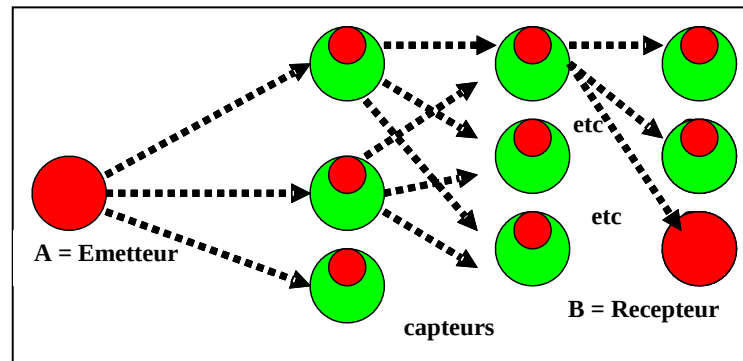
3 - Les réseaux de capteurs sans-fil

3.3 Réseaux de Capteurs et...énergie

Mise en évidence d'une contrainte : le lien « topologie – énergie »

Le multihop (natif pour le Zigbee) = transitivité de la communication entre les nœuds.

Une donnée émise de « A » au capteur « B » utilise les chemins possibles via des capteurs intermédiaires et cela de façon transparente.



Problème : il faut donc -qu'à tout moment- au moins un chemin existe entre tt couple communiquant A & B. Or communiquer = consommer de l'énergie.

Conclusion : le capteur sans-fil à développer doit tenir compte d'un équilibre entre protocole, topologie et consommation.

4 – Plate Forme développée : CASC sans-fil

3.4 Réseaux de Capteurs sans fil et synchronisation

Mise en évidence d'une contrainte :

Besoin d'une synchronisation temporelle très forte entre les capteurs sans-fil en propagation d'ondes dans les câbles en acier.

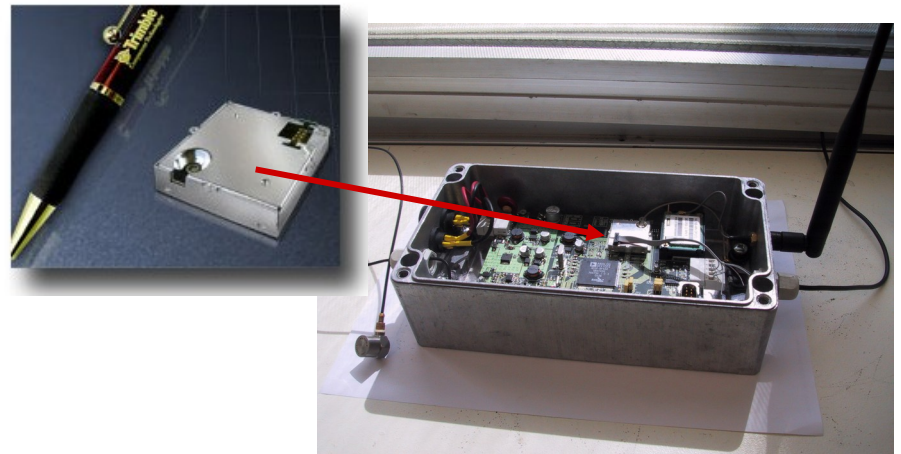
⇒ **Vitesse des ondes de compression dans les câbles tendus ~ 5000 m/s**

⇒ **Localisation des ruptures souhaitée à ± 15 cm**

Contrainte : la différence de base de temps entre 2 capteurs < 30 μ Seconds !

Solution : Un mécanisme LCPC basé sur le signal PPS fourni par un micro-récepteur GPS intégré au Capteur.

Résultat : moins de 5 μ Sec entre 2 capteurs...qui ne se connaissent pas !



4 – Plate Forme développée : CASC sans-fil

3.4 Réseaux de Capteurs sans fil et synchronisation

Etudes des méthodes de synchronisation temporelle des WSN :

⇒ Des synchronisations distribuées et selon un protocole :

- ⇒ Network Time Protocol NTP,
- ⇒ Reference-Broadcast Synchronization RBS
- ⇒ Timing-sync Protocol for Sensor Networks TPSN
- ⇒ Time-Diffusion Protocol TDP

Des synchronisations a posteriori (superviseur) :

- ⇒ Post-facto” Synchronization,
- ⇒ Ratio-metric Synchronization,

Des synchronisations absolues :

- ⇒ Intégration GPS,
- ⇒ Propriétaires...

4 – Plate Forme développée : CASC sans-fil

PRESENTATION D'UNE PLATE FORME METTANT EN ŒUVRE LES RESEAUX DE CAPTEURS SANS FIL : **LE SYSTÈME CASC**

Un projet de 3 ans de R&D où le système a été **entièrement repensé**.

Mené du CDC à la conception par 2 divisions du LCPC : **SMI** ⇔ **MACOA**. Cibles :

- **Communauté Scientifique** (d'abord),
- **Gestionnaire d'ouvrage** (à présent).

Roadmap :

- 2006 : validation tests, industrialisation, ...

- 2005 : validation et tests in-situ

- 2004 : premier prototype,

- 2002 – 2003 : CDC et spécifications.

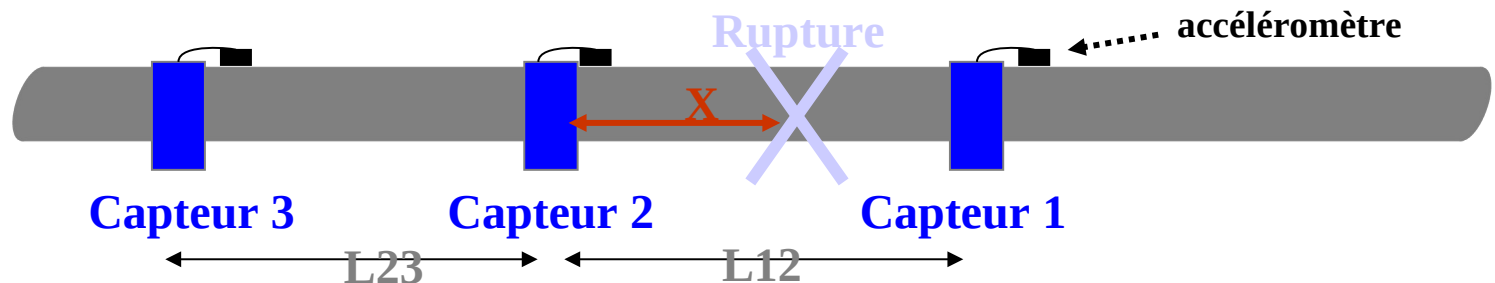
4 – Plate Forme développée : CASC sans-fil

Objectif : **DETECTER ET LOCALISER LES RUPTURES DE FILS**

Principe : Une « distribution » de capteurs fixés le long du câble détectent le passage de l'onde générée par la rupture d'un fil. (chaque capteur est doté d'1 accéléromètre).

Chaque capteur effectuant une détection (date et amplitude de l'onde) la transmet à un Superviseur à proximité de l'ouvrage.

Le Superviseur calcule alors la vitesse de l'onde et, connaissant la position relative des capteurs, évalue le lieu X de la rupture.



$$x = \frac{1}{2} * (L_{12} - v * \Delta t_{12}) \text{ avec } v = L_{23} / \Delta t_{23}.$$

Vitesse $V \sim 5000$ m/s

4 – Plate Forme développée : CASC sans-fil

Première génération : Un système efficace industrialisé et installé sur plusieurs câbles de ponts en France (Aquitaine, Tancarville, Iseron, Foix, Merlebach, Ancenis,...).

QUASAR
CONCEPT



Contrôle en temps réel
de la sécurité
des ponts suspendus



Tancarville



Iseron

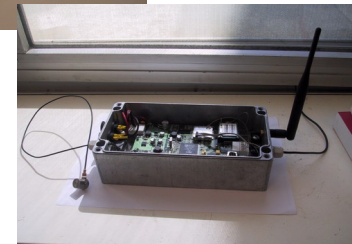
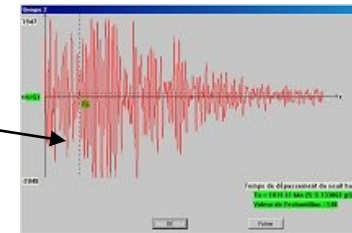
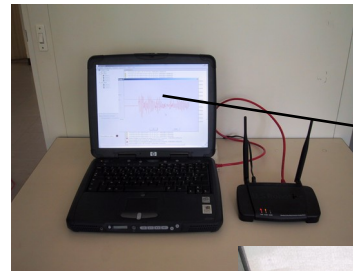
4 – Plate Forme développée : CASC sans-fil

Nouvelle génération – nouveaux objectifs :

- Enregistrer la forme des ondes transitant dans le câble pour améliorer : détection, fiabilité des conclusions, connaissance du phénomène
- Développer une version de capteurs sans-fils
- Moderniser la chaîne « Supervision ('armoire') - capteurs en bus série »... pour diminuer les coûts de (dés)installation, augmenter la mobilité du dispositif, simplifier son exploitation.



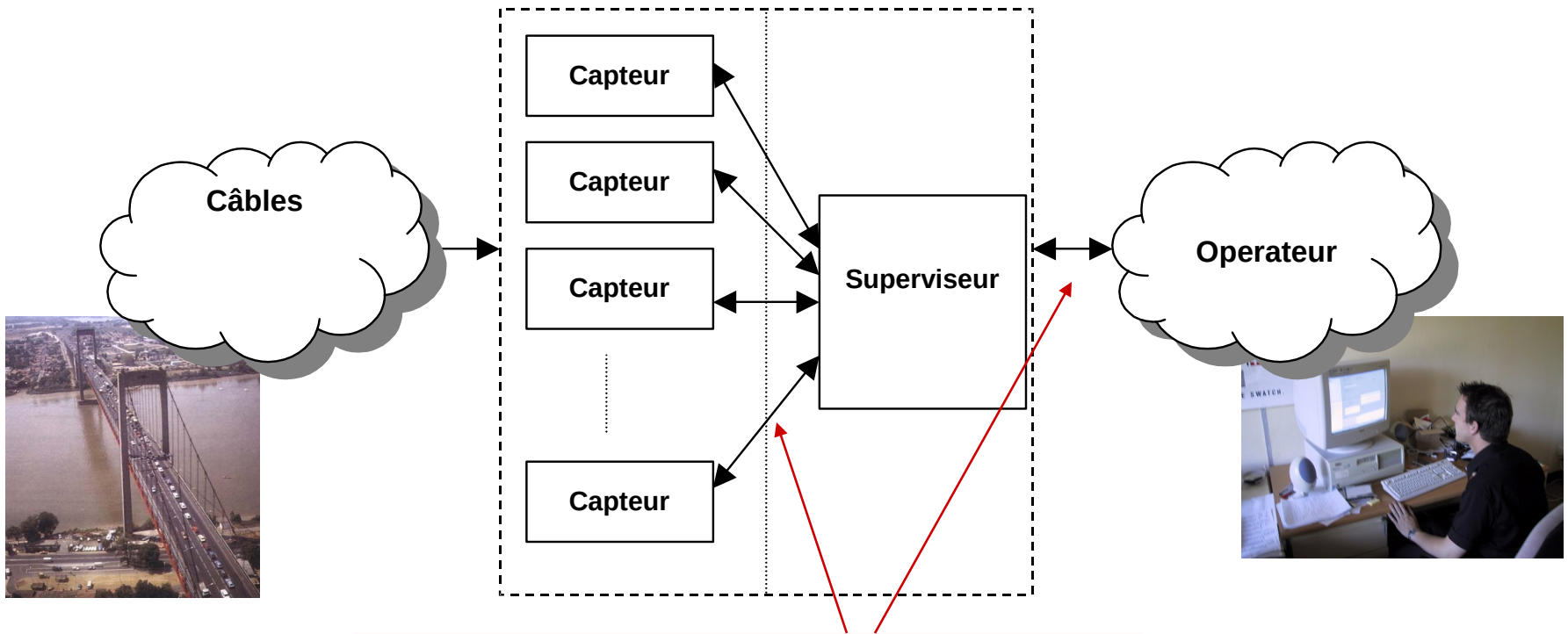
1^{ère} génération



Nouvelle génération

4 – Plate Forme développée : CASC sans-fil

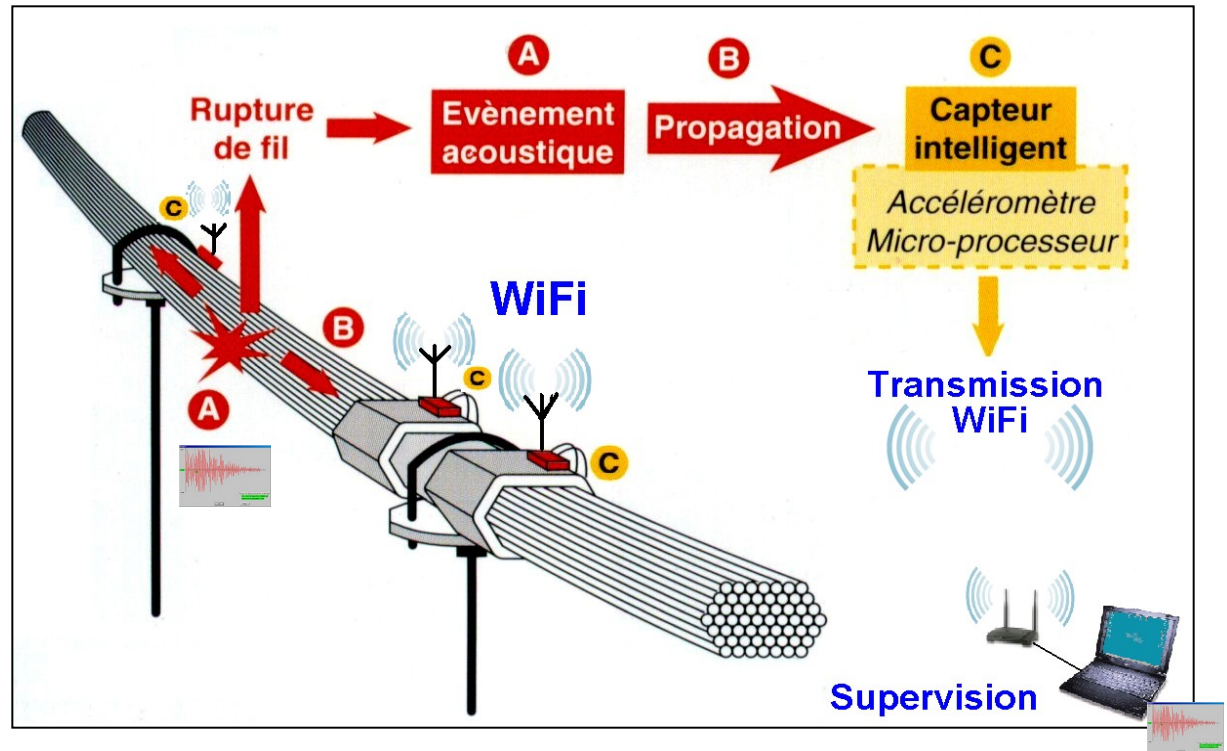
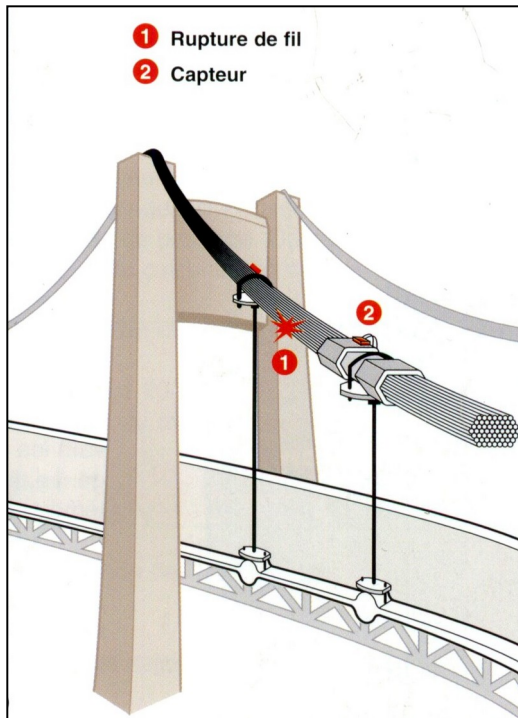
Conception du CASC sans-fil : Système CASC



**Communications en TCP/IP / Sans-Fil
i.e. Internet Protocole / WiFi**

4 – Plate Forme développée : CASC sans-fil

Conception du CASC sans-fil :



Détection d'une rupture par « tracking » de la propagation d'onde produite à l'aide d'une distribution de Capteur Sans-Fil.

4 – Plate Forme développée : CASC sans-fil

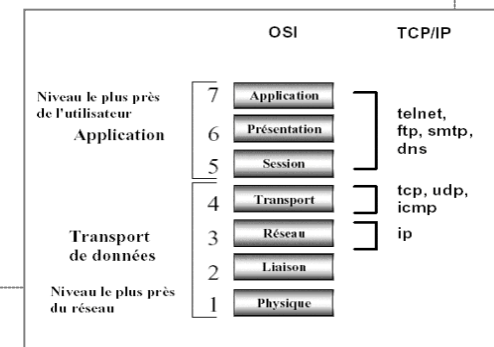
Conception du CASC sans-fil : le TCP/IP comme protocole de communication

- Un protocole dédié aux topologies réseau (point à point, point à multipoint,...)
- Matérialisé par une pile, un logiciel (Internet Protocole) natif et accessible dans tout PC ou micro-processeur,
- Facile à utiliser, pérenne, pas de développement propriétaire LCPC, sûr (sans perte) et haut débit (~MOctets/sec).

Le TCP/IP est un protocole logiciel (c.f. modèle OSI) indépendant de son implémentation physique. Les liens physiques peuvent être :

- ⇒ filaires (câbles réseau, Ethernet, RJ45, Token ring...),
- ⇒ **sans-fil (WIFI)** - adapté aux dimensions d'Ouvrages (1 km)

Peu importe, cela est transparent pour l'application !!!

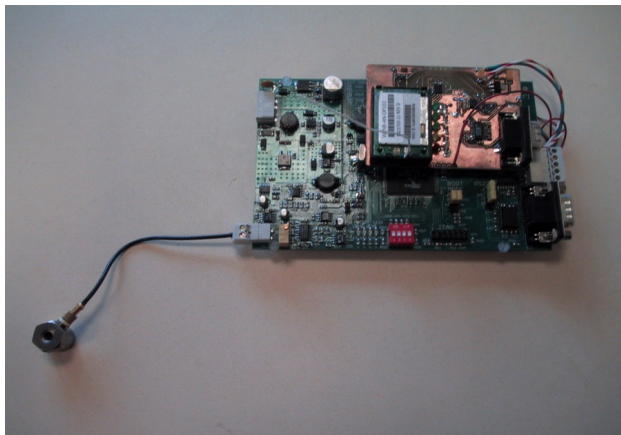


4 – Plate Forme développée : CASC sans-fil

Conception du CASC sans-fil : LE CAPTEUR

Chaque capteur acoustique CASC est un **système électronique « intelligent »** qui :

- **Conditionne, mesure et compare** en permanence les signaux acoustiques issus de l'accéléromètre
- Sur dépassement de seuil (rupture de fil ds le câble): acquisition de 8ms de signal (Fq.ech. :250 kHz). Exécute des **algorithmes**
- Assure une datation absolue des mesures **à la μ Sec près !**
- **Communique avec le superviseur en TCP/IP par WIFI.**



Cœur du capteur : **Digital Signal Processor**

-> capable d'algorithmes très élaborés (FFT, correction, matriciel,...)

-> Peut héberger un OS embarqué : μ Linux

-> Télé-reconfigurable et re-paramétrable à chaud : seuil, endormissement, frequ de W...



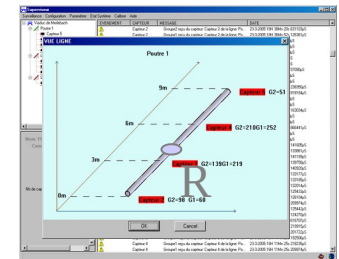
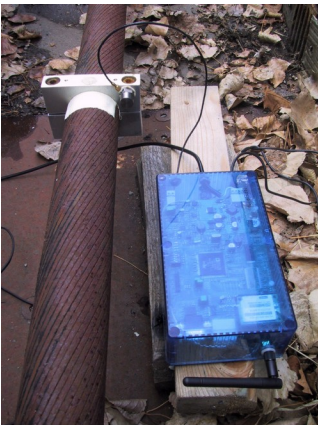
4 – Plate Forme développée : CASC sans-fil

Conception du CASC sans-fil : LE SUPERVISEUR

Superviseur = logiciel « haut niveau » conçu en langage objet (Visual C++) :

- vue globale du système (état des capteurs, vue des évènements,...)
- enregistre et affiche les signaux provenant des capteurs
- interfaces pour paramétrer chaque capteur à distance et « à chaud » : localisation, seuils, fréquence, config. TCP/IP ...
- des évènements fournis par les capteurs : exécute en tps-réel la routine de détection des ruptures

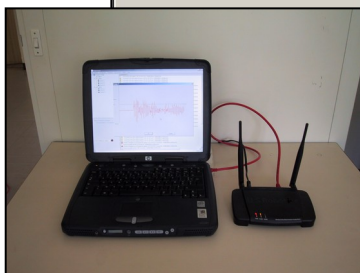
- Envoie d'alarme par SMS/GSM à un opérateur



4 – Plate Forme développée : CASC sans-fil

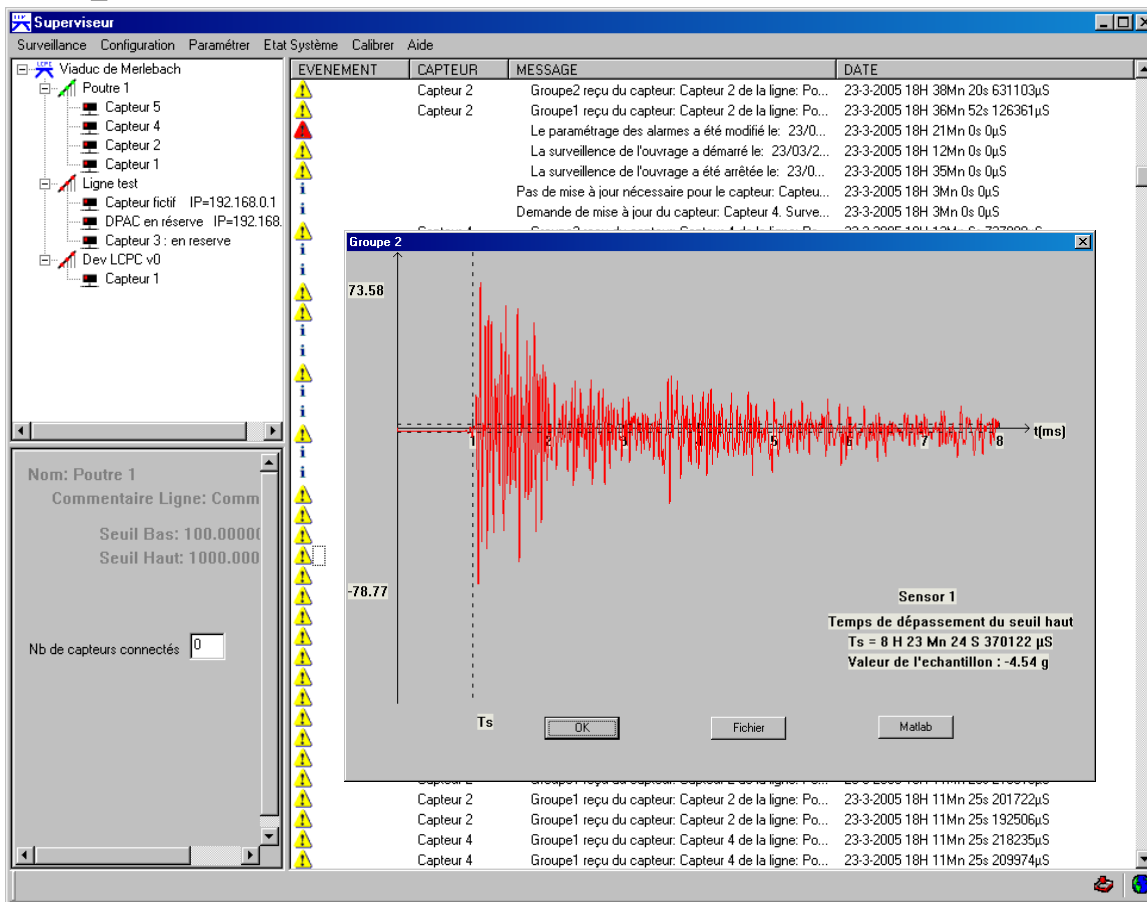
Conception du CASC sans-fil : LE SUPERVISEUR

Vue et gestion globale
des câbles surveillés et
de la répartition des
capteurs



4 – Plate Forme développée : CASC sans-fil

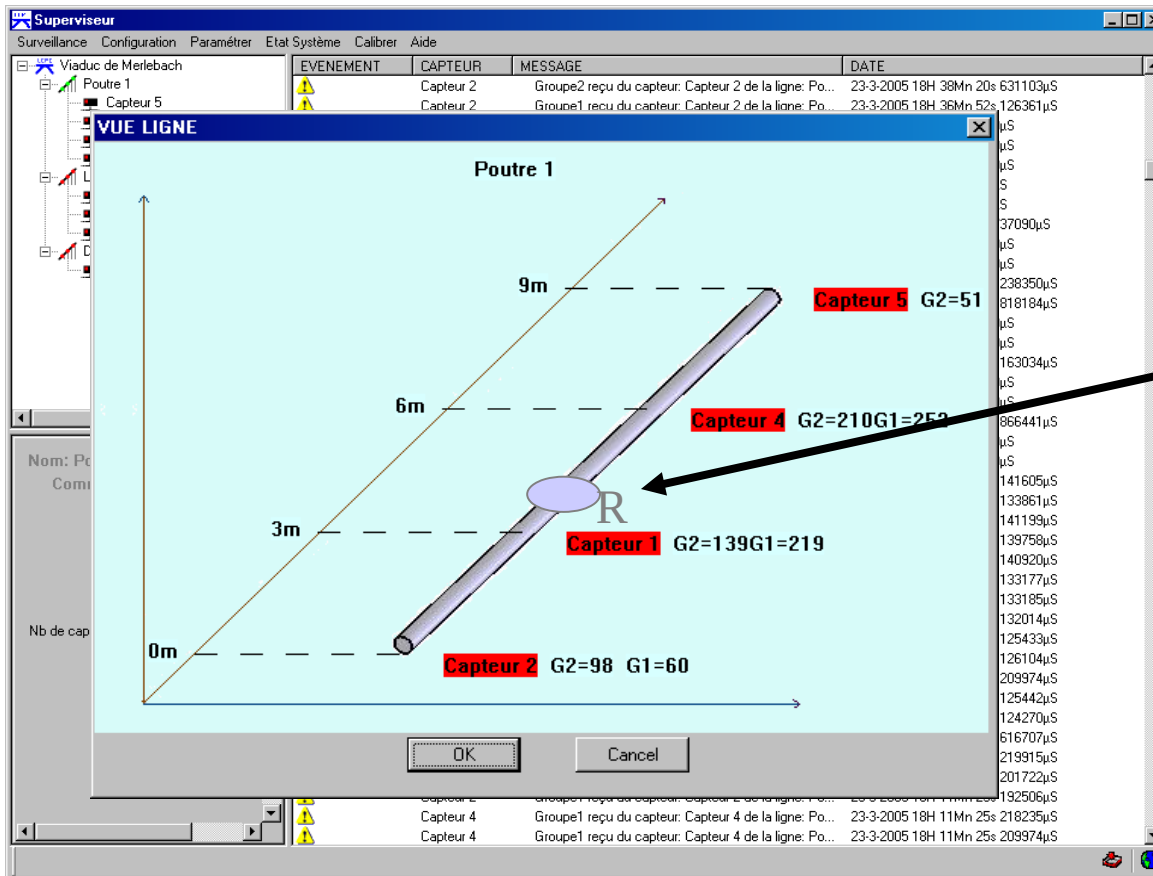
Conception du CASC sans-fil : LE SUPERVISEUR



Vue et exploitation des signaux transmis par les Capteurs

4 – Plate Forme développée : CASC sans-fil

Conception du CASC sans-fil : LE SUPERVISEUR



Détection et localisation automatique d'une rupture sur un câble

4 – Plate Forme développée : CASC sans-fil

Premier prototype de Plate Forme CASC



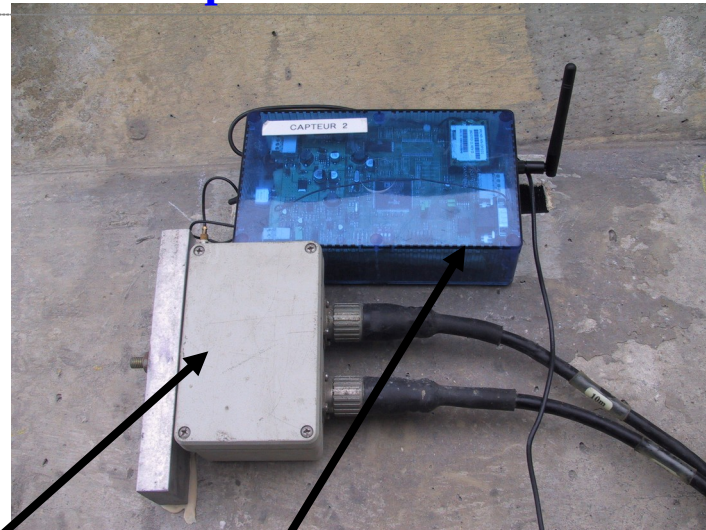
Fin 2004 une première plate-forme prototype a été réalisée pour mener les tests de validation

4 – Plate Forme développée : CASC sans-fil

Test de validation au viaduc de Merlebach (57)



Mars 2005 : Premiers tests de validation in-situ sous conditions réelles. Une poutre pré-contrainte est poussée à la rupture.



L'ancien ET le nouveau système sont installés en « concurrence ».

4 – Plate Forme développée : CASC sans-fil

Test de validation au viaduc de Merlebach (57)

Puis la poutre a été poussée à la rupture => nombreuses ruptures ! Comparaisons des résultats des 2 systèmes. Bonne corrélation !

Visualisation graphique de la routine de détection des Ruptures

Démarrer routine

->Le capteur: Capteur 5 est en bout de ligne. Pas d'analyse, possible.
 ->Analyse des événements liés au capteur: Capteur 4 (capteur prec= Capteur 1 capteur suiv= Capteur 5).
 ->Il y a: 210 Groupes2 associés au capteur: Capteur 4
 -> RUPTURE entre le capteur: Capteur 4 et le capteur: Capteur 1 le: 23-3-2005 18H 4Mn 55s 894522µS à: 0.
 -> RUPTURE entre le capteur: Capteur 4 et le capteur: Capteur 1 le: 23-3-2005 18H 4Mn 55s 902469µS à: 0.
 -> RUPTURE entre le capteur: Capteur 4 et le capteur: Capteur 1 le: 23-3-2005 18H 5Mn 24s 588101µS à: 0.
 -> RUPTURE entre le capteur: Capteur 4 et le capteur: Capteur 1 le: 23-3-2005 18H 6Mn 17s 522786µS à: 0.
 -> RUPTURE entre le capteur: Capteur 4 et le capteur: Capteur 1 le: 23-3-2005 18H 7Mn 2s 664063µS à: 0.1
 -> RUPTURE entre le capteur: Capteur 4 et le capteur: Capteur 1 le: 23-3-2005 18H 8Mn 20s 7556µS à: 1.58
 -> RUPTURE entre le capteur: Capteur 4 et le capteur: Capteur 1 le: 23-3-2005 18H 11Mn 25s 125433µS à: 1
 -> RUPTURE entre le capteur: Capteur 4 et le capteur: Capteur 1 le: 23-3-2005 18H 11Mn 25s 133177µS à: 1
 -> RUPTURE entre le capteur: Capteur 4 et le capteur: Capteur 1 le: 23-3-2005 18H 11Mn 25s 140920µS à: 1
 ->Le capteur: Capteur 2 est en bout de ligne. Pas d'analyse, possible.
 ->Analyse des événements liés au capteur: Capteur 1 (capteur prec= Capteur 2 capteur suiv= Capteur 4).

OK

6	3	15:00:31	6	-104	4716	7	53	85-90	plusieurs fils
7	4	15:00:46	6	-163	5057	8	36	85-90	plusieurs fils
8	5	16:45:18	6	-164	4660	6	129	90-95	plusieurs fils
9	6	16:47:53	6	-8	2344	3	15	90-95	à voir ?
10	7	16:50:06	6	-40	5057	10	175	90-95	plusieurs fils
11	8	17:37:21	3	68	5255	5	19	95-100	2 fils
12	9	17:58:12	6	77	2715	2	7	95-100	1 fil
13	10	17:58:28	6	-77	5154	4	79	95-100	plusieurs fils
14	11	18:00:05	6	-20	5766	13	42	100-105	plusieurs fils
15	12	18:00:23	6	-81	5021	15	96	100-105	plusieurs fils
16	13	18:00:51	6	-136	5520	5	124	100-105	plusieurs fils
17	14	18:01:40	6	-90	5192	4	79	100-105	plusieurs fils
18	15	18:02:37	6	43	4498	4	62	100-105	plusieurs fils
19	16	18:03:53	6	-157	5021	9	41	100-105	plusieurs fils

Feuil1 / Feuil2 / Feuil3 / Prêt NUM



Résultats :
Moyenne de +/-
11cm dans la
localisation.

4 – Plate Forme développée : CASC sans-fil

Test de validation : banc de traction de MACOA – câble hauban 50m

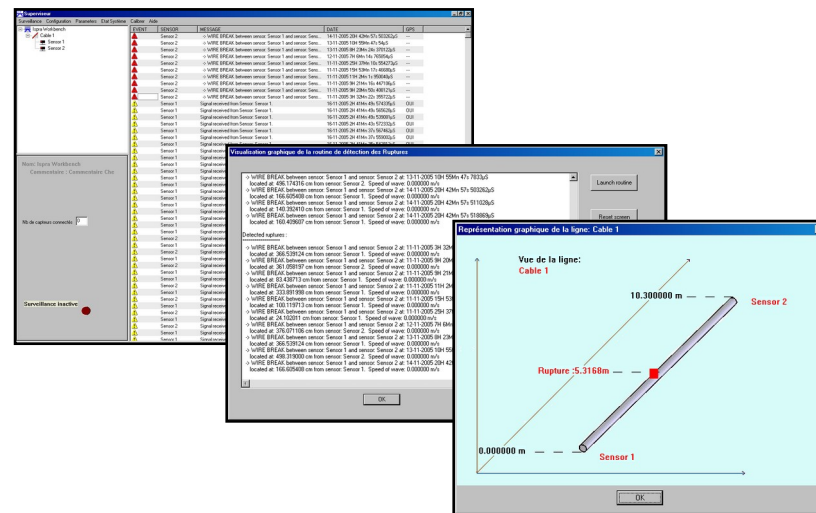
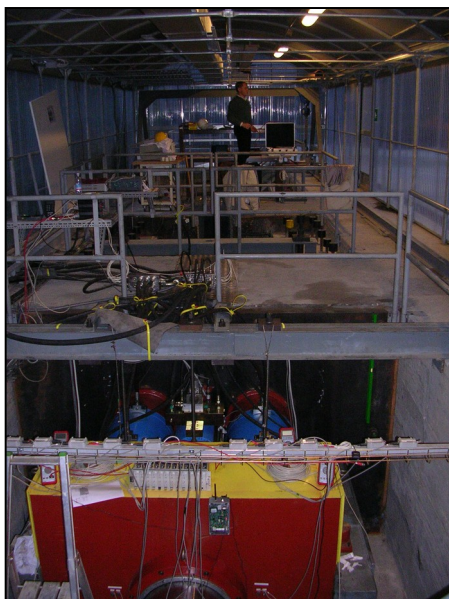
2005-2006 : Simulations de ruptures détectées et localisées +/- à 10 cm.



4 – Plate Forme développée : CASC sans-fil

Test de validation : banc de traction du JRC ISPRA - Italie

D'octobre 2005 à février 2006 : CASC est installé sur le banc du ELSA-Lab du CCR d'ISPRA. Le LCPC a assuré le monitoring distant des ruptures dans le câbles. 18 ruptures détectées.



Un prototype du Système vendu !

4 – Plate Forme développée : CASC sans-fil

CASC : fin et ... suite

Fin de la phase de validation – transfert industriel :

- ⇒ T. validation en cours et à venir => nouveau système est ok
- ⇒ Ultime test in-situ sur pont suspendu en France => Ancenis 2007
- ⇒ Rédaction d'une *Méthode des Laboratoires des Ponts & Chaussées* pour
- ⇒ Transférer le système à des industriels licenciés. Solides contacts en cours.



Roadmap technologique & scientifique :

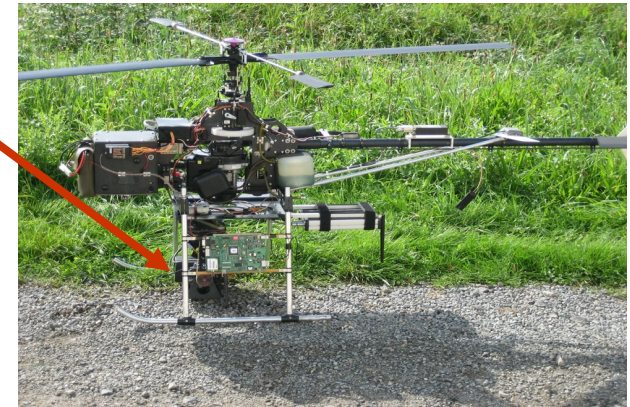
$$\frac{\partial^2 s}{\partial x^2} - \frac{1}{V^2} \frac{\partial^2 s}{\partial t^2} = 0$$

- ⇒ Récupération et économie d'énergie pour autonomie totale, intégration, optimisations,...
- ⇒ Intégration les progrès scientifiques sur la «propagation des ondes» pour meilleure loc. des ruptures + fiabilité des résultats
- ⇒ La nouvelle génération enregistre la forme complète des ondes = bcp de possibilités en traitement de signal (améliorer les détection de phénomènes) : corrélation, FFT, problèmes, filtrage...

4 – Autres déclinaisons wireless en cours

La Plate-forme Mobile d'Instrumentation (PMI)
intégration d'un capteur intelligent embarqué pour :

- ⇒ Ctrl/commande d'un Télémètre Laser
- ⇒ Mesure de vibration du drone
- ⇒ Ctrl/commande Appareil Photo Numérique, etc...



⇒ **Prise en main et évaluation du Zigbee**

- ⇒ Passage de 2 Capteurs CASC de WiFi en Zigbee
- Retour d'expérience riche



⇒ **Conception d'une Plate-Forme de Communication Véhicule – Infrastructure. LIVIC – Cadre sécurité routière. Cf. Prestige, Safespots, CALM**



4 – Autres déclinaisons en cours

Autres déclinaisons en cours ou envisagées :

- ⇒ Une coopération avec la sté **ADVITAM** pour la surveillance des ouvrages
- ⇒ R&D avec la sté **SOLDATA** pour le monitoring de parois vitrées
- ⇒ Les résultats de **mission de prospection** de M. V. Cousin (Sté Processus & Innovation)
 - ⇒ LITG : sismologie – mouvements de bâtiments, réponse aux sollicitations
 - ⇒ CETE Lyon : surveillance de déplacement de masses rocheuses
 - ⇒ CEMAGREF : surveillance des avalanches
 - ⇒ LIRIGMG Grenoble : remontées mécaniques
 - ⇒ etc.



BESOIN de développer une boîte à outil générique «PSFG »

6 – Conclusion et roadmap

Le LCPC \ SMI a acquis et maîtrise les points clés des WSN. **Mutation technologique** en cours – quitte les développements propriétaires. Cette maîtrise trouve sa reconnaissance dans les coopérations et les ventes en cours.

Verrous technologiques à lever : nano technologies (LETI), énergie (conso - et récup +) Intégration « one-chip » pour les stacks intégrées, synchronisation (GPS ok, TPSN, TDP,...)

Poursuivre la maîtrise et la **veille techno**: OS embarqués, topologies, autres environnements (Labview, Matlab)

Développer une **Plate Forme Sans Fil Générique** = boite à outils intégrant souplesse et paramétrage les+ larges possibles pour factoriser le max d'applications du Génie Civil et servir le RST.

- Plusieurs points de mesure par Capteur et éléments sensibles hétérogènes
- Prétraitements de signal possibles : acquisition, filtrage,...
- Facile à décliner selon le monitoring désiré

=> **Ecriture un CDC prenant en compte les REX et besoins des acteurs du RST.**
Développements prévus en 2007 et 2008 (opération : Capteur et Trt de l'info).

6 – Conclusion et roadmap

MERCI !

