

7 > 9
SEPTEMBRE
2022



RONCE-LES-BAINS
Centre de séjour
AZUREVA

Rencontres Nationales
des **GESTIONNAIRES**
des

Routes

www.rencontres-routes.com



Présentation :

Vincent LE CAM, Ingénieur de Recherche, IPEF.



= { **IFSTTAR** + Université Paris-Est Marne-la-Vallée + école d'architecture l'EAVT + trois écoles d'ingénieurs : EIVP + ENSG Géomatique + ESIEE Paris }

Liens : DGITM, DGPR, CEREMA, IDRRIM, CSTB, CEA, ...



Directeur Adjoint du Département **COSYS** de l'UGE :

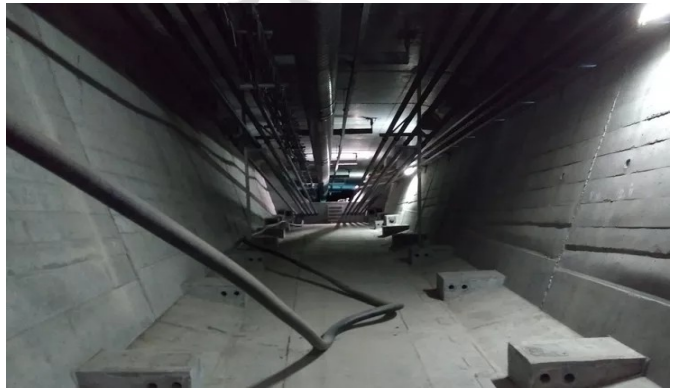
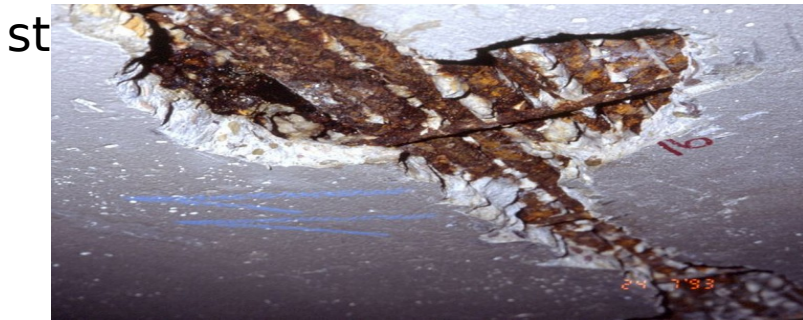
- ~ 280 agents en Recherche Développement Essais et Enseignement
- **COSYS : COMposants et SYStèmes** favoriser la science au service du **Monitoring des Structures de Transport** + et al.
- ADN : plateformes (SenseCity), startups, transferts indus, France Relance,...

Sommaire :

- 1) **Cadrage, définition** : vers du contrôle de santé continu des structures, *Structural Health Monitoring (SHM)*
- 2) **Les enjeux actuels des Réseaux de Capteurs sans-fil**
 - Généralités
 - L'énergie
 - Les protocoles de communication sans-fil
 - Zoom sur la problématique de la synchronisation
- 3) **Illustrations** et cas d'Application
 - CASC : surveillance acoustique des câbles
 - Surveillance des Lignes H.T.
 - Analyse modale – éoliennes
 - Ferroviaire
- 4) **Enjeux Sc et Techniques de demain**
- 5) **Conclusions, perspectives**



1) Cadrage, définition



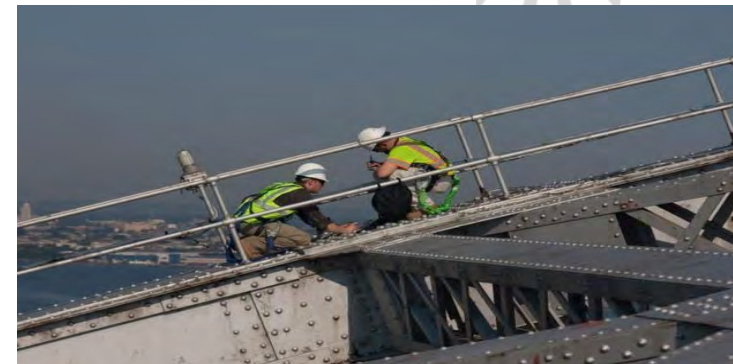
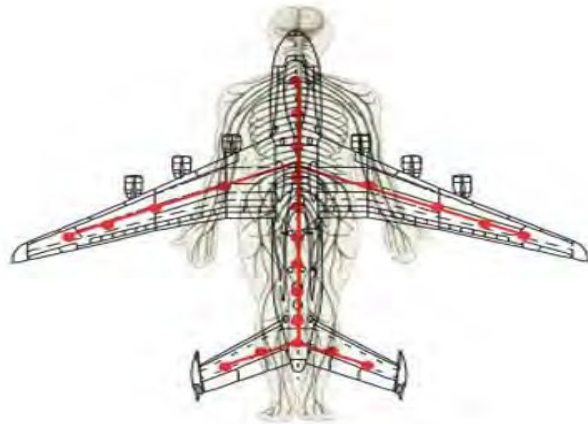
1) Cadrage, définition

Éléments d'entrée :

- Les pathologies surviennent entre 2 inspections humaines...
- Le Rapport Sénatorial de 2019 sur l'état des Ponts en France...
- Un stimuli et une tendance internationale à s'en préoccuper

Éléments de réponse :

- Œuvrer à « une surveillance continue » des structures...
- Définition : contrôle de santé continu ou Structural Health Monitoring (**SHM**)
- Définition : coupler calcul et mesure au + près de l'ouvrage
- Modestie : compléter plutôt que remplacer le travail des inspecteurs
- Traduction opérationnelle : exemple « Ponts Connectés » @ Cerema
- Contraintes : performance, coût => « du **sans-fil** » **car le câblage = frein principal au déploiement massif de l'instrumentation**



1) Cadrage, définition

Pour mesurer quoi ? Quelles grandeurs physiques ?



Accéléromètre



Jauge de déformation



Thermocouple



Géophone



Force

Etc...

2) Les enjeux actuels des réseaux de capteurs sans-fil



« Les réseaux de capteurs sans-fil (pour surveiller les structures)... tout le monde en parle, personne n'en déploie » V. Le Cam 2021

Nuances et questions :

- Des solutions existent.... mais sont rares...ou non généralisées
- Les retours d'expérience sont mitigés...
- La promesse de la baisse des coûts est elle (vraiment) atteinte ?
- Tous les enjeux ont ils vraiment été pris en compte ?

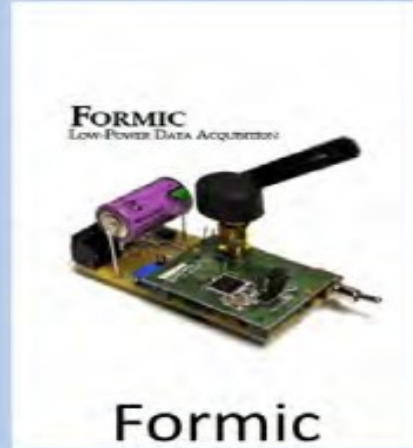


2) Les enjeux actuels des réseaux de capteurs sans-fil

Bibliographie technologique



Airbean



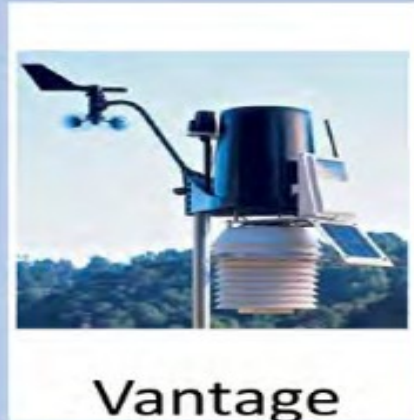
Formic



Newsteo



Microstrain



Vantage



Michigan



PEGASE



Pioneer

2) Les enjeux actuels des réseaux de capteurs sans-fil

Bibliographie technologique

Retours d'expérience...mitigés

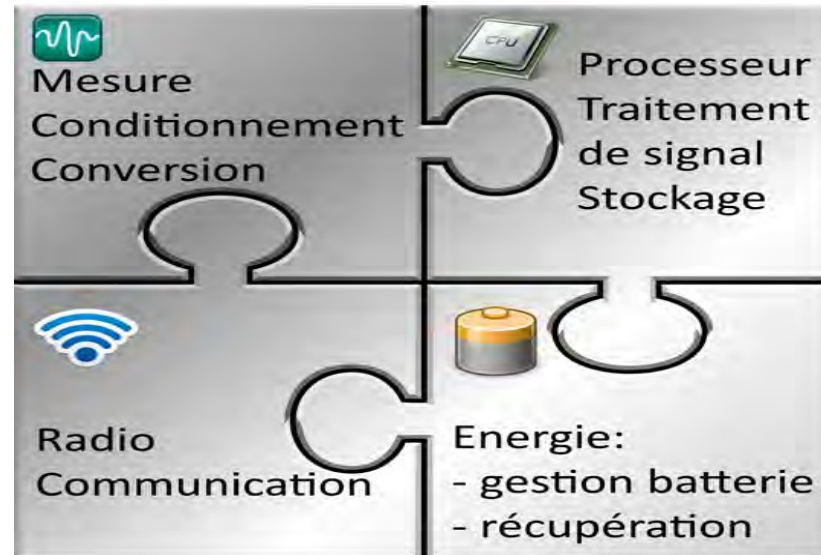


3. Wireless sensors are used to measure long-term stress and strain in civil engineering structures like buildings and bridges. (Courtesy: Microstrain Inc.)



2) Les enjeux actuels des réseaux de capteurs sans-fil

- Un discours et une presse **technologique** omniprésents sur l'**IOT** dans notre quotidien donne à penser que « tout est fait/faisable »
- Construire des Capteurs sans fil *serait* un puzzle consistant à assembler 4 briques de base



Conclusions d'étape :

- **Si c'était si simple, le GAFA des capteurs existerait déjà !**
- **Il manque la dimension « métier » de la surveillance des structures**
- **Il manque la dimension « mise en œuvre » opérationnelle des capteurs**



2) Les enjeux actuels des réseaux de capteurs sans-fil

- **L'avènement des Réseaux de Capteurs sans-fil** doit progresser selon des axes techniques et scientifiques \pm bien identifiés : énergie, protocole sans-fil... synchronisation, intelligence embarquée...
- La **vision d'ensemble** de ces axes est **complexe** : ils correspondent à des choix techniques intriqués : intelligence et énergie ; synchronisation et communication ; etc...

Verrous scientifiques, techniques ou autres à adresser :

- 1) **L'énergie** : récupération, stockage, optimisations...
- 2) **Les protocoles wireless** : critères de choix, tendances,...
- 3) **L'intelligence embarquée** dont
 - 1) La **synchronisation**
 - 2) Les contraintes opérationnelles de déploiement
 - 3) Le vieillissement métrologique
- 4) **Autres enjeux** : durée de vie, CO2, RH,



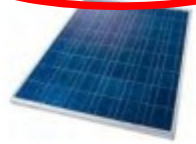
2) Les enjeux actuels des réseaux de capteurs sans-fil

2.1) L'énergie récupérée



Forte prédominance du **solaire** : assez **déterministe**, assez puissant (qqs W), durable (10 ans), low-cost....

~100 mW au W



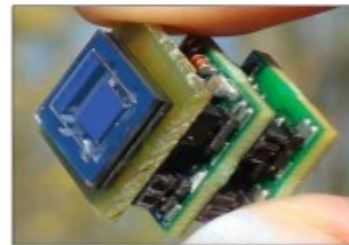
Solaire

~10aines W



Vent

~ 10aine μ W

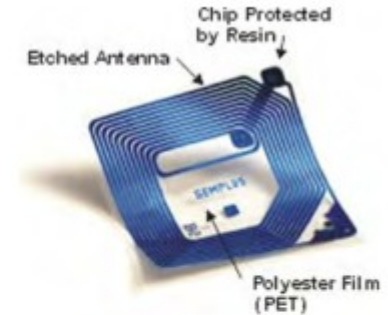


Vibration



Chaleur

W < 0

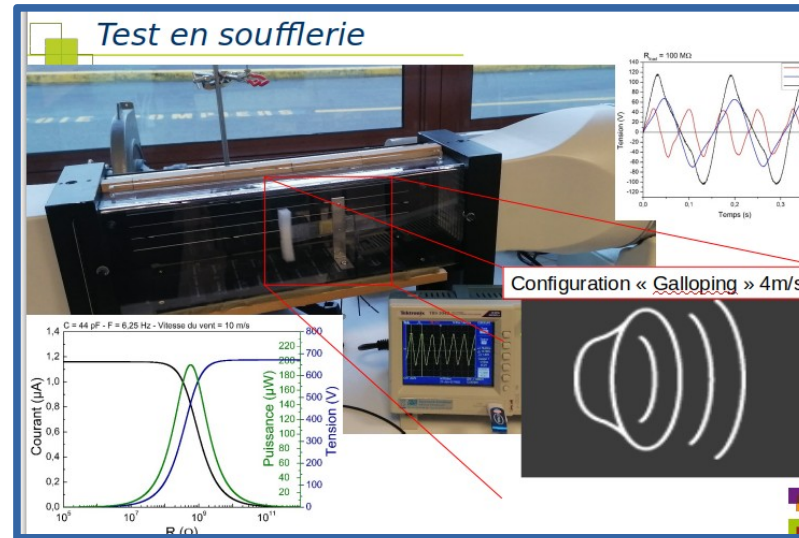
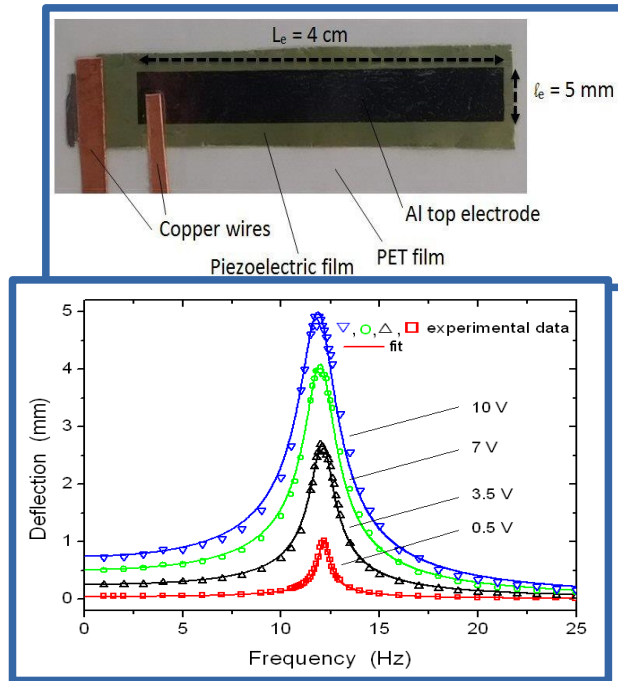


E.M.

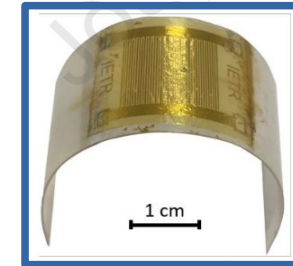
2) Les enjeux actuels des réseaux de capteurs sans-fil

2.1) L'énergie récupérée

Recherche active en piezo électricité (thèses et post-docs) :



Application :
en tunnels



Dépôt d'électrodes inter-digitées sur faible substrat en aluminium
Effet piezo électrique : faible coût, sensible au « bruit » aéralucque



2) Les enjeux actuels des réseaux de capteurs sans-fil

2.1) L'énergie stockée



Le stockage de l'énergie : Principale solution : les batteries.

La chimie de la batterie est très influente sur ses propriétés.

Proposition d'une analyse multicritères:

Critères/ Chimie	Prix	Capacité/ Volume	Courant de charge	Nb de cycles Ch/Dech	Effet t°c	Effet mémoire	Suivi ch Capacité	Dangero sité
Plomb	++	---	+	++ (6-7 ans)	+	++	--	++
NimH	+	+	--	0	0	--	--	0
Li Po	-	++	++	++ si gestion (3-5 ans)	+	++	--	--
Li ion	--	++	++		+	++	--	--

2) Les enjeux actuels des réseaux de capteurs sans-fil

2.2) Les protocoles Wireless

Tendance forte et en **émulation** :

- Conscient des limites ou des inadaptations des protocoles actuels, **émergence de protocole et opérateur WAN dédié à l'IOT** ! Lourds déploiements en cours !
- Vers des opérateurs IOT



Lequel choisir ?

Critères possibles :

- Portée : local/global...
- Coût : techno, abonnement
- Consommation : 1mW, 100 mW...
- Scalabilité (nb de nœuds)
- Débit : byte/jour M.O./s...
- Bidirectionnel ?
- (cyber) Sécurité
- Dépendance technologique, norme
- ...

Conclusions d'étape :

Devant le coût techno d'un développement de protocole, le G.C. est dépendant des solutions du marché télécom... non pensé pour lui.



2) Les enjeux actuels des réseaux de capteurs sans-fil

2.2) Les protocoles Wireless

Dépendance au marché télécom : illustrations
Quelle pérennité ?

Vrai en 2021, faux en 2022 !



Orange: arrêt 2027

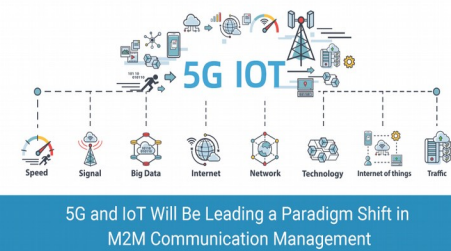


Bouygues : arrêt 2024



Liquidation judiciaire
janvier 2022

5G IOT : A évaluer en
embarqué !



2) Les enjeux actuels des réseaux de capteurs sans-fil

2.3) La synchronisation



Ou comment doter des systèmes sans liens physiques d'une base de temps commune ?

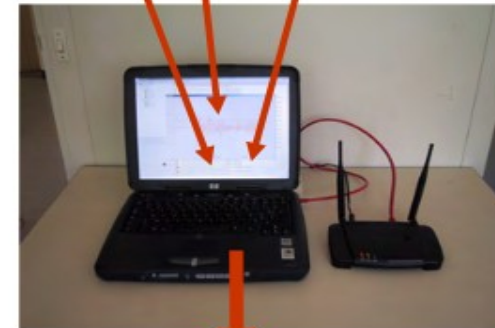
Contrôle de structure : des distributions de capteurs sans-fil sur toute la structure...

Les données collectées (T°c, Vibr., Depl., etc.) ont souvent besoin d'être comparées et corrélées dans des algorithmes ou des modèles

Surtout en dynamique !

Une simple conclusion : Les données mesurées, au niveau du capteur, doivent être correctement datées !

Or sans top synchro filaire, les compteurs de temps des **systèmes électroniques** (i.e. les quartz) **dérivent** vite !

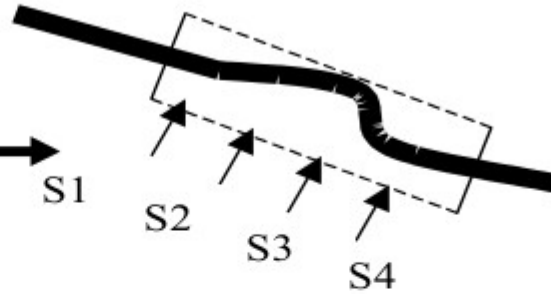


Alerte !

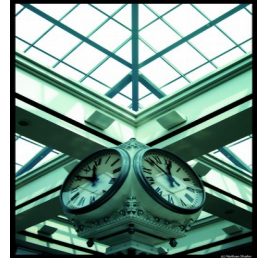
2) Les enjeux actuels des réseaux de capteurs sans-fil

2.3) La synchronisation

Exemple 1 : Mesurer les mouvements d'un hauban

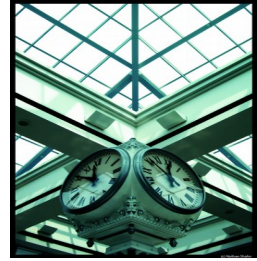


- Vibrations jusque ~ 30 Hz
 - Echantillonnage des capteurs à ~ 300 Hz
- => Conclusion, pour que les données puissent être rationnellement comparées : chaque capteur $\{S_i, S_j\}$ doit avoir une base de temps tel que $\| T_i - T_j \| \leq 3 \text{ mS} \forall t$.

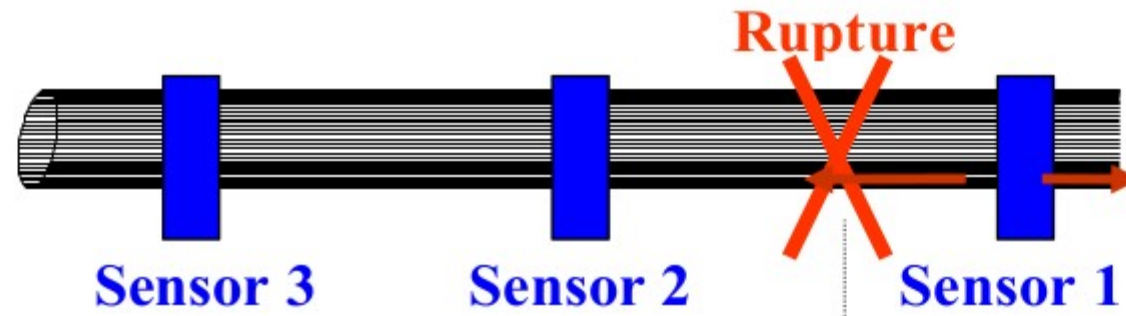


2) Les enjeux actuels des réseaux de capteurs sans-fil

2.3) La synchronisation



Exemple 2 : Localiser des ruptures de fils dans les câbles



- Système basé sur la détection de propagation d'ondes acoustiques. Vitesse typique d'une onde P dans un câble $\cong 5000$ m/s
- Précision souhaitée pour la localisation des ruptures $\cong 15$ cm
- => Conclusion : chaque capteur $\{S_i, S_j\}$ doit avoir une base de temps tel que $\| T_i - T_j \| \leq 30 \mu S \forall t$.

2) Les enjeux actuels des réseaux de capteurs sans-fil

2.3) La synchronisation

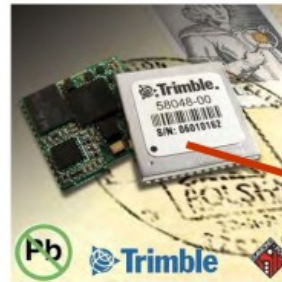
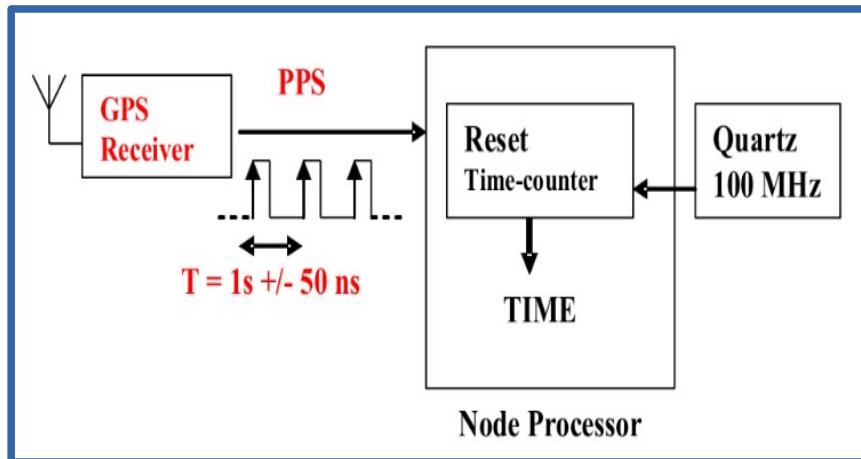
Constat bibliographique :

Il n'existe pas (vraiment) de solution industrielle assurant dans tout type de réseau une synchronisation : de précision (mS, μ S, nS), stable (confiance), indépendante du réseau wireless télécom...

Solution « Gustave Eiffel » :

UGE attaque de front cette question avec une solution basée GPS :

- Indépendance du réseau
- Mais...consommation d'un récepteur GPS à prendre en compte et donc en l'éteignant le maximum du temps



Une application bien concrète de la synchro par GPS : **détection de ruptures de fils par propagation d'ondes** par capteurs sans-fil (cf. plus bas).

Précision nécessaire **< 30 μ S !**
Comment faire ? Comment optimiser ?
(cf. PEGASE)



3) Déclinaisons et illustrations



3) Déclinaisons et illustrations

3.1) La surveillance acoustique des Câbles

- **Objectif** : détecter et localiser des ruptures de fils dans les câbles à $\pm 30\text{cm}$!
- Un câble est un organe **critique** des ponts suspendus, haubanés, à béton pré contraint...mix
- Pourtant **vulnérable** à :
 - La corrosion
 - La fatigue (travail mécanique, résonance,...)
 - La surcharge, malveillance, malfaçon (injection) ...etc
- Aux interventions compliquées, dangereuses et coûteuses ...
- **Le SHM des câbles de ponts est un enjeu stratégique**

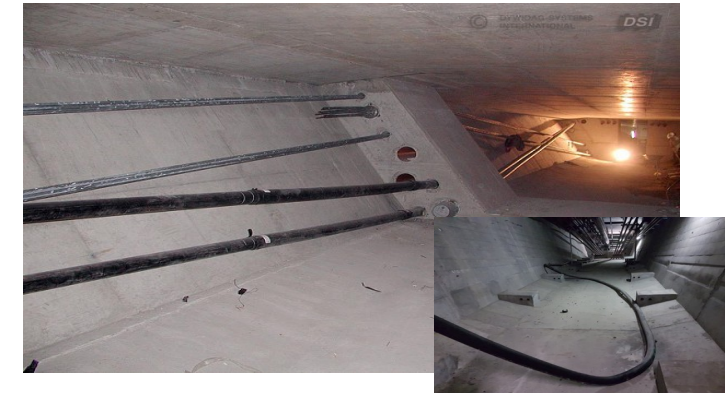
DGITM 2020 :
Financement projet



Pont suspendu



Pont haubané



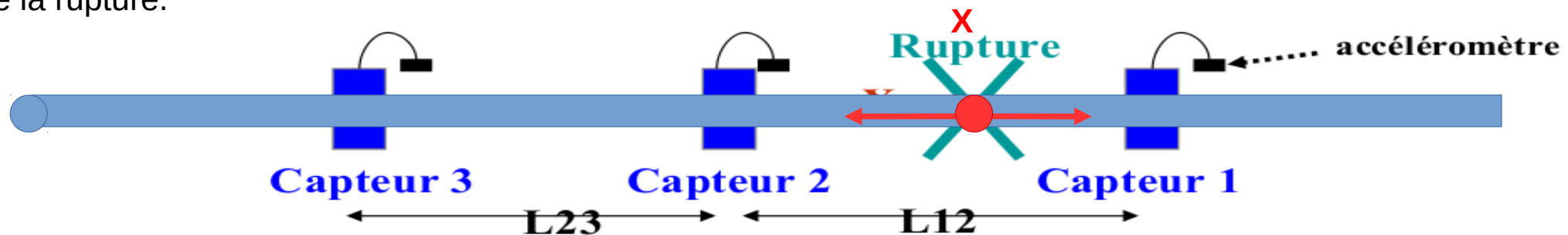
Pont à caissons pré contraints

3) Déclinaisons et illustrations

3.1) La surveillance acoustique des Câbles

Principe de la méthode CASC : détection et localisation des ruptures de fil

- La rupture d'un fil tendu libère une énergie se traduisant par une propagation d'ondes (p et s) de part et d'autre du point **X** de rupture
- Une « distribution » de capteurs fixés le long du câble détectent le passage de l'onde (chaque capteur est doté d'un accéléromètre), par **comparaison à un seuil (g)**
- Chaque capteur effectue une **datation** et un enregistrement du signal et transmet ces informations à un Superviseur
- Le Superviseur évalue alors la vitesse de l'onde et, connaissant la position relative des capteurs, détermine le lieu **X** de la rupture.



$$x = \frac{1}{2} * (L12 - v * \Delta t12) \text{ avec } v = L23 / \Delta t23.$$

Vitesse $V \sim 5000 \text{ m/s}$

Spectre 5 / 25 kHz

3) Déclinaisons et illustrations

3.1) La surveillance acoustique des Câbles

Historique des versions de la plateforme CASC :



Version « inspection »
de chantier
Ex : Tancarville

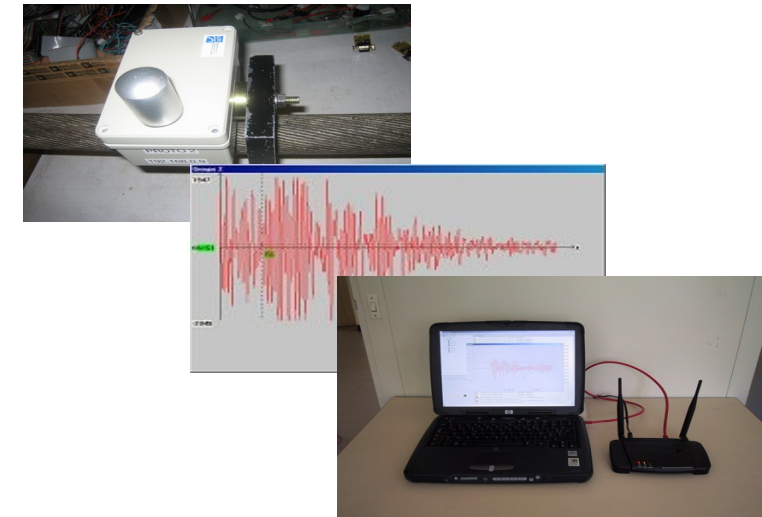
Mesures de terrain

~2/3000 boîtiers installés



Version Armoire
Surveillance continue
Ex : Aquitaine, Ancenis,

*Mesures de terrain industrialisée -
info binaire*



Version PEGASE
Surveillance continue
Capteurs intelligents
Ex : Ancenis, St Nazaire...

*Mesures capteurs sans fil
restitution onde en $f(t)$
IHM*

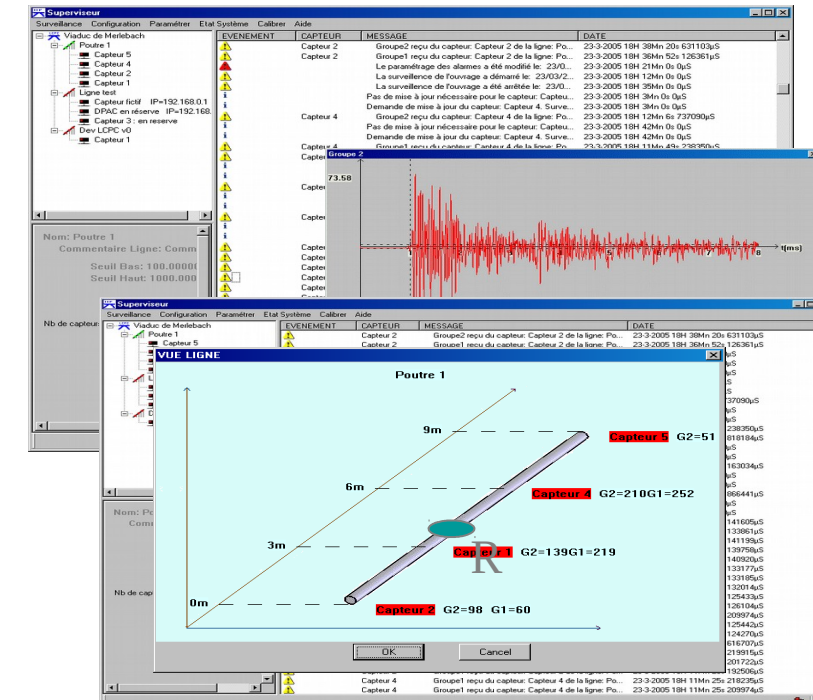
3) Déclinaisons et illustrations

3.1) La surveillance acoustique des Câbles

Zoom sur la version CASC « PEGASE »

Apports forts de cette version :

- Plus grande souplesse (paramétrage dynamique des seuil, ctrl des capteurs,...)
- Restitution **complète** de la forme des signaux en $f(t)$ - intelligence embarqué (Linux)
- Réseau de capteurs sans fils avec **challenge** de la **synchronisation sans-fil** :
- Échantillonnage à 250 kHz, 16 bits, accélero acoustique...



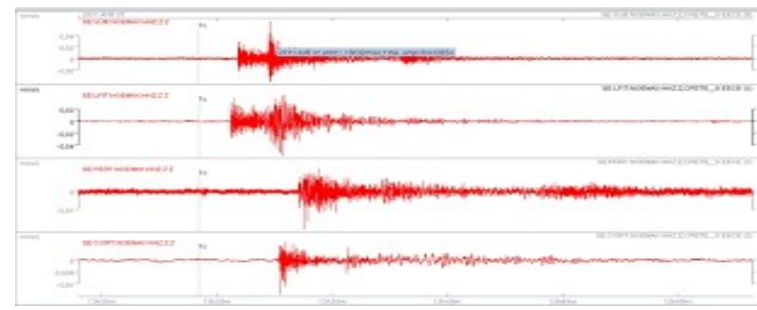
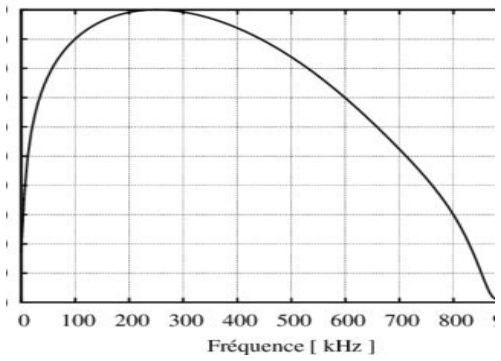
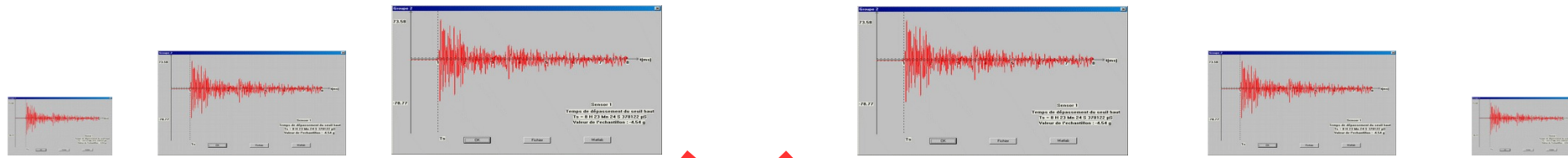
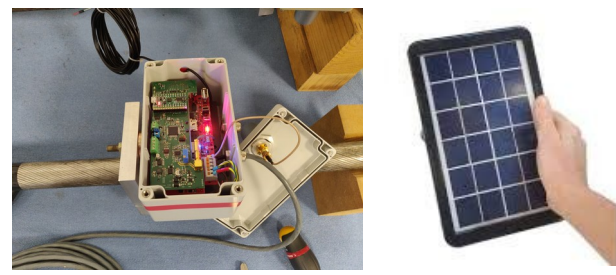
3) Déclinaisons et illustrations

3.1) La surveillance acoustique des Câbles

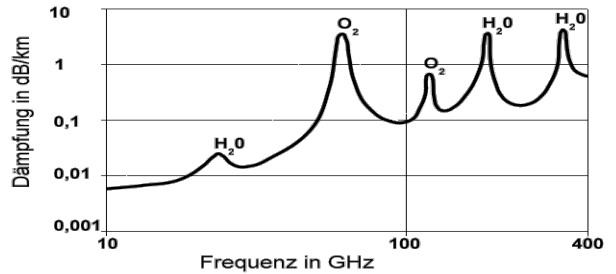
Intégration des nouveaux algorithmes ON/OFF GPS : gain en énergie => panneau solaire + petit

Meilleur détection par meilleur filtrage du bruit par :

- **détection en énergie** pré/post trigger => seuils plus bas
- Vérification **cohérence spectre / atténuation/dispersion** longitudinale du mode « p »



atténuation = $e^{-\alpha l}$



Dispersion et atténuation du spectre l'onde acoustique en f(l, t)

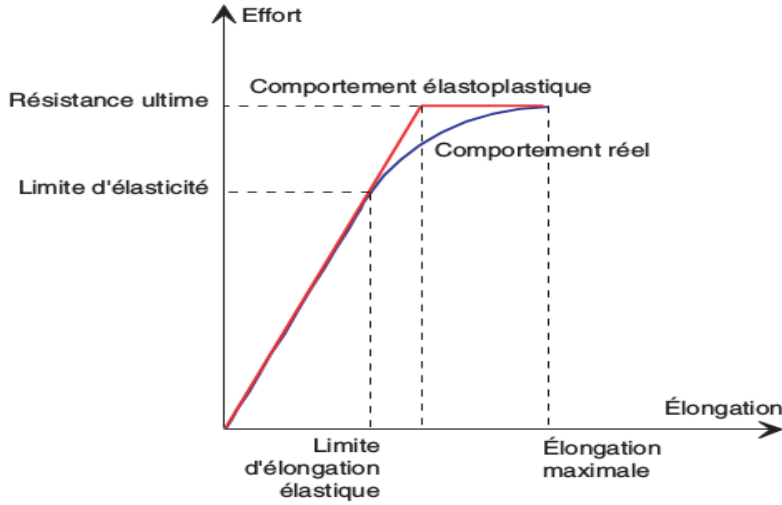
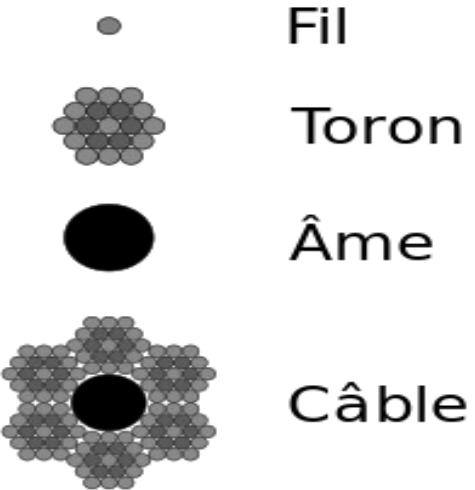


3) Déclinaisons et illustrations

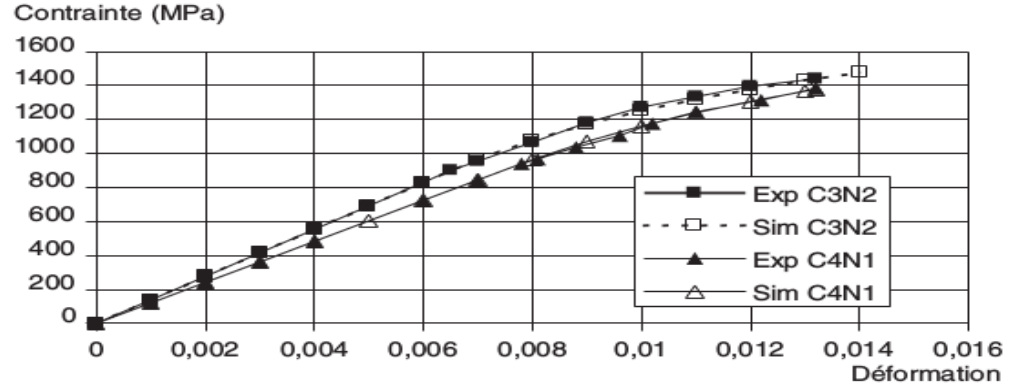
3.1) La surveillance acoustique des Câbles

A creuser (ensemble ?) :

Intégrer des modèles statistiques et analytiques liés sur la rupture de fils et la **santé prévisionnelle du câble** pour tendre vers de la **maintenance prévisionnelle**



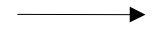
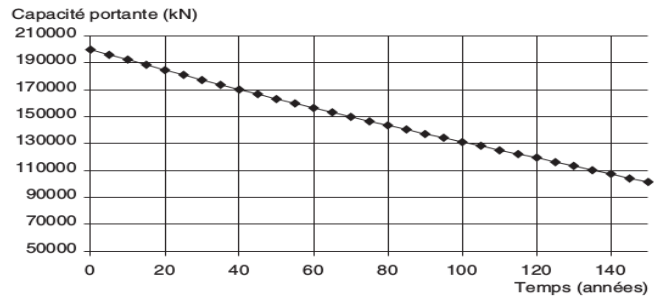
Comportement d'un fil



Comportement d'un toron

$$F_T(\mathbf{u}, t) = \sum_{i=1}^N F_{f,i}(\mathbf{u}, t)$$

Objectif : tendre vers un modèle prévisionnel de la capacité résiduelle portante du câble.



3) Exemples applicatifs

3.2) Surveillance des lignes à Haute Tension

SDEL-CC – Univ Gustave Eiffel : Contrat de R&D partenariale

- **Besoin** : Détecter et localiser les impacts de foudre ou mise à la terre des lignes Moyenne ou Haute Tension
- **Enjeux** : Dépêcher les secours (pompiers, exploitant ex. EDF/RTE) au plus vite pour maintenance ! **Chaque seconde compte énormément** ! Contrats à respecter
- **Biblio** : pas de solution concurrente ou pas plus précises que qqs kilomètres....
- **Objectif** : localiser le défaut à quelques dizaines de mètres...



3) Exemples applicatifs

3.2) Surveillance des lignes à Haute Tension

Travail réalisé

- **Modélisation** d'un câble électrique comme un conducteur linéique d'onde de courant
- Lors d'un impact de foudre => injection et propagation d'un front de courant de part et d'autre de l'impact
- En instrumentant 2 points du câble par 2 systèmes capables de dater un même signal avec une synchronisation ≤ 50 nanosecondes (~ 15 m) **Même principe que pour le CASC mais à 50 nanosecondes**
- **Localisation** : en appliquant la loi de propagation linéique des ondes

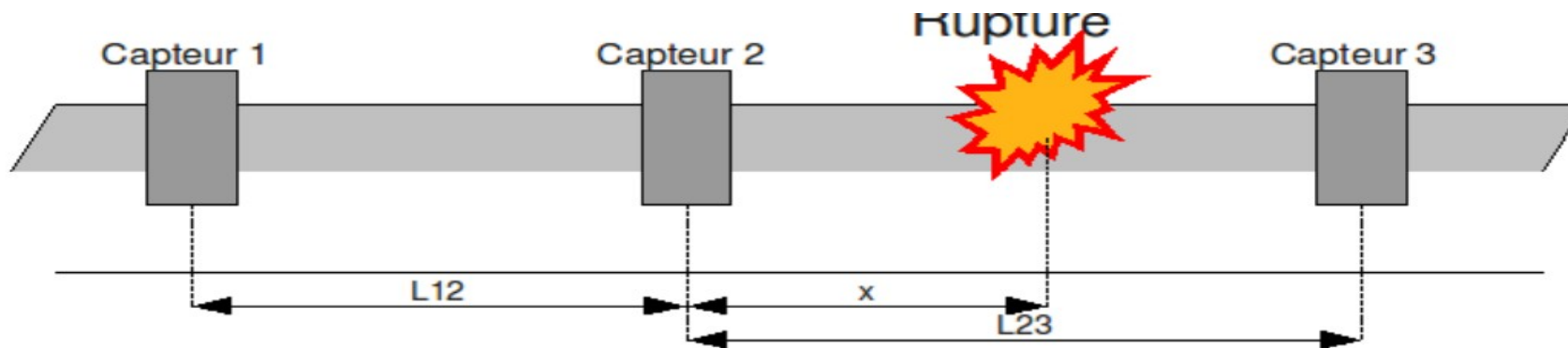


FIGURE 2 – Principe de localisation d'une rupture

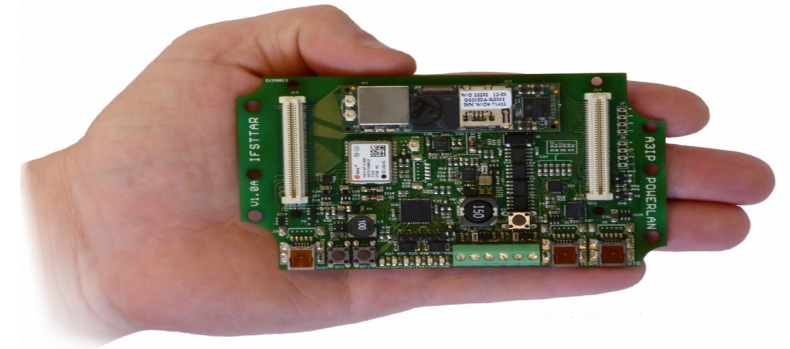
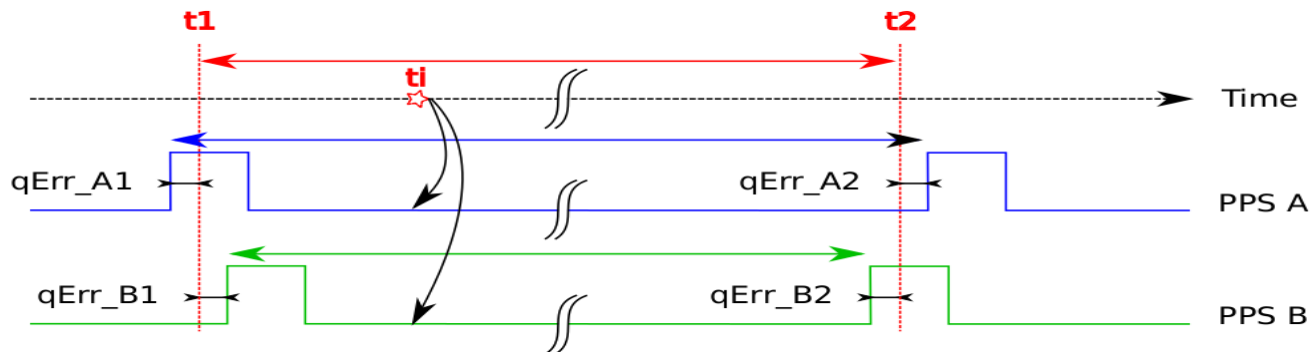
$$x = \frac{1}{2} \cdot (L_{23} - v \cdot \Delta t_{23}) \text{ avec la vitesse } v = \frac{L_{12}}{\Delta t_{12}} \quad \text{Où } v = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

3) Exemples applicatifs

3.2) Surveillance des lignes à Haute Tension

Travail réalisé

- **Développements important sur la carte PEGASE de Gustave Eiffel**
 - Linux Embarqué, driver temps réel, C++ , VHDL sur FPGA...
 - Synchronisation sur le PPS du récepteur GPS NEO6T : $1s \pm 50 \text{ nS}$
 - Algo d'auto-apprentissage de l'erreur native du quartz
 - Prise en compte en temps-réel de la trame TIM-TP : information de correction du GPS
 - Remodélisation du code de correction TIM-TP !
 - **Exploitation temps-réel du GPS et de sa capacité à « corriger le temps »**

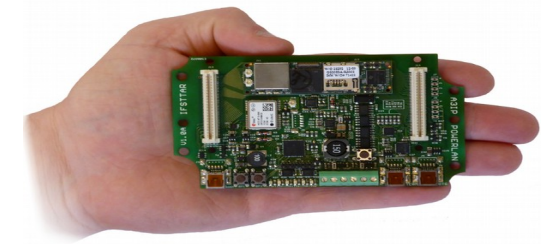
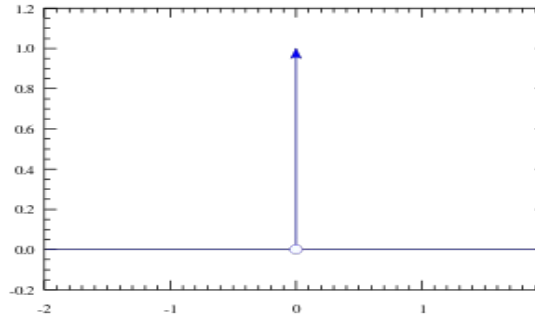
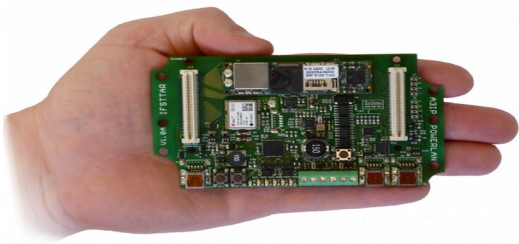


$$ti_{ns} = 10^{-3} \cdot qErr1_{ps} + \frac{cpt_{pas}}{period_{pas}} (10^9 \cdot 1_s - 10^{-3} \cdot qErr1_{ps} + 10^{-3} \cdot qErr2_{ps})$$

3) Exemples applicatifs

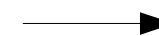
3.2) Surveillance des lignes à Haute Tension

Résultats : s'il fallait retenir une chose / ce que ce contrat a apporté à l'université Gustave Eiffel :



Deux cartes PEGASE, quelque soit leur distance, quelque soit le réseau (WiFi, 4G, Lora...) datent un même événement de façon absolue (heure UT) avec un écart de moins de 10 nanosecondes. En outdoor (GPS).

Aujourd'hui = un produit diffusé par Vinci



3) Exemples applicatifs

3.3) Projets de « Surveillance Vibratoire »

Une variation structurelle (raideur,...) se traduit par une variation modale de la structure

$$f = \frac{n\sqrt{\frac{T}{\rho}}}{2L} = \frac{n\sqrt{\frac{T}{m/L}}}{2L}$$

$$\frac{\delta\alpha}{\alpha} = 1.8 \frac{\delta\omega}{\omega}$$

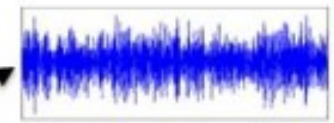
Généricité familiale des ouvrages

Dimensionnement et Réplicabilité

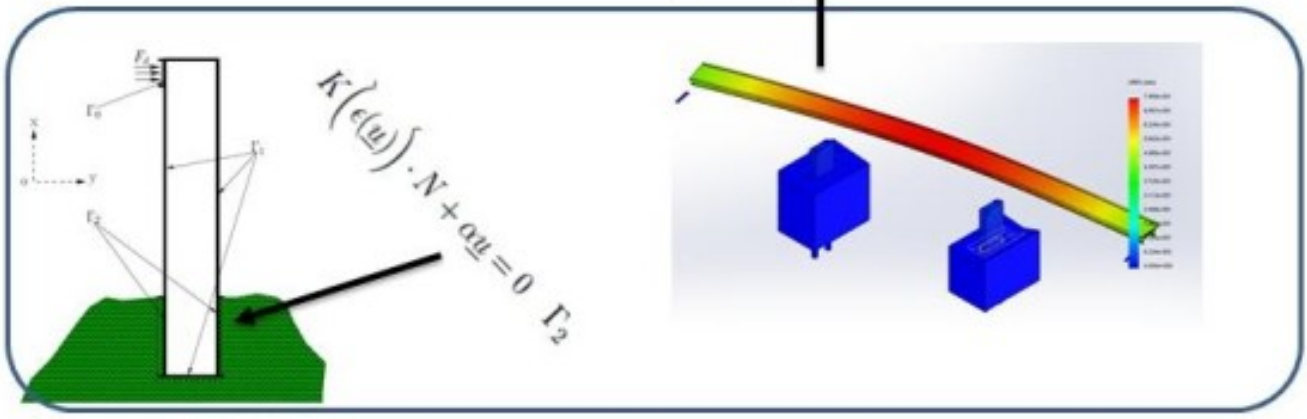
Variation de Rigidité Structurelle

Réseau de référence avec nombre de capteurs optimisé

Application aux affouillements



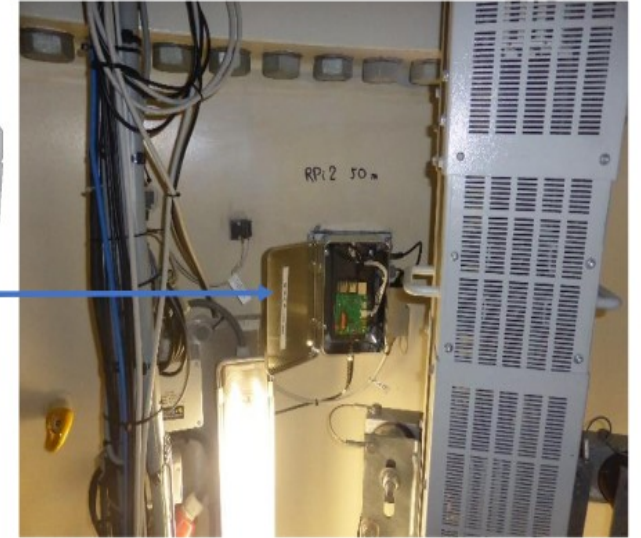
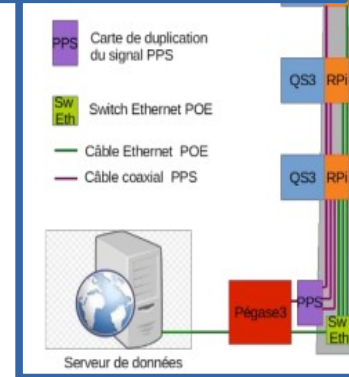
$$\delta\alpha = K \delta\omega$$



3) Exemples applicatifs

3.3) Projets de « Surveillance Vibratoire »

Une variation structurelle (raideur,...) se traduit par une variation modale de la structure



Détection des affouillements Projet « Ponts Connectés » IA2

- Sixense
- UGE
- Cofiroute
- Département du Lot

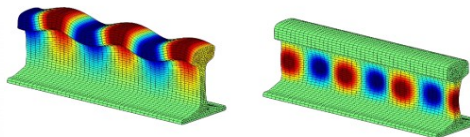
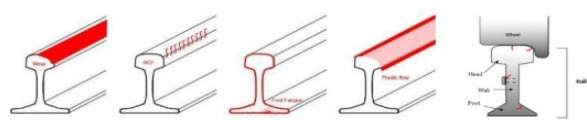
Détection précoce de défauts « Eolienne » Projet « Ponts Connectés » IA2

- Sercel
- Valorem
- UGE
- Région Pays de La Loire



3) Exemples applicatifs

3.4) Détection des rails rompus par Onde Guidés et Capteurs Sans-fil



Objectif : détecter/localiser les rails rompus

Solution :

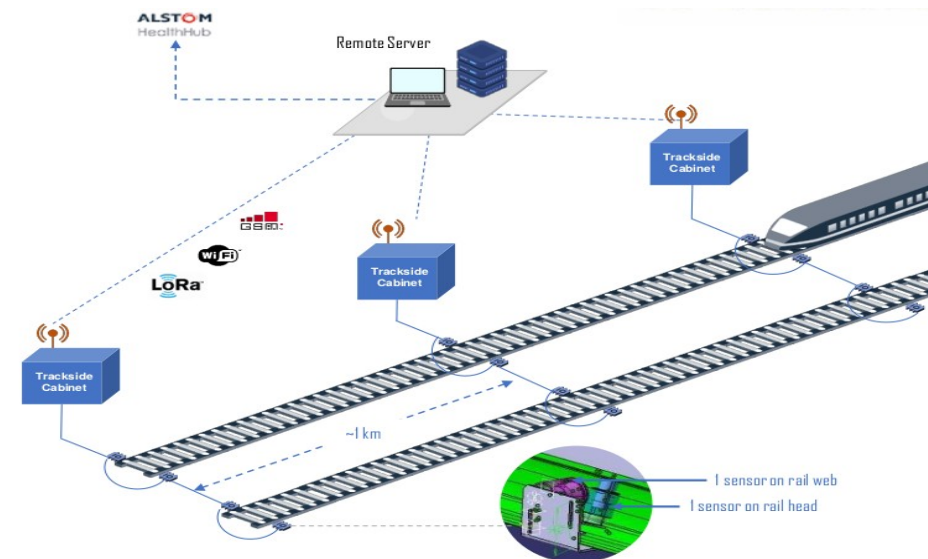
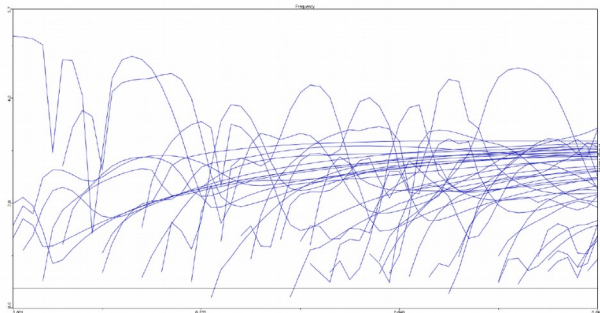
- émission/réception d'ondes guidées sur des linéaires de 1 à 2 kms
- Émission de forme d'onde bien particulière (spectre, puissance, modes...)

Challenge :

- émission/réception d'onde **synchrones et en phase** sur des systèmes sans-fil

ALSTOM
• mobility by nature •

list
cea tech



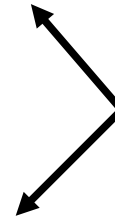
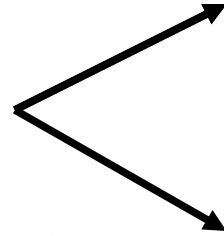
4) Enjeux Scientifiques et techniques de demain



4) Enjeux Scientifiques et techniques de demain

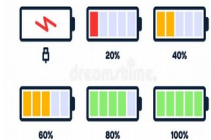
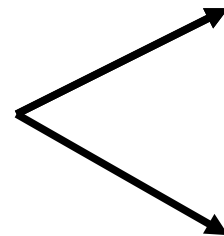
4.1) Le placement optimal des capteurs

Analogie : un Smartphone est un wireless sensor comme un autre



Le Smartphone me dit :

- S'il a du réseau
- S'il a de l'énergie



Que dit le capteur sans fil ? :

- Rien !!!

4) Enjeux Scientifiques et techniques de demain

4.1) Le placement optimal des capteurs



Constats, besoins :

- de véritables **besoins mal exprimés** ou non spécifiés
- Besoins d'outils **d'aide à la décision, au placement**
- Placement optimal : **énergie, réseau...**

La vraie intelligence embarquée :

- Prendre en compte les **besoins de l'opérateur**
- Passer du « j'installe où je peux » à « j'installe où je dois »

Point clé du développement des capteurs sans fil :

- l'électronicien doit penser plus large et faire un pas vers l'opérationnel



4) Enjeux Scientifiques et techniques de demain

4.2) Le vieillissement métrologique



Anciens barrages...



Situation :

- Structures à longue durée de vie => longue durée de monitoring
- Dérive, dégradation, usure possibles des éléments sensible...

Question :

- **Comment faire confiance à ses mesures au bout d'1, 10 , 100 ans ?**
- Les concepteurs de CND/SHM intègrent ils bien le vieillissement métrologique ?



Futurs centre de stockage Andra...



4) Enjeux Scientifiques et techniques de demain

4.2) Le vieillissement métrologique

Constat :

- Il faut lutter contre « le **vieillissement métrologique** » !
- Point crucial : pour qu'un gestionnaire investisse dans un système SHM/CND longue durée il faut de la **confiance métrologique**

En aval et en amont :

- Choix composants de base invariants (cristal, fibre optique, ...) ou aux modèles de vieillissement connus
- Réfléchir et développer des processus d **autotest voire d'auto correction**



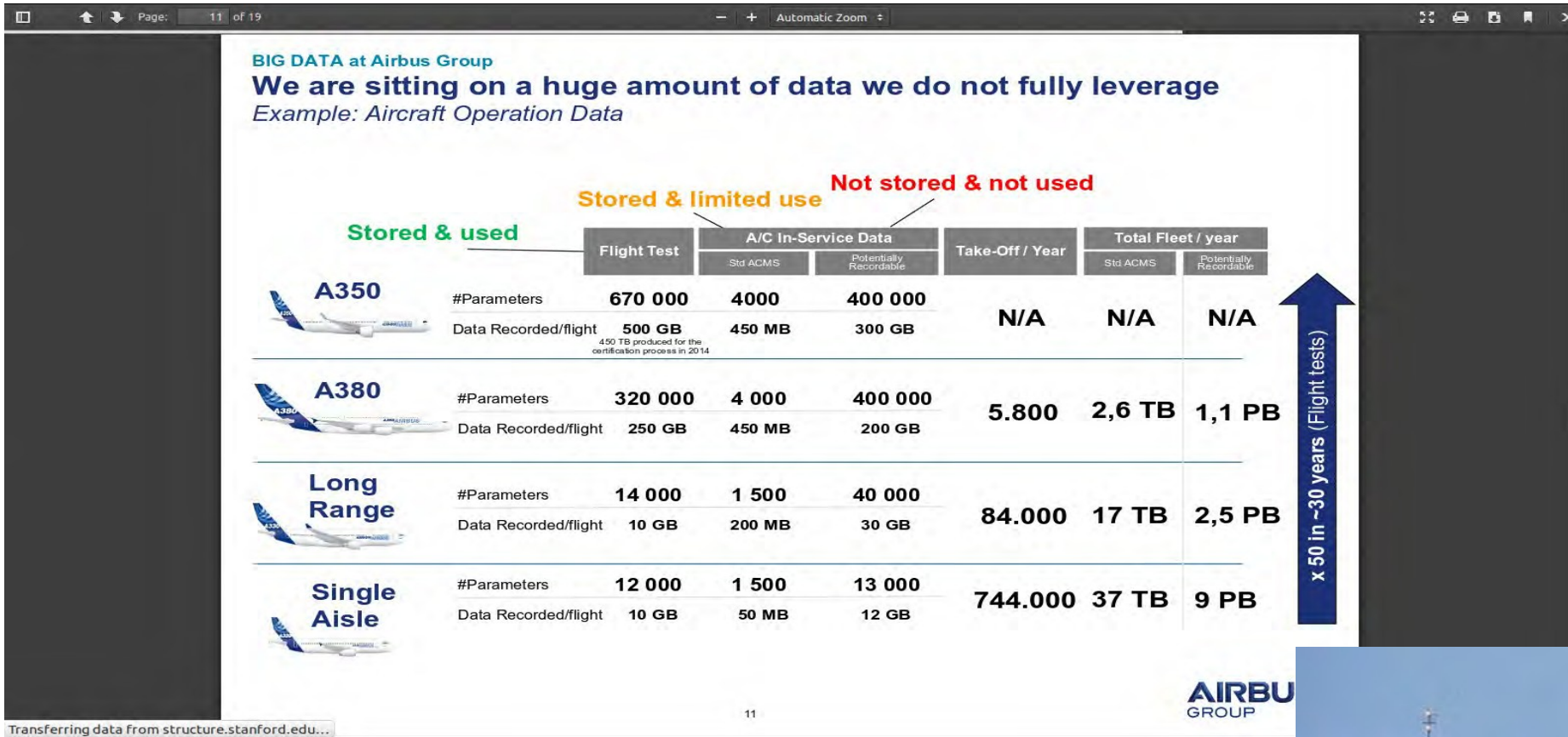
Exemples :

- Chaque jour à minuit pile le capteur « lève » ses entrées et s'auto injecte un signal arbitraire à réponse connue
- On donne un choc calibré dont on attend une réponse connue → on ausculte aussi l'instrumentation !
- On donne un choc à un instant précis dont on vérifie la bonne datation
-



4) Enjeux Scientifiques et techniques de demain

4.3) La production de données massives



Transferring data from structure.stanford.edu...

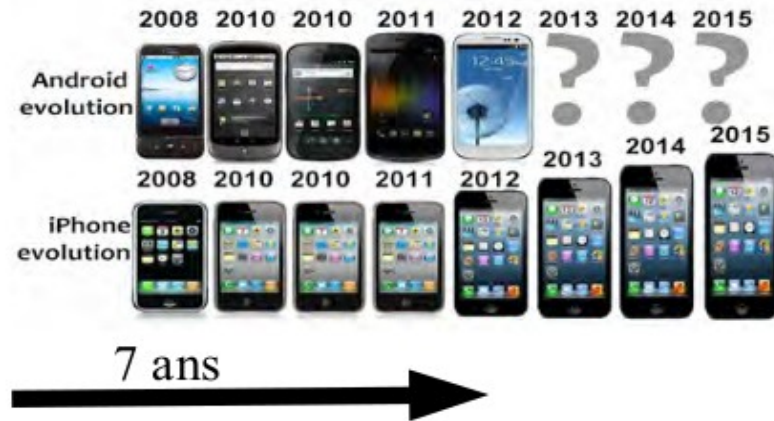
Quelles solutions ?

- Prise de conscience : il est facile de produire des datas. Réfléchir à leur utilité, leur disponibilité ...
- Décider en amont de l'instrumentation la part « évanescence » des données et la part « nécessaire »



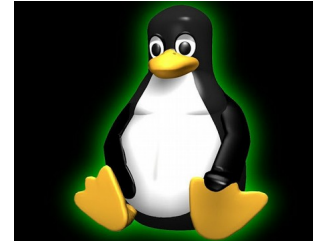
4) Enjeux Scientifiques et techniques de demain

4.4) L'obsolescence technologique



Quelles solutions ?

- Développer une science portable. La plus possible...
- Votre algorithme sera toujours valable dans 5 ou 30 ans...pas votre carte électronique
- Des critères d'ACV pour le design de l'instrumentation



2000 ans



5) Conclusions & perspectives

- L'épanouissement massif des réseaux de capteurs sans fil **est moins une question de technologie que de répondre à des besoins opératoires. Ces besoins dépassent la simple 'mesure physique'**
- Les véritables enjeux **pour monitorer 1 / 10 / 30 ans** résident dans :
 - Les outils d'aide au déploiement
 - La confiance métrologique au fil du temps
 - L'intelligence embarquée (synchronisation, auto-test...)
- Contre-intuitivement, en outdoor, les besoins sont +ou- bien couverts en **énergie** via les **panneaux solaires**. Cas du Génie Civil. Mais on peut réfléchir à l'**Analyse du Cycle de Vie (ACV) de l'instrumentation**
- **L'émergence et la convergence des protocoles Wireless** est à suivre et qualifier : Lora, 5G.... la surenchère des protocoles est aujourd'hui un frein !
- Dans tous les cas, œuvrer à plus **d'intelligence embarquée** pour :
 - Moins de data produites → moindre dépendance au réseau → couplage calcul/structure
 - Moins d'empreinte CO2 (énergie)
 - Des algorithmes plus portables
- De fortes attentes des utilisateurs ne sont pas encore comblées !
Cf Livre Blanc **SHM National à la Cofrend**, Groupes Stratégiques en construction



Merçi

