

# Tendances et challenges dans l'instrumentation des structures



**Vincent Le Cam**

**IFSTTAR**

Institut Français des Sciences et Technologies des Transports  
de l'Aménagement et des réseaux

Département **COSYS**

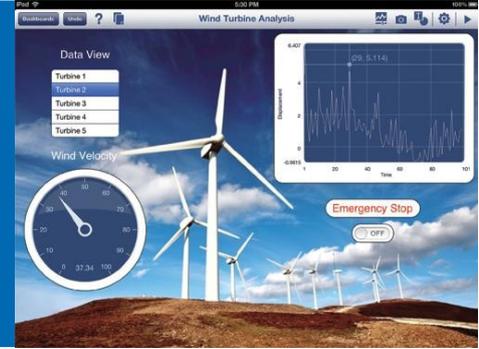
Laboratoire **SII**

Colloque Le Pont– Toulouse – 14 oct 2015



**IFSTTAR**

# Sommaire :



## 1) Contexte

- Structures à enjeux
- CND / SHM...

## 2) Zones Technologiques d'émergence

- Réseaux de capteurs sans fil  
( Marché, énergie, protocole...)
- Fibre Optique
- Autres tendances fortes
- *Marché de l'intelligence*
- REX



## 3) Conclusions / perspectives



# 1 - Contexte



Thématique phare : le *Structural Health Monitoring* (SHM)

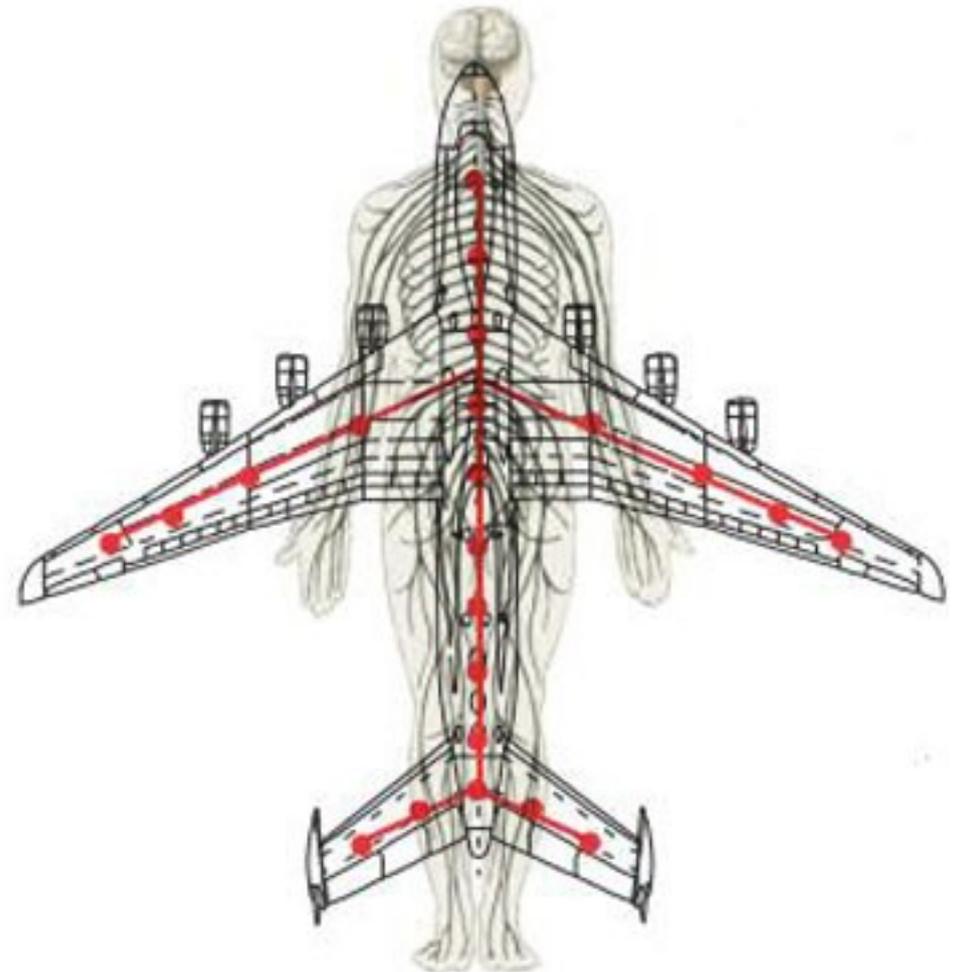
Le Suivi de la Santé des Structures

===

Structural Health Monitoring (SHM)

Analogie entre:

- **Le corps**
  - système nerveux et cerveau
- Un réseau de **capteurs** et un **ordinateur**



# 1 - Contexte



Champ d'application non exhaustif : **les structures “à enjeux”** d'une façon générale  
**Coté Pile...**



Civil engineering



Aerospace & Aeronautic



Energy

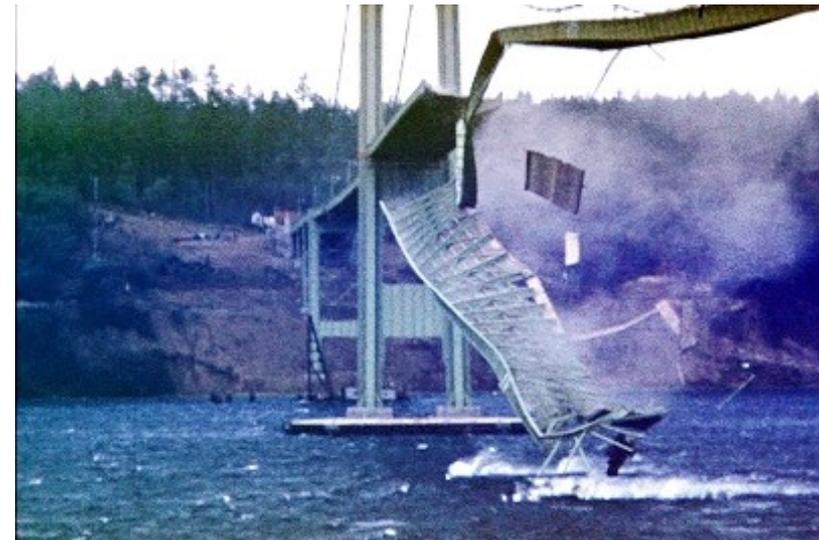


Transport

# 1 - Contexte



Champ d'application non exhaustif : **les structures "à enjeux"** d'une façon générale  
Et coté Face...



# 1 - Contexte



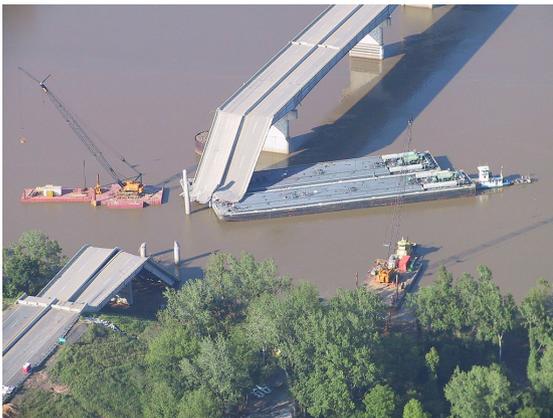
Champ d'application non exhaustif : **les structures “à enjeux”** d'une façon générale  
**Et coté Face...**



# 1 - Contexte



Champ d'application non exhaustif : **les structures “à enjeux”** d'une façon générale  
**Et coté Face...**



# 1 - Contexte



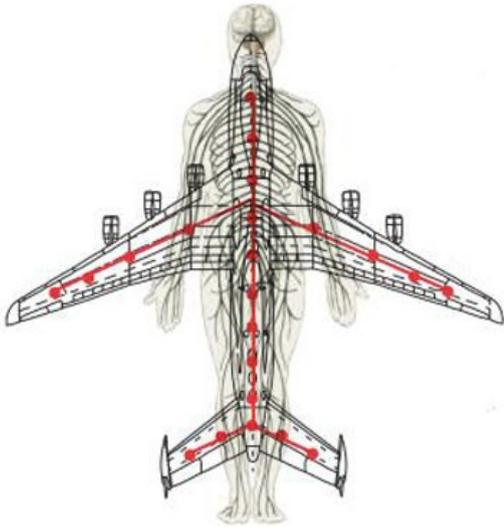
- Pas de réseau électrique
- Pas de réseau filaire 3G
- Grandes distances
- IP65
- “harsh environment”



# 1 - Contexte



## Structures à enjeux ... enjeux du Monitoring :



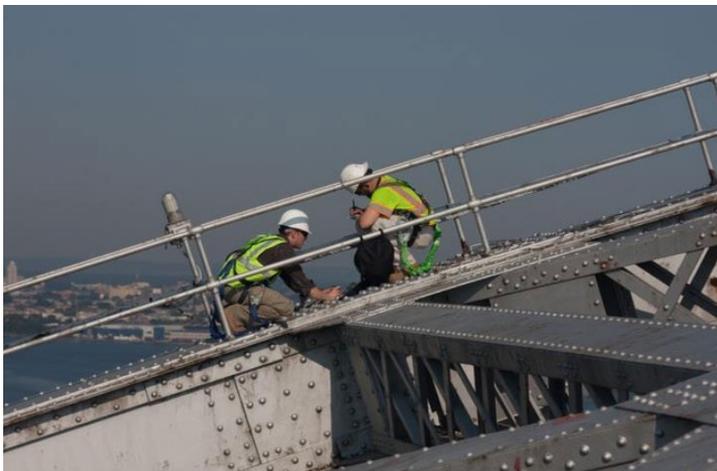
Une structure n'est pas une **vie humaine** mais beaucoup en dépendent...

Une **analogie qui a ses limites**... l'être humain finit par se *sentir* malade...et ira chez le médecin...pas le pont !

Enjeux du SHM : rendre les structures plus **intelligentes** :

→ capables de fournir un diagnostic sur leur état de santé et son évolution

→ aller plus loin que la “simple mesure” d'un signal. Un signal + un algorithme = donner un sens qualitatif voire quantitatif de la santé de l'ouvrage



# 1 - Contexte



## Le SHM doit :

- être un apport utile (qui a du sens) pour le gestionnaire de la structure
- compréhensible pour l'ingénieur / opérateur & gestionnaire. Intégrer les différents points de vue.

La fissure s'est agrandie de 3  $\mu\text{m}$



Ah !?! Faites détruire l'ouvrage



# 1 - Contexte



De nombreux réseaux structurés sous différentes formes autour du CND/SHM...



IWSHM



## 7<sup>th</sup> European Workshop on Structural Health Monitoring

2<sup>nd</sup> European Conference of the Prognostics and Health Management (PHM) society



July, 8 - 11, 2014 - Nantes, France



...

# 1 - Contexte



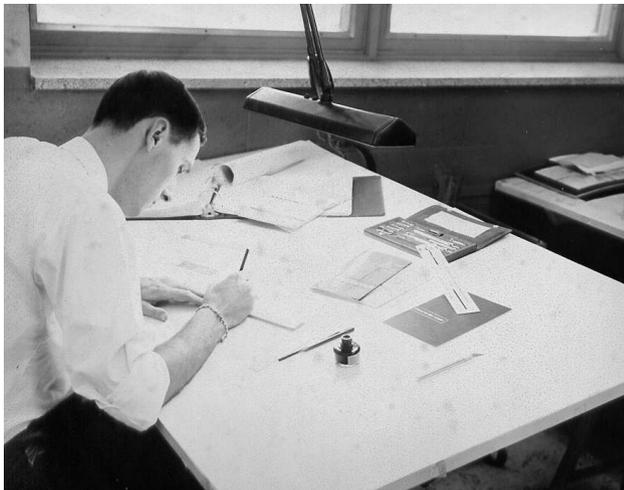
Qui dit Monitoring dit Technologies... or ...



**Moyen-age**



**Renaissance**



# 1 - Contexte



## Qui dit Monitoring dit Technologies... pour les acteurs du Monitoring

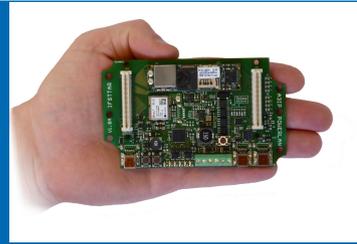
- se poser les bonnes questions, anticiper la Révolution Digitale
- faire des choix ne pas laisser venir...
- Echecs connus de mauvais choix ou d'absence de choix...



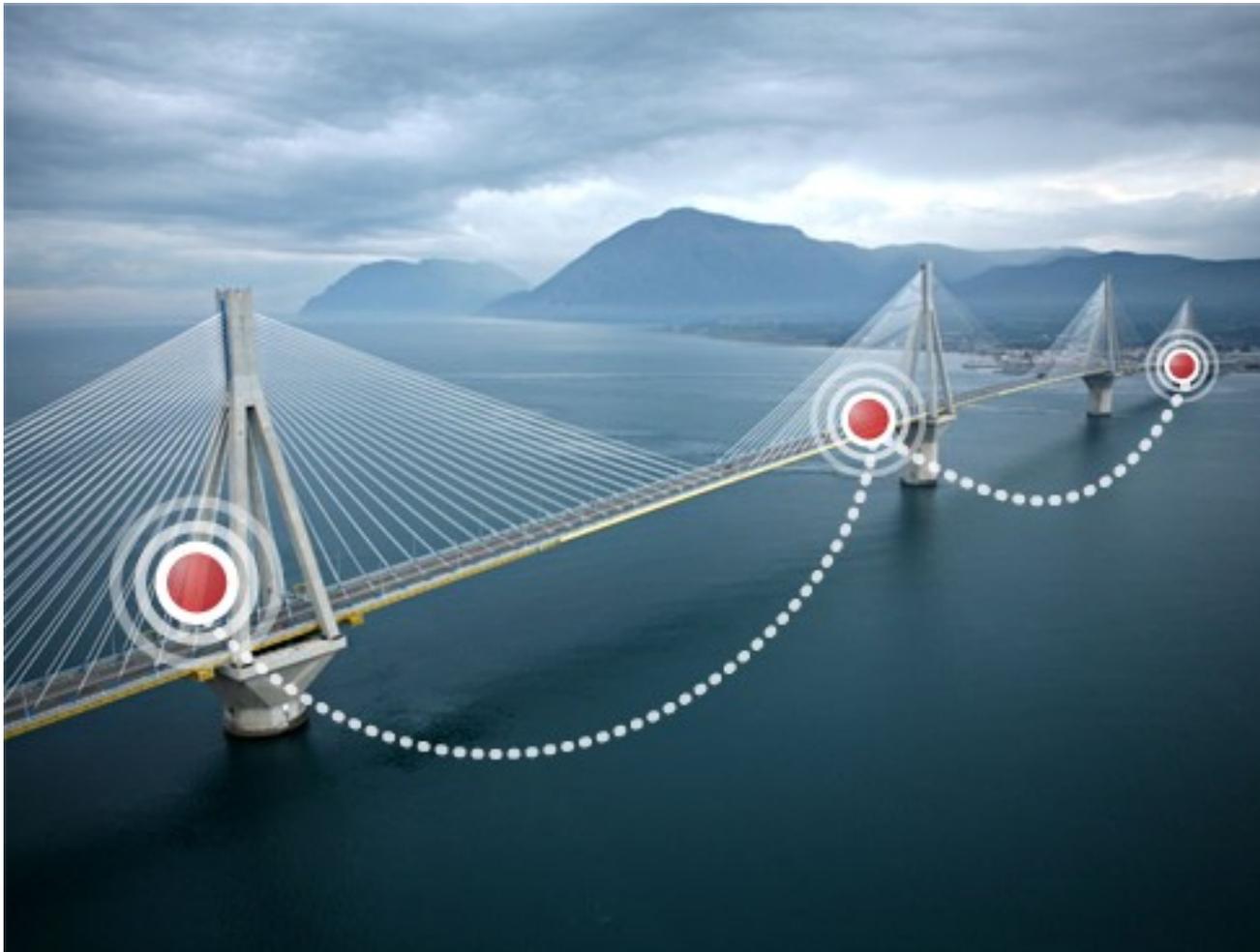
The Kodak logo, featuring the word 'Kodak' in red lowercase letters, centered between two horizontal yellow bars on a light grey background.



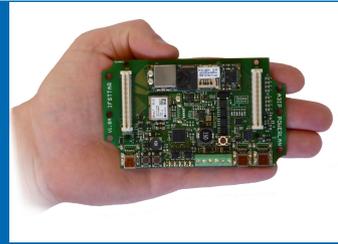
# 2- Emergence : capteurs sans-fil



L'apport des réseaux de capteurs sans-fil ...

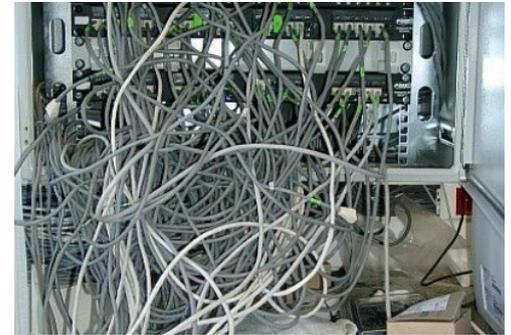


# 2- Emergence : capteurs sans-fil



## L'apport des réseaux de capteurs sans-fil ...

- On ne part pas de rien... une longue tradition de monitoring filaire des ouvrages
- Par nécessité ou par la norme (nucléaire, aéronautique)
- Peu d'incitations sur la façon d'y parvenir, des solutions au coup par coup
- Peu de standards, beaucoup d'usines à gaz...  
Très **vulnérables**: fatigue, usure, corrosion, étanchéité...  
CEM, foudre, effet peau/antenne
- Solutions filaires **très onéreuses**



# 2- Emergence : capteurs sans-fil



## L'apport des réseaux de capteurs sans-fil ...

- On ne part pas de rien... un vrai marché existe :
  - Des **besoins** des gestionnaires (Etat, CG, autoroutiers,...)
  - Des entreprises de **solutions** monitoring positionnées en ce sens
- Mais un secteur en attente **d'innovations... fortes !**



Advitam

diadeS  
Diagnostic et durabilité des structures



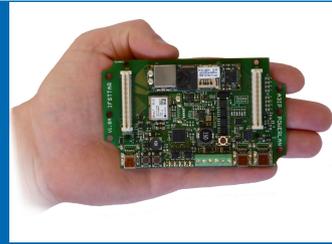
VCE  
Vienna Consulting  
Engineers ZT GmbH



acogec

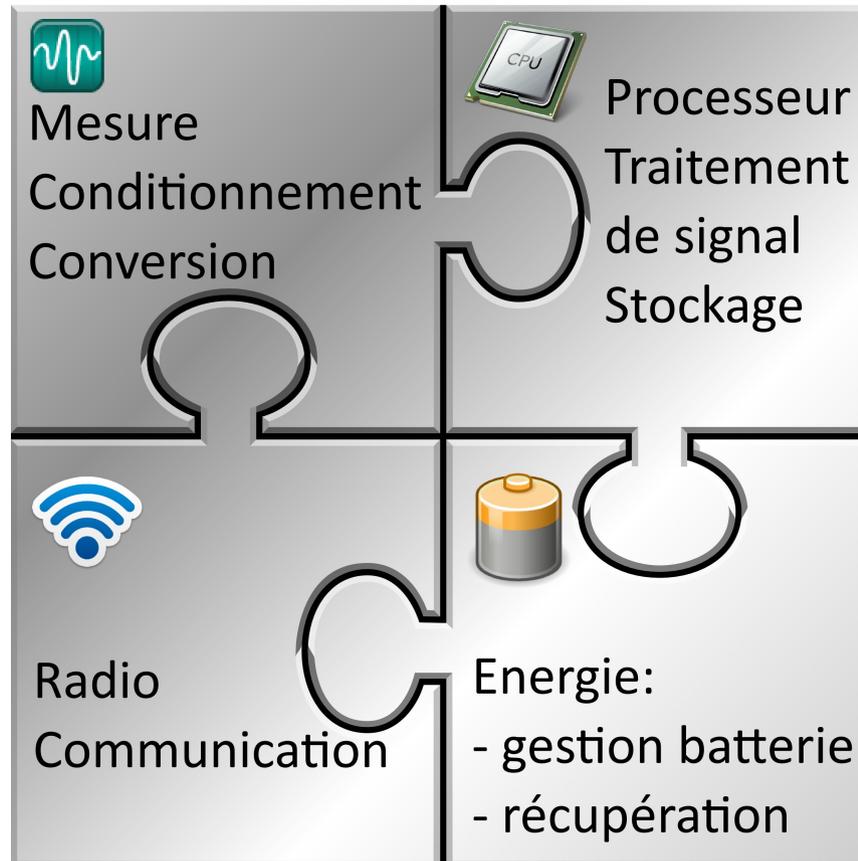
mageba  
Switzerland www.mageba.ch

# 2- Emergence : capteurs sans-fil



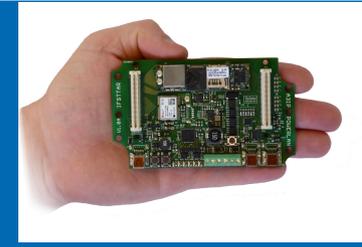
## L'apport des réseaux de capteurs sans-fil ...

- Sans-fil **et** intelligent
- Des capteurs qui font un peu plus que capter...

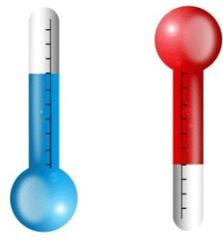
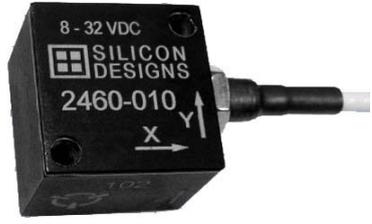


- La géolocalisation
- La synchronisation

# 2- Emergence : capteurs sans-fil

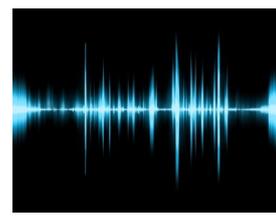


Quand on dit capteur ... de quoi parle -t-on au niveau physique ???

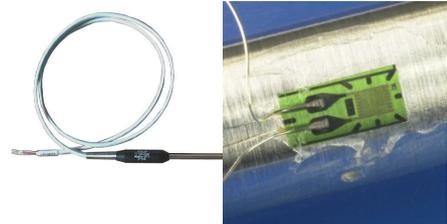
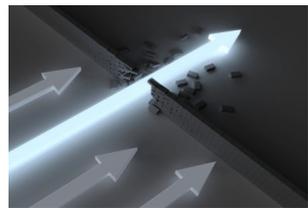
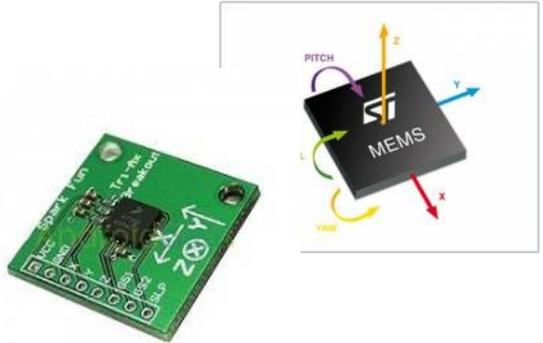


### Le Mouvement:

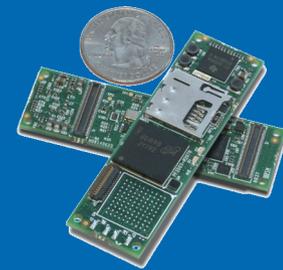
- Acceleration
- Vitesse
- Deplacement
  
- Chaleur
- Temperature
  
- Force
- Contraintes



...



# 2- Emergence : capteurs sans-fil

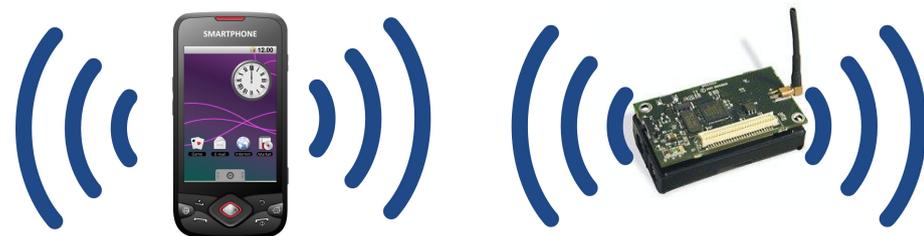


## Pourquoi ce “boom” des Capteurs Sans Fils – Wireless Sensor Network ?

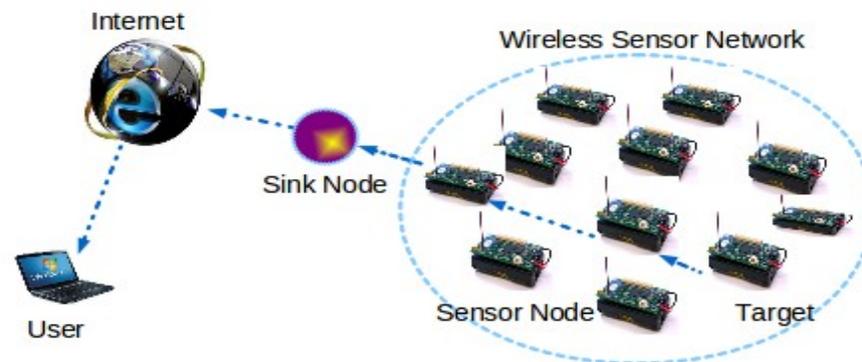
- Tendance mondiale à l'IOT : Internet Of Things – Internet des Objets.
- Pourquoi pas des objets “capteurs” ?

• *Merci* aux télécoms / téléphones portables :

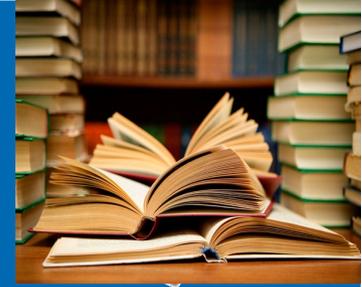
- La forte progression des batteries (mw.h/dm3)
- Les systèmes de récupération d'énergie
- Les protocoles sans-fil : WiFi, BlueTooth, Zigbee, 3/4G...
- La miniaturisation des systèmes



Internet



# 2- Emergence : capteurs sans-fil



Émergence de nombreuses offres de “capteurs sans-fils” industrielle



Airbean



Formic



Newsteo



Microstrain

Domotique

Structures

Bâtiment

...



Vantage



Michigan

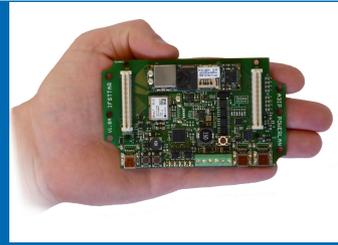


PEGASE



Pioneer

# 2- Emergence : capteurs sans-fil



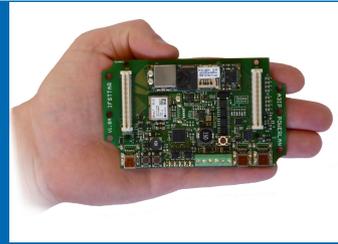
## Retours d'expérience...mitigés



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



# 2- Emergence : capteurs sans-fil

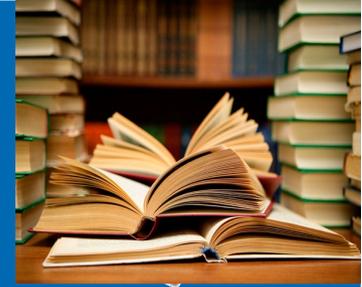


## Retours d'expérience...mitigés

- Syndrome Mac Cain ! Recherche Google  
« [Tout le monde en parle, personne n'en déploie](#) »  
Peu de déploiements massifs ! Très peu !!!
- **Pourquoi ?**
  - L'énergie :
    - Solutions autonomes (batteries) : souvent limitées
    - Drivées par la consommation, on en oublie le besoin client
    - Besoin d'une source externe...
  - Les protocoles :
    - Les limites du LAN
    - Le besoin du WAN
  - Quelques oublis ...la synchronisation ...
  - Besoin de maturer les technologies, de les standardiser



# 2- Emergence : capteurs sans-fil



## Émergence de nombreuses offres de “capteurs sans-fils”

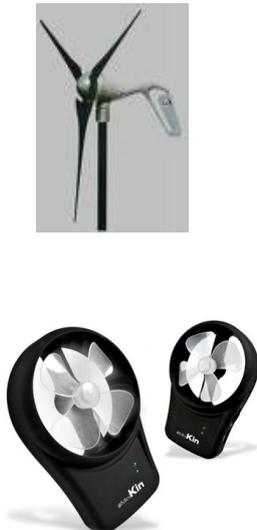
- Faire des systèmes qui consomment le moins possible...
- Mais cela a ses limites...
- Envisager la récupération d'énergie : [tour d'horizon...](#)

~100 mW au W



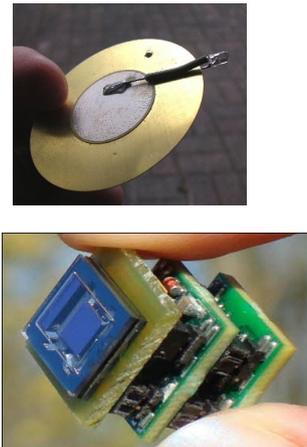
Solaire

~10aines W



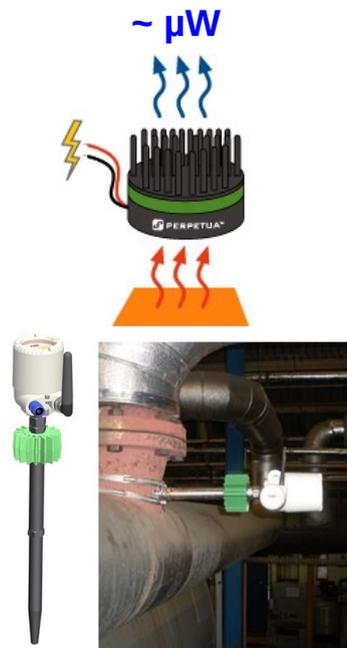
Vent

~ 10aine  $\mu$ W



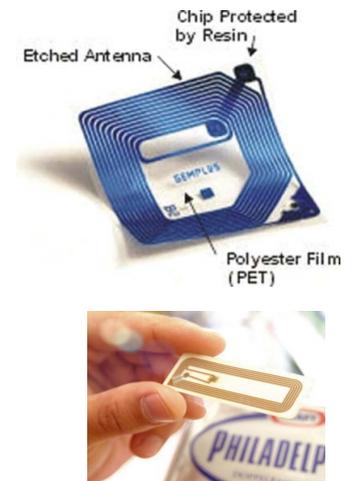
Vibration

~  $\mu$ W



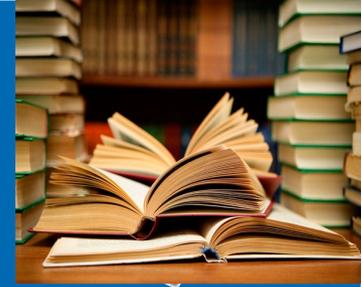
Chaleur

W < 0



E.M.

# 2- Emergence : capteurs sans-fil



## Avenir :

- Le rendement des panneaux solaires... améliorations des performances des batteries de stockage : intégration mW.h/dm<sup>3</sup>, nb de cycles, rapidité de recharge, autodécharge...
- Nouvelles sources d'énergie...

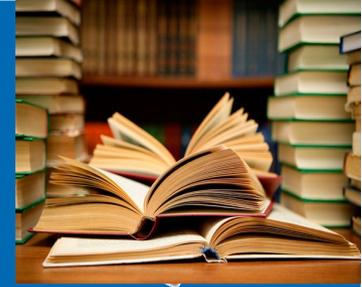


Solaire



Le souffle de l'air...

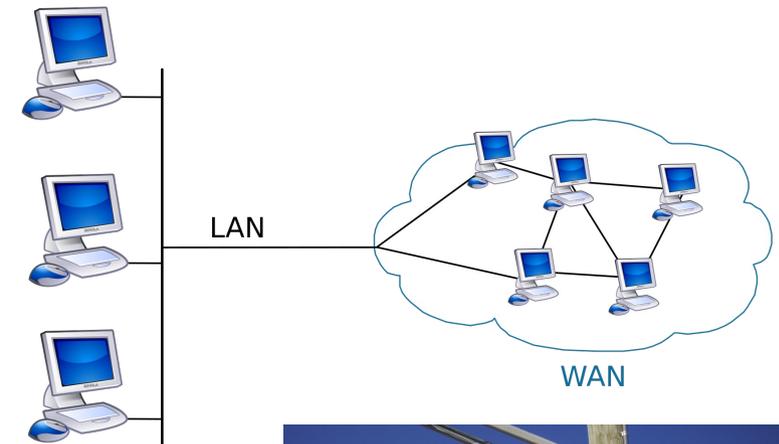
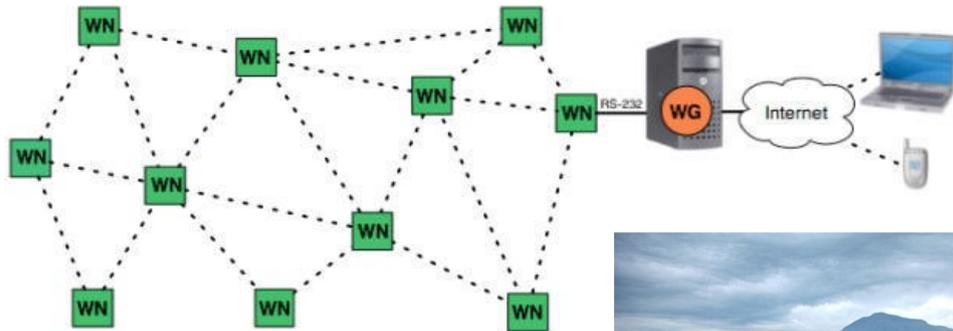
# 2- Emergence : capteurs sans-fil



Dans la jungle des protocoles sans fil qui va l'emporter ?

Deux constats des limites à franchir :

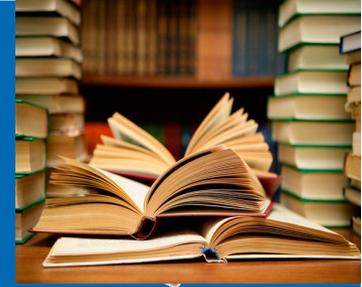
- Échec relatif des protocoles Multisaut : chemins critiques, dépendance fortes, énergivore, vulnérabilité
- Difficulté et coût du passage du LAN au WAN



**Théorie vs  
Pratique**



# 2- Emergence : capteurs sans-fil



Alors dans la jungle des protocoles sans fil qui va l'emporter ?



ZigBee™



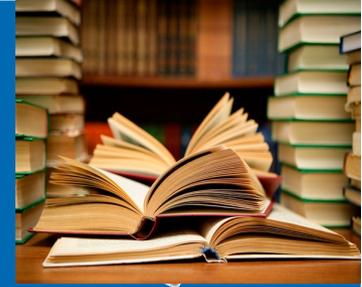
Avenir :

Des réseaux d'opérateurs dédiés Réseaux de Capteurs

Déploiement en cours !



# 2- Emergence : capteurs sans-fil



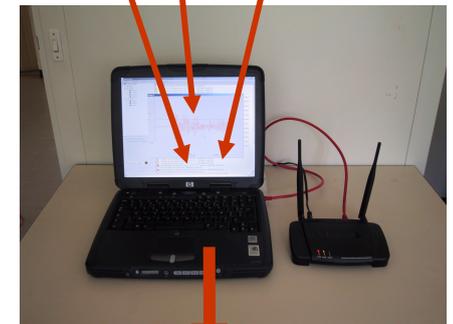
Trop souvent oubliée ou négligée...

**LA SYNCHRONISATION** des capteurs sans-fil

- D'une façon générale **l'homme acquiert en F(temps)**
- Or la datation des données captée est primordiale :
  - Vibration
  - Acoustique
  - Géophysique

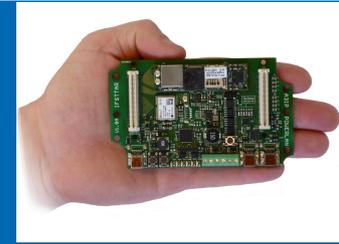
Or sans top synchro filaire, les compteurs de temps des **systèmes électroniques** (i.e. les quartz) **dérivent vite !**

Solution PEGASE @ IFSTTAR sur plateforme Pegase : **synchronisation UTC à 1  $\mu$ S** à base de GPS.



**Alerte !**

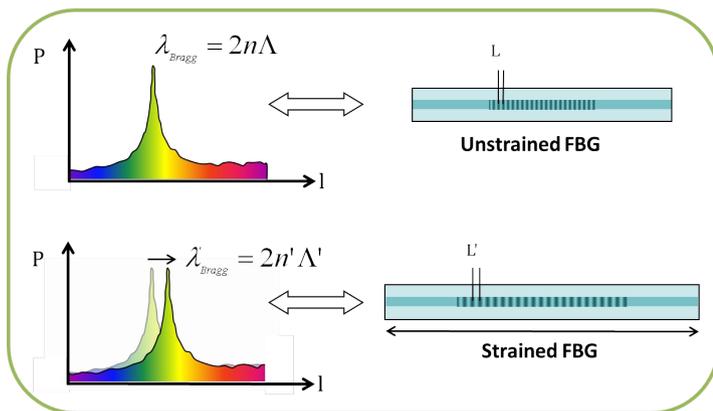
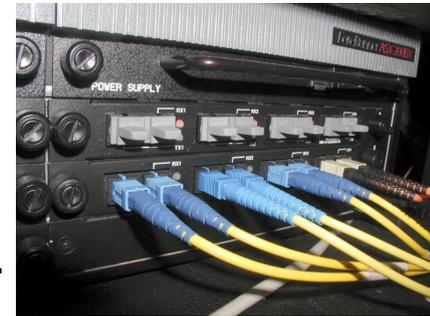
# 2- Emergence : la Fibre Optique



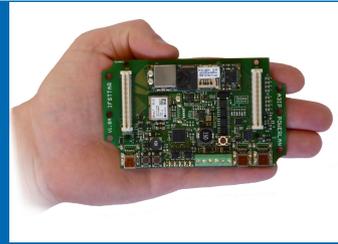
Boom de la mesure par **Fibre Optique** !

## Avantages et caractéristiques de la FO :

- Mesure non pas ponctuelle mais **répartie ou plein champ**
- Capteur de déformation, mouvement, température, stress, délamination...
- Fibre = très faible coût
- Immune à la CEM
- Scientifique 2 catégories d'effets:
  - Réseau de **Bragg**
    - Interrogation de la fibre à des endroits précis
  - Effet Raman, **Brillouin**, Rayleigh
    - Interrogation de la fibre de façon répartie jusque 1/10 km



# 2- Emergence : la Fibre Optique



Boom de la mesure par **Fibre Optique** !

## Difficultés de la FO :

- End -user souvent + intéressé par la mesure dans le béton qu'en surface **or** peu de fibres coulées nativement
- Interrogeurs optiques :
  - Très chers
  - Difficiles à autonomiser / à demeure

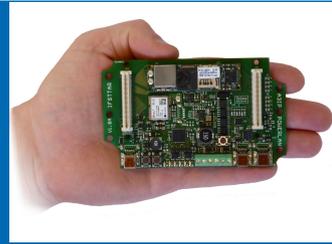


## R&D :

- Sur l'enrobage des fibres et leur vieillissement dans le béton
- Badifops : BFUP instrumenté par FO
- Maturer les techniques de coulage, collage, repérage du chemin réel de la fibre...
- Exporter/utiliser la savoir-faire et le REX de l'aérospace



# 2- Emergence : la Fibre Optique



Surveillance de la santé structurelle du Pont Wadi Leban en Arabie Saoudite : une instrumentation 100% fibre optique

Back



Drawing

Temperature	41.95 °C
Relative Humidity	11.36 %RH
2013-8-10 15:55	

Tilt Pillar 2 71.71 °  
2013-8-10 15:55

Tilt Pillar 1 -0.51 °  
2013-8-10 15:55

Deflection2 0.90 mm  
Deflection3 0.90 mm  
2013-8-10 15:55

Displacement1 37.05 mm  
2013-8-10 15:55

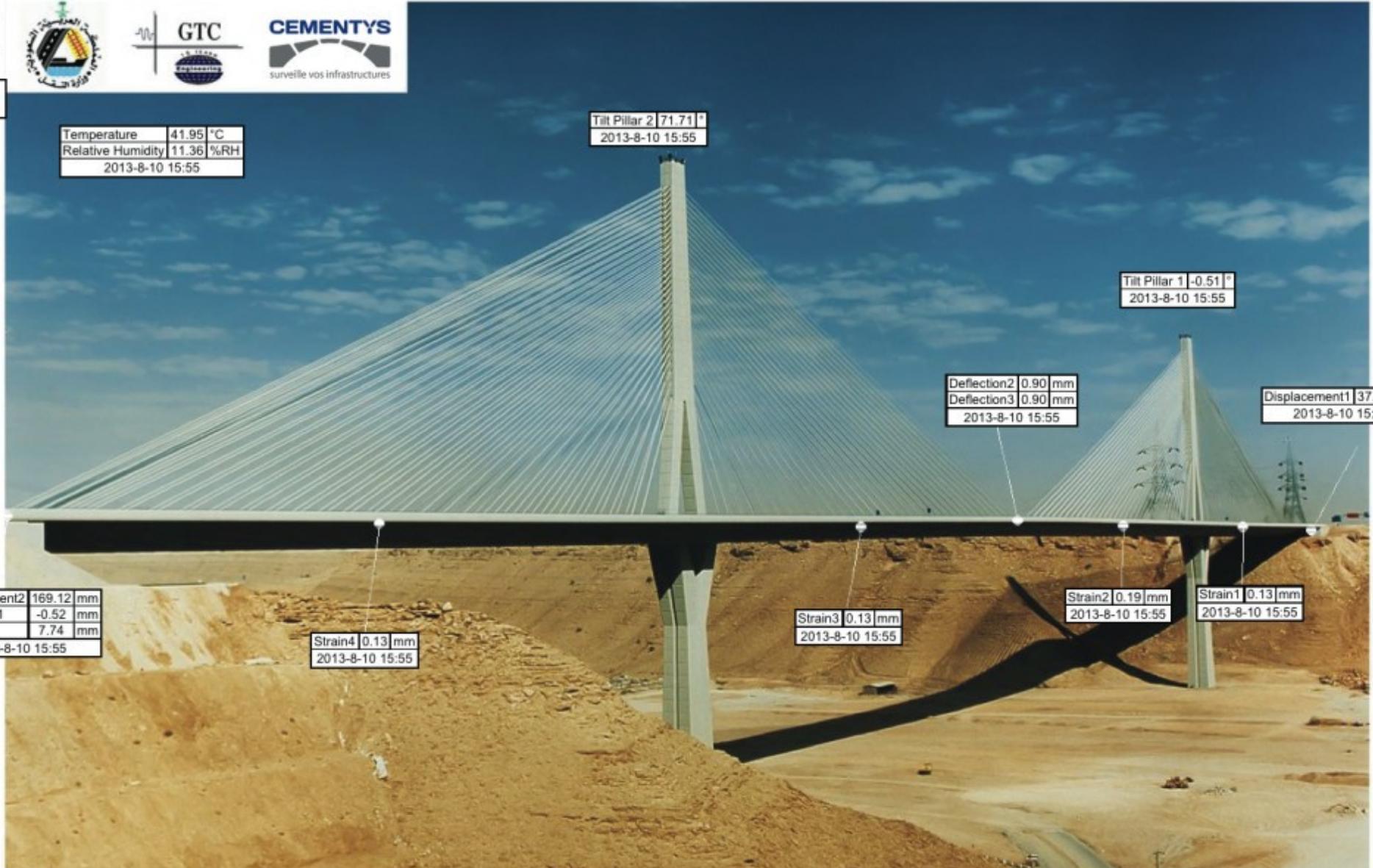
Displacement2	169.12 mm
Deflection1	-0.52 mm
Crack	7.74 mm
2013-8-10 15:55	

Strain4 0.13 mm  
2013-8-10 15:55

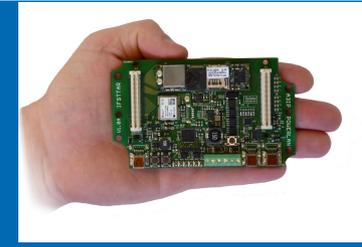
Strain3 0.13 mm  
2013-8-10 15:55

Strain2 0.19 mm  
2013-8-10 15:55

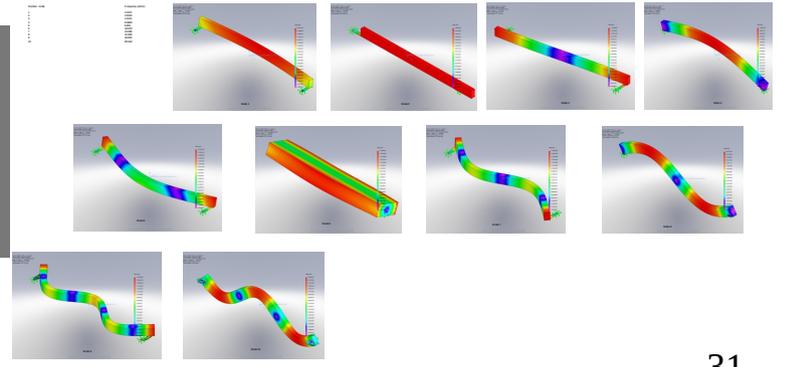
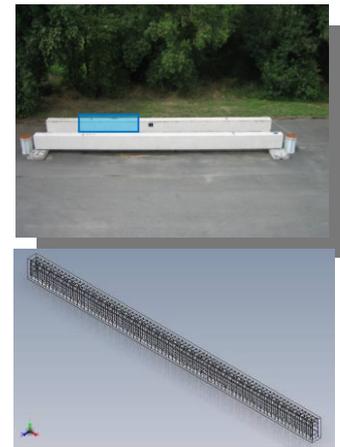
Strain1 0.13 mm  
2013-8-10 15:55



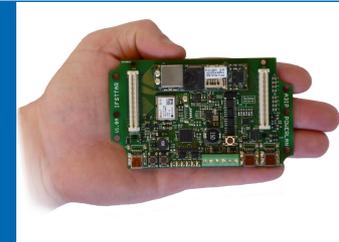
# 2- Emergence : capteurs d'Images



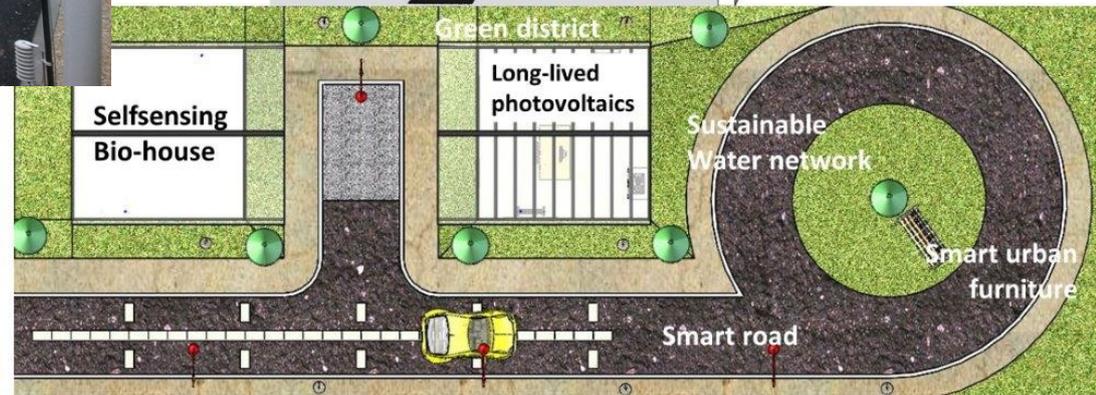
- Caméra et appareil photo numérique:**
- Capteur d'images ou de vidéos (Exemple : métro de Londres)
  - Associés à du traitement d'image :
    - Surveillance du trafic
    - Déplacement et vibration des structures
    - ...
  - Thermographie Infra-rouge
    - - couteux mais ça baisse
    - + quantitatif (collage, fissuration) dans l'invisible



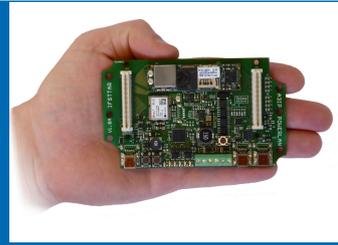
# 2- Emergence : un bon mix



**Sensecity : le mix de l'instrumentation répartie ou non**



# 2- Emergence : marché de l'intelligence



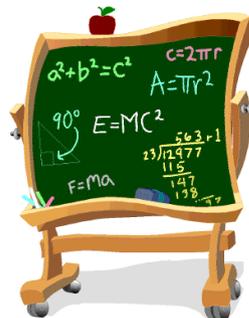
## Intelligence à deux niveaux

- Les **capteurs Sans-fil et intelligents** : exécuter les algorithmes (ou 1 partie) localement. Réduire le volume des données remontées au Superviseur
- **Supervision** : réception, gestion des données....mais aussi protection, sauvegarde, partage, historisation...

→ Le Big Data !



MODELE



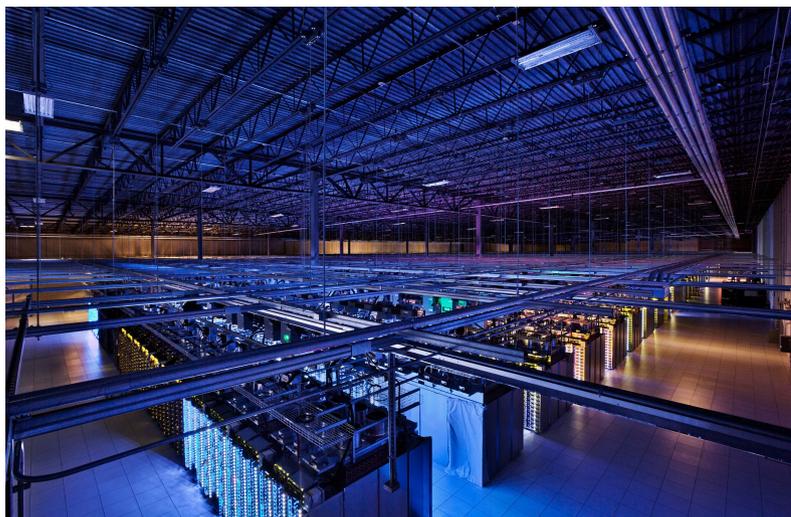
MESURE

# 2- Emergence : marché de l'intelligence

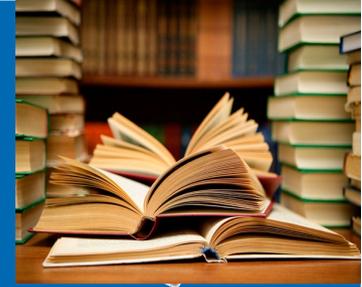


## Pourquoi tant de bruit sur le « Big Data »

- « ...et maintenant ? Que vais je faire ? De toutes ces données ? »
- Mot à la mode, connotation positive ...et pourtant, **Big Data** :
  - **1 zeta octet** produit par jour (1 exp 21 octets)
  - 7700 DVD
  - 1ère source de coût pour Google après masse salariale
- Coût en électricité (sauvegarde) et surtout maintien en disponibilité . Le vrai prix n'est pas encore atteint !



# 2- Emergence : marché de l'intelligence



## BIG DATA at Airbus Group

We are sitting on a huge amount of data we do not fully leverage

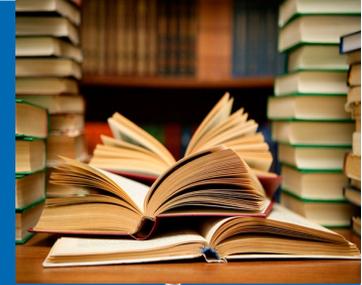
Example: Aircraft Operation Data

	Flight Test	A/C In-Service Data		Take-Off / Year	Total Fleet / year	
		Std ACMS	Potentially Recordable		Std ACMS	Potentially Recordable
 <b>A350</b> #Parameters: 670 000 Data Recorded/flight: 500 GB <small>450 TB produced for the certification process in 2014</small>	670 000	4000	400 000	N/A	N/A	N/A
 <b>A380</b> #Parameters: 320 000 Data Recorded/flight: 250 GB	320 000	4 000	400 000	5.800	2,6 TB	1,1 PB
 <b>Long Range</b> #Parameters: 14 000 Data Recorded/flight: 10 GB	14 000	1 500	40 000	84.000	17 TB	2,5 PB
 <b>Single Aisle</b> #Parameters: 12 000 Data Recorded/flight: 10 GB	12 000	1 500	13 000	744.000	37 TB	9 PB

Stored & used     
 Stored & limited use     
 Not stored & not used

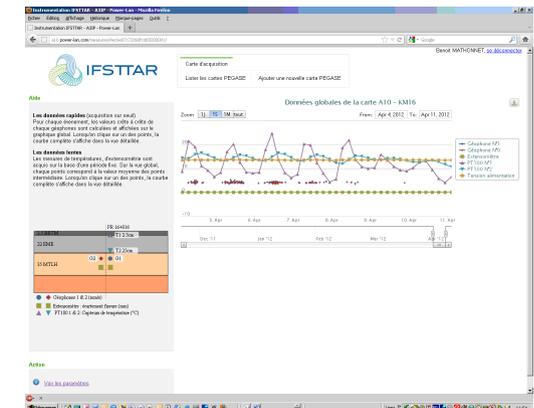
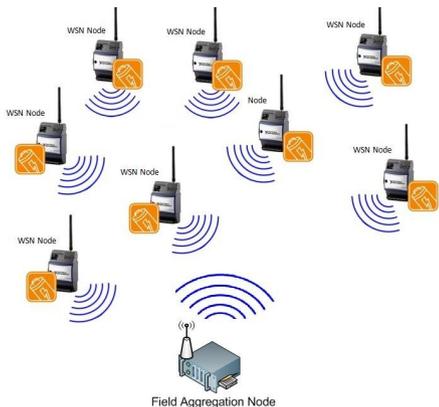
↑ x 50 in ~30 years (Flight tests)

# 2- Emergence : marché de l'intelligence

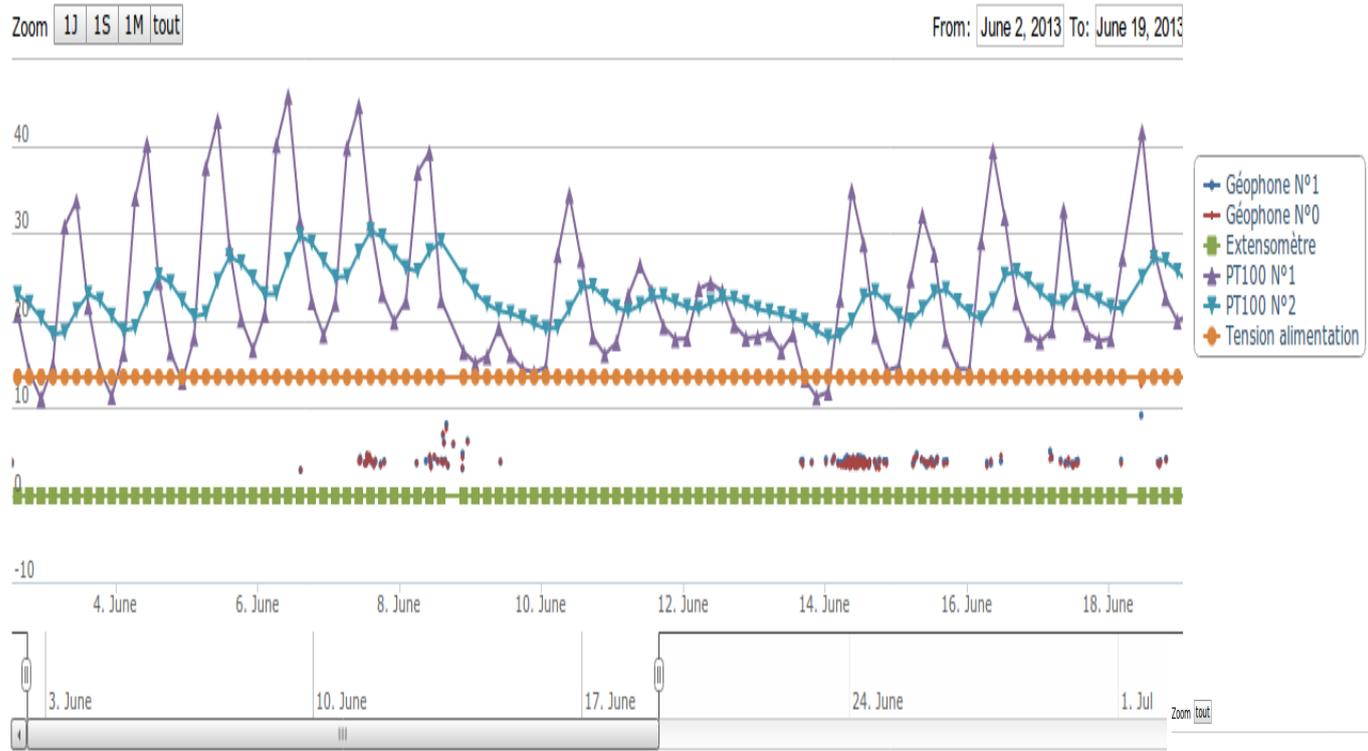
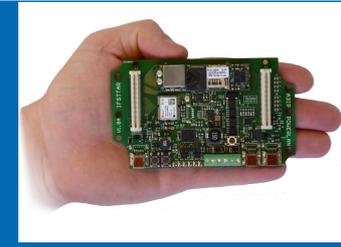


## Pourquoi tant de bruit sur le « Big Data »

- A terme le coût du stockage/maintien des datas représentera une part importante dans la chaîne de Monitoring
- Des capteurs plus intelligents = qui appliquent des algorithmes à la source
  - Pour en réduire le volume remonté
  - Pour se poser les bonnes questions !
  - Pour un capteur plus auto-adaptatif et plus fiable
  - ...
- **Mieux vaut les Smarts Data que les big data**



# 2- Emergence : capteurs d'Images



## Superviseur Générique IFSTTAR

- Cloud, sécurisé
- Big Data : MongoDB, sauvegarde
- Liens aux algos
- Multicapteurs

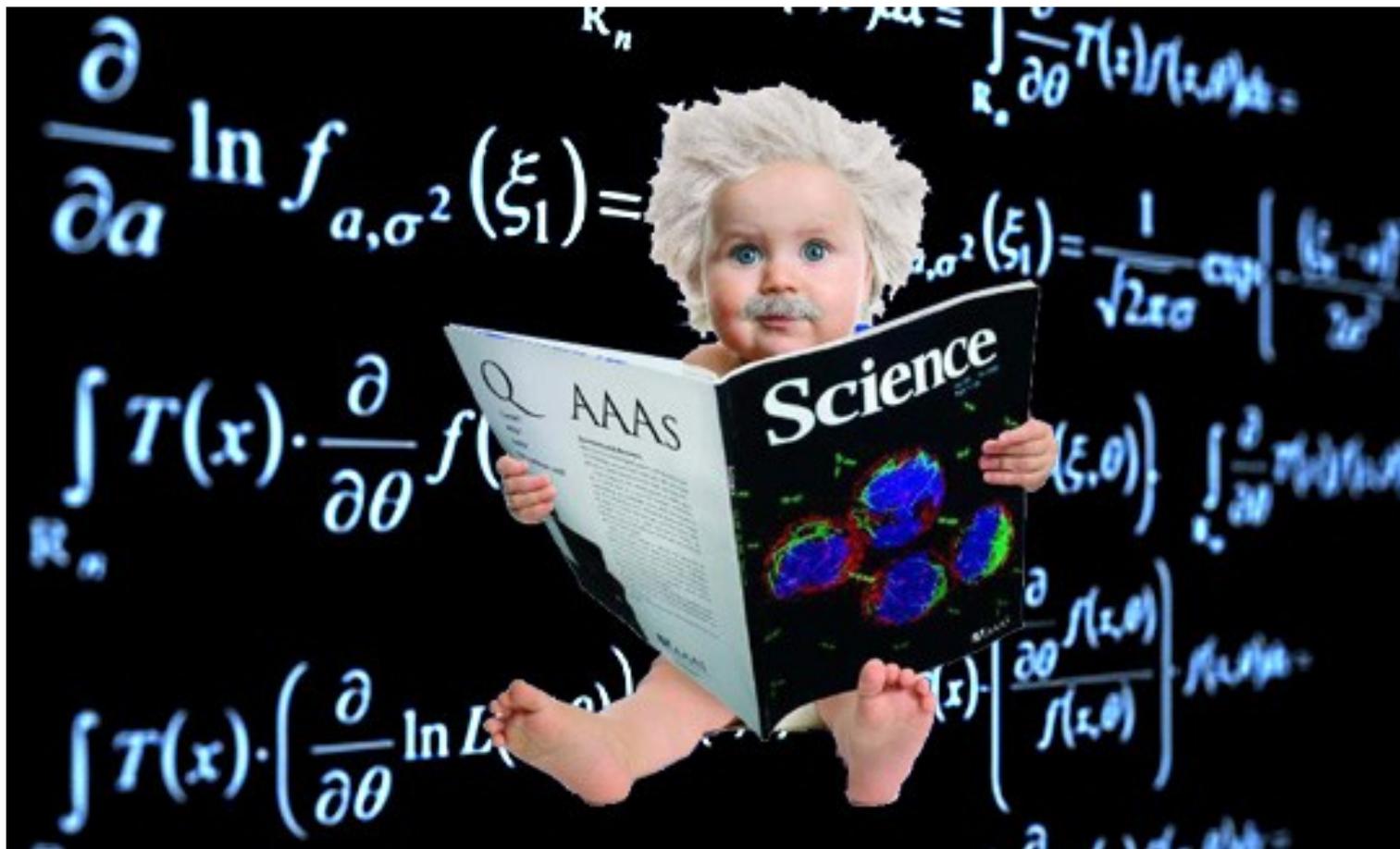


# 2- Emergence : marché de l'intelligence

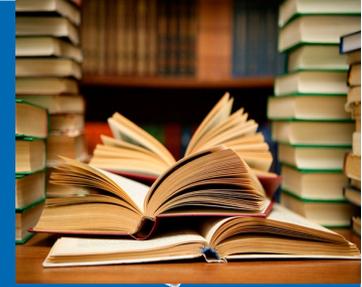


Mieux vaut les Smarts Data que les big data

→ Pladoyer pour plus de sciences (i.e. de modèles et d'algorithmes)



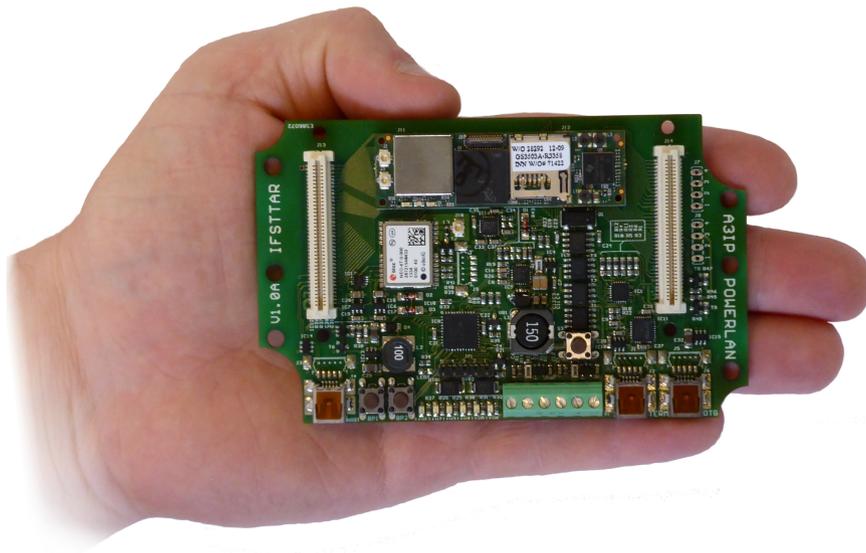
# 4- Illustration : la plateforme PEGASE d'Ifsttar



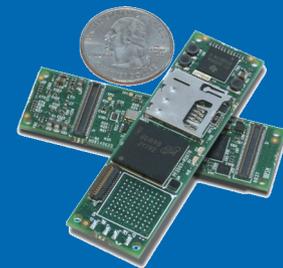
Ce que les Capteurs Intelligents permettent...

**REX sur le Système IFSTTAR**

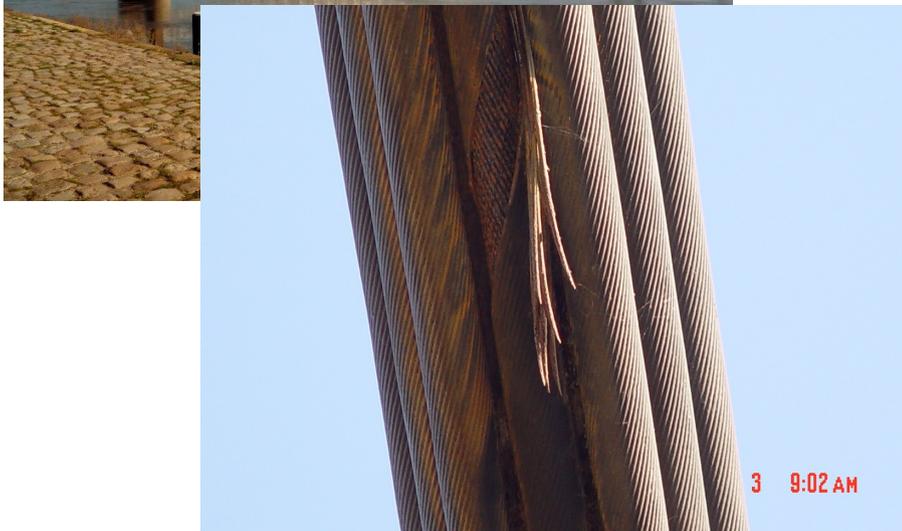
**PEGASE :**  
Plateforme **Experte Générique** pour **Applications Sans-fils Embarquées**



# 4- Illustration : la plateforme PEGASE d'Ifsttar



## Application 1 : Surveillance Acoustique des Câbles de pont

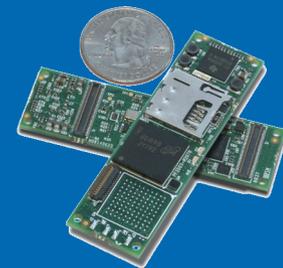


Pont d'Ancenis



Pont de Sully Sur Loire le 16 janvier 1985

# 4- Illustration : la plateforme PEGASE d'Ifsttar



## Application 1 : Surveillance Acoustique des Câbles de pont



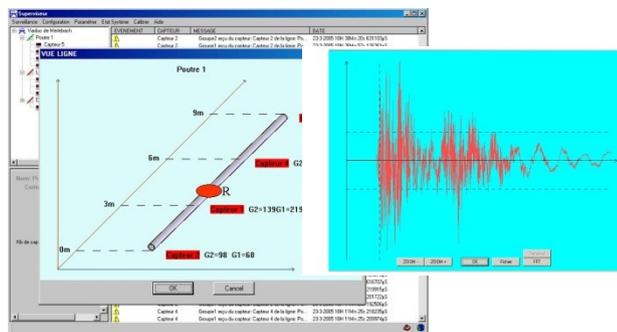
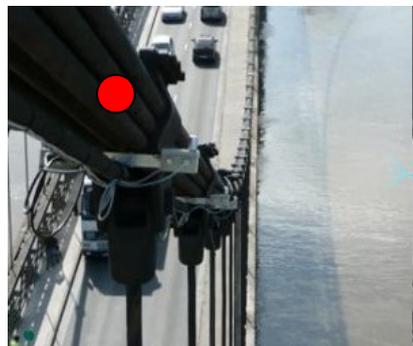
**Objectif :** Capteur acoustique pour la détection et la localisation de ruptures de fils dans les câbles de ponts

### Description :

Chaque PEGASE "écoute" le câble à **250 kHz** et date les « événements » acoustiques à qqs  $\mu\text{S}$  ! => **local**

Transmission sans fil à un Superviseur

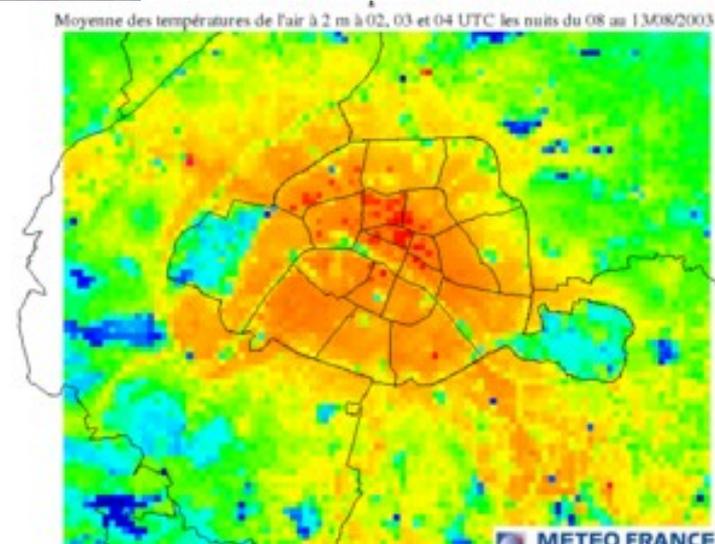
Localisation de la « rupture », envoi d'alarme...



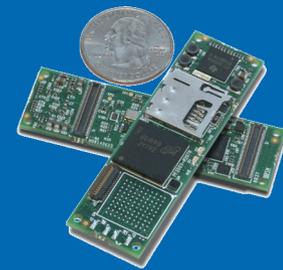
# 4- Illustration : la plateforme PEGASE d'Ifsttar



## Application 2 : Surveillance de Pollution Urbaine



# 4- Illustration : la plateforme PEGASE d'Ifsttar



## Application 2 : Surveillance de Pollution Urbaine – Les « Ilots de chaleur Urbain »



**Objectif :** Système autonome permettant de cartographier et caractériser les ICU

**Description :** PEGASE – pollution

Acquisition / analyse de grandeurs physiques variées :

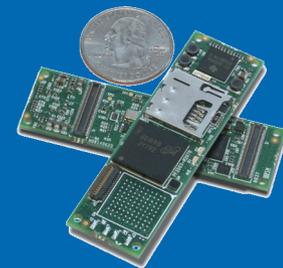
- Transmission WiFi directement ds BDD de l'opérateur
- Température
- Anémomètre
- Hygrométrie
- Sonomètre
- CO2
- Ensoleillement

**Application:** produit en 13 ex. dans Nancy agglo

Carte de **prévision des pics de pollution**



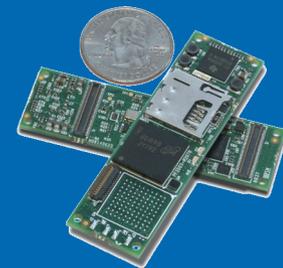
# 4- Illustration : la plateforme PEGASE d'Ifsttar



## Application 3 : Surveillance de la Fissuration - Extensométrie



# 4- Illustration : la plateforme PEGASE d'Ifsttar



## Application 3 : Surveillance de la Fissuration - Extensométrie



**Objectif** : Mesures multivoies de déformations d'un ouvrage

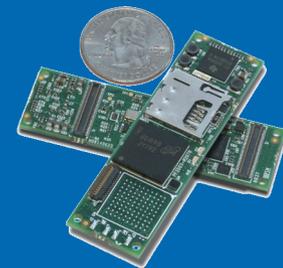
**Description** : PEGASE - fissuration

- Transmission sans fil en 3G/GSM à un Superviseur (très) distant
- Acquisition / analyse :
- 5 capteurs déplacement inductif
- 1 mesure de température

**Application** : Autonomie totale sur panneau solaire + batterie H24 / J365. Pont d'Hipsheim



# 4- Illustration : la plateforme PEGASE d'Ifsttar



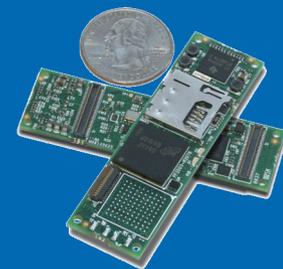
## Application 5 : Surveillance vibratoire des Portiques Autoroutiers et OA



Des kms de codes Matlab qui “tournent” en local



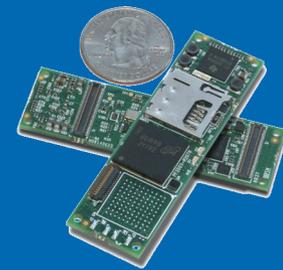
# 4- Illustration : la plateforme PEGASE d'Ifsttar



## Application 6 : Surveillance des crues – Scour Monitoring



# 4- Illustration : la plateforme PEGASE d'Ifsttar



## Application 7 : Surveillance des structures ferroviaires

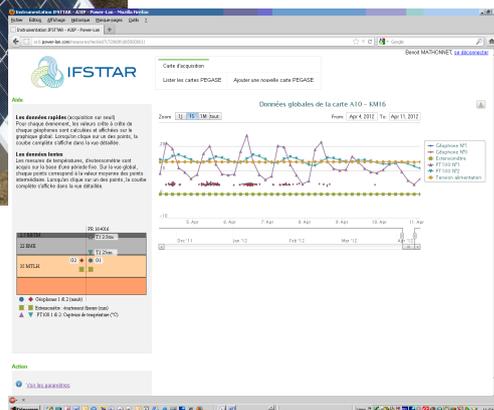


### Objectif (S) :

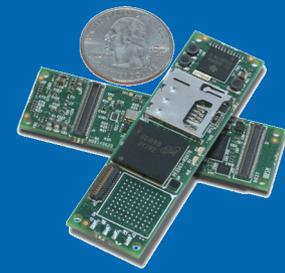
- Aider la **SNCF** à progresser dans l'instrumentation de terrain, autonome et wireless
- révolutionner la vision traditionnelle de la surveillance

Plusieurs systèmes variés à base de PEGASE pour suivre :

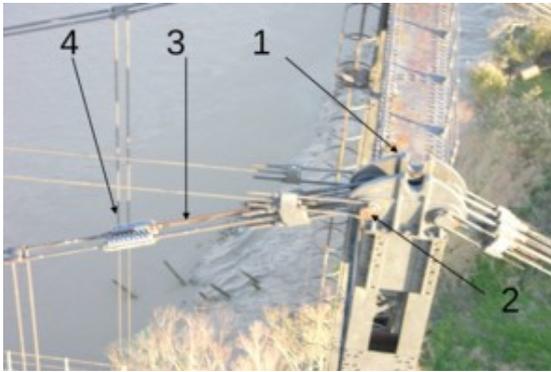
- La vibration au passage des trains
- Le comportement des nouvelles **chaussées béton**
- Le tassement des voies
- Les moteurs d'aiguille et de passage à niveau
- ...



# 4- Illustration : la plateforme PEGASE d'Ifsttar



## Application 8 : Surveillance par drone, etc, etc...



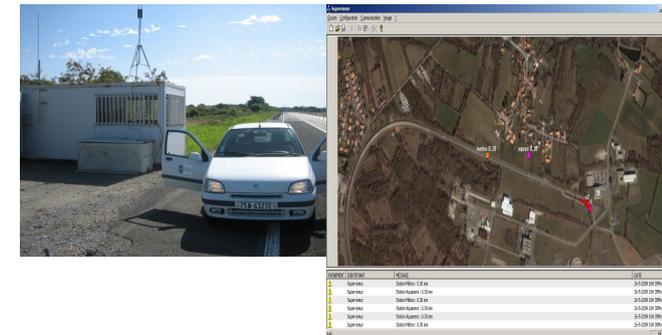
Monitoring poutre en béton



Monitoring par drone



Monitoring vent et acoustique



Monitoring du Traffic

# 3) Overview / perspectives



Prenons un de recul sur ces nouvelles technologies...



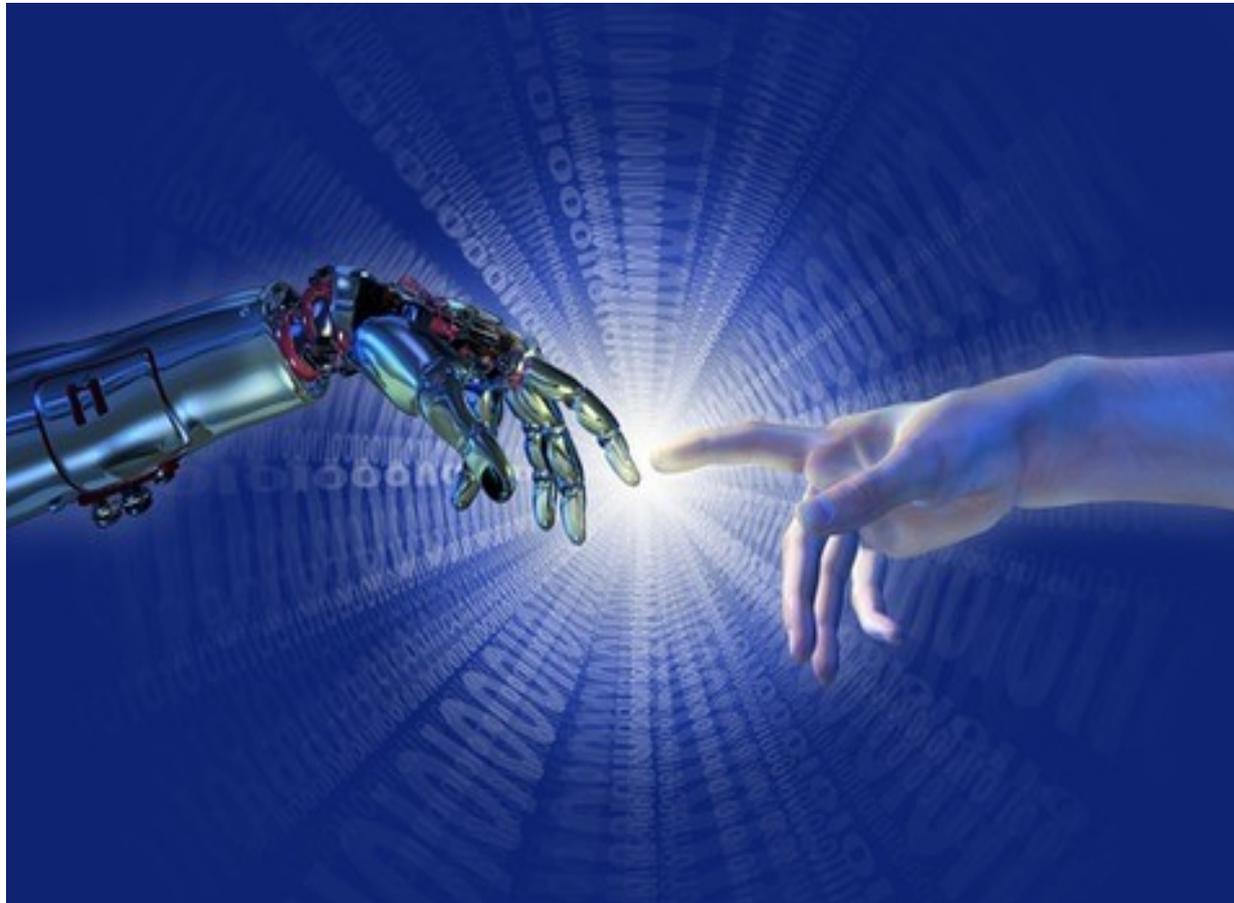
# 3) Overview / perspectives



**La technologie a fait des bons immenses... Qu'en fait on ?**

**Challenges:**

**Intégrer de la technologie par essence évolutive dans nos process métiers  
Faire les bons choix... mais selon quels critères ?**



# 3) Overview / perspectives



Quid du renouvellement technologique inhérent à l'électronique ?



Est on capable d'inventer de l'instrumentation native ?



2000 ans



# 3) Overview / perspectives



Prenons un peu de recul sur ces nouvelles technologies...



## Questions:

- Un système de capteur qui ne dit rien depuis 10 ans... cela signifie-t-il forcément que la structure va bien ?
- Quel confiance attribuer à mes données...au bout de 1 an ? 5 ans ? 50 ans ? ...

## Perspective:

- Imaginer des capteurs **ULTRA** intelligents
- Capables d'auto-diagnostic
- D'auto-étalonnage, procédure de tests ad'hoc
- ...



# 3) Overview / perspectives



Prenons un peu de recul sur ces nouvelles technologies...

## Réseau de capteur sans -fil : un business model à trouver

Syndrome “frites Mac Cain” : tout le monde en parle, personne n'en déploie !

- Si un capteur coûte 100 Euros
- Qu'il en faut 100 sur l'ouvrage
- Que chaque capteur coûte 5 Eur / mois (Sigfox)
- Qu'il faut changer les piles tous les 2 ans
- Etc...
- Ne va t on pas trouver moins cher d'envoyer une patrouille régulièrement ?



# 3) Overview / perspectives



Prenons un peu de recul sur ces nouvelles technologies...

## Réseau de capteur sans -fil : un business model à trouver

Et ce qui est vrai pour les ouvrages et les grandes structures est encore plus criant

- Pour la domotique
- Pour la ville numérique et sensible

Comment amortit-on des milliers d'Euros de capteurs ? Qui paie l'abonnement au réseau d'opérateur ? ...

**Il faudrait apporter la preuve que le SHM est rentable pour le gestionnaire ...**

**Quel est le ROI du SHM en Génie Civil ?**



# 3) Overview / perspectives



Prenons un peu de recul sur ces nouvelles technologies...

L'IOT qui annonce 2 milliards d'objets connectés d'ici 2020 !



- Poursuivre les efforts en électronique :
- Sur l'intégration
  - Le **coût**
  - La récupération **d'énergie**
  - Les **protocoles** : bande passante, **standardisation**, opérateur...
  - ...



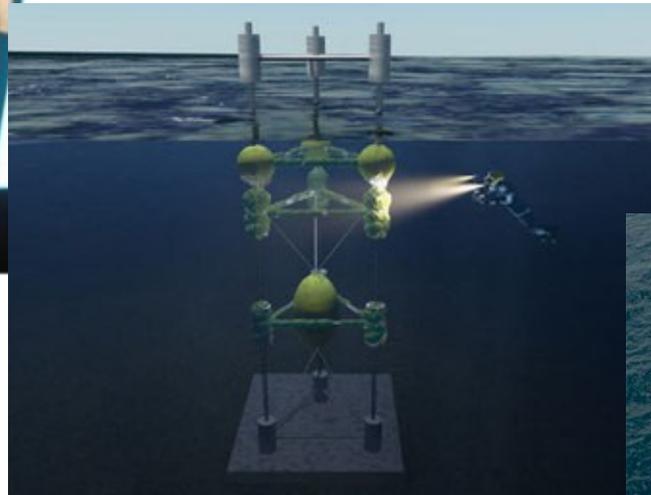
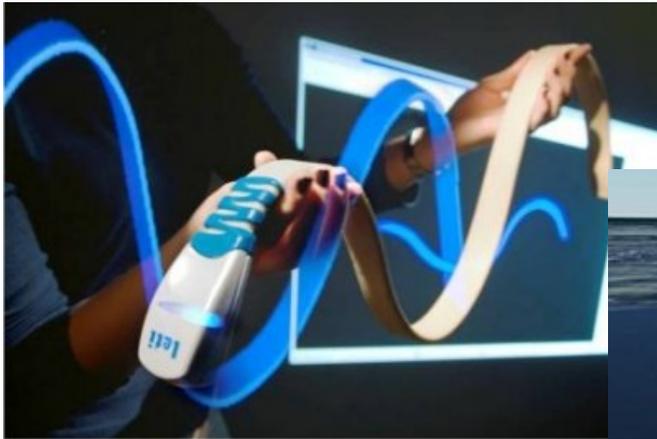
# 3) Overview / perspectives



**Prenons un peu de recul sur ces nouvelles technologies...**

Mais l'avenir n'attend pas... nouvelles structures de +en+ complexes → nouvelles instrumentations à imaginer !

Nouveaux éléments sensibles, couplage capteur/matériaux



# 3) Overview / perspectives



**Prenons un peu de recul sur ces nouvelles technologies...**

**Et demain un mix d'instrumentation : transport , énergie, capteur...**



# 3) Overview / perspectives



# 3) Overview / perspectives



