

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**

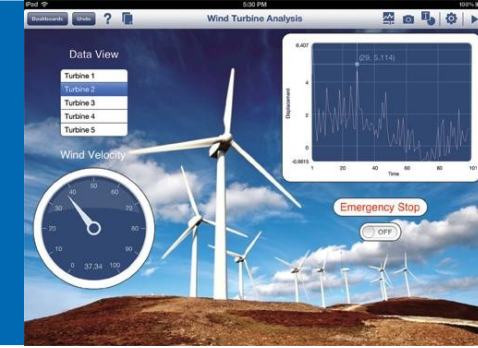
Laboratoire **SII**

Colloque Le Pont– Toulouse – 14 oct 2015



IFSTTAR

Sommaire :



1) Contexte

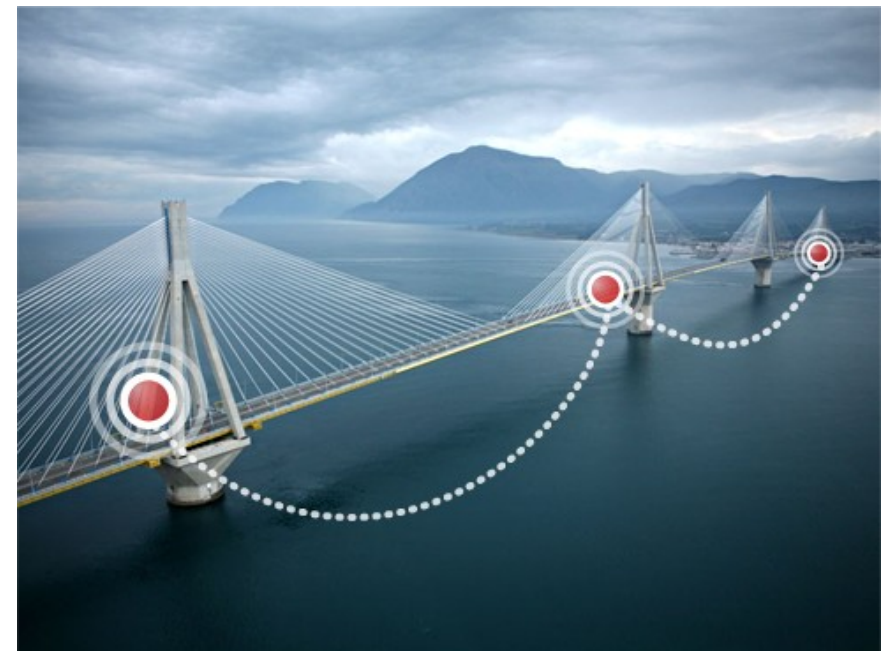
- Structures à enjeux
- CND / SHM...

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)

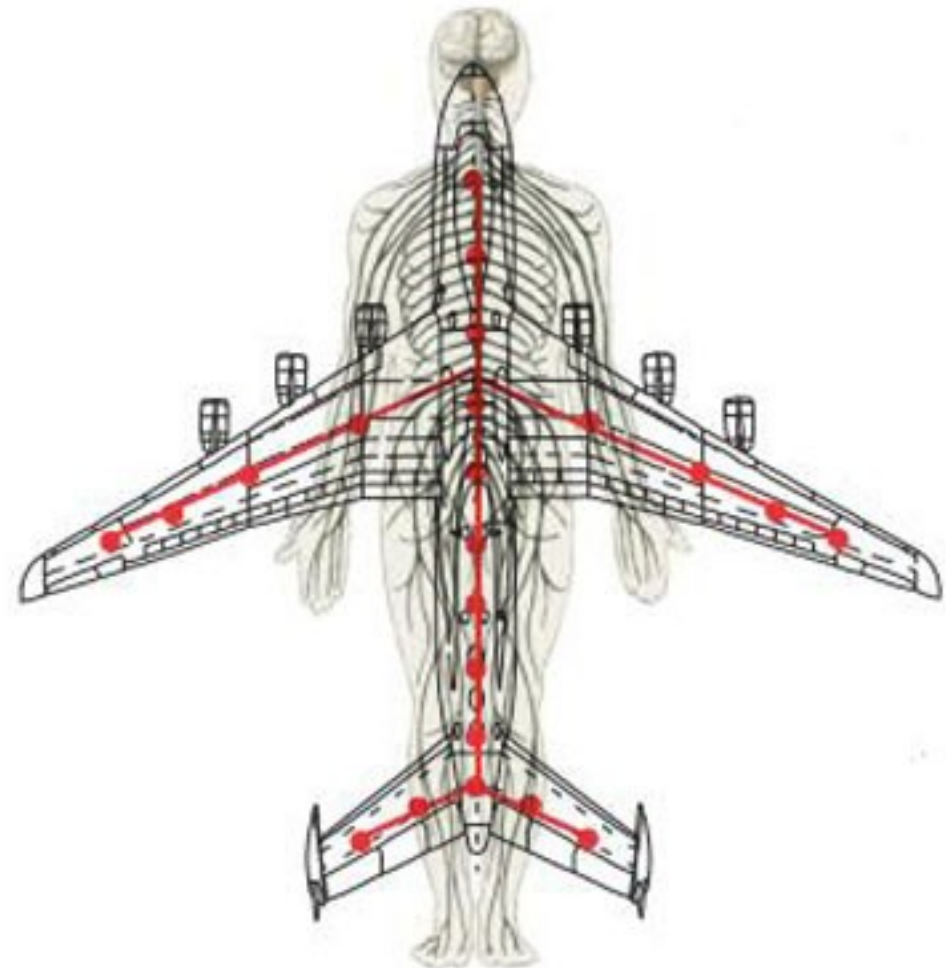
Le Suivi de la Santé des Structures

===

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



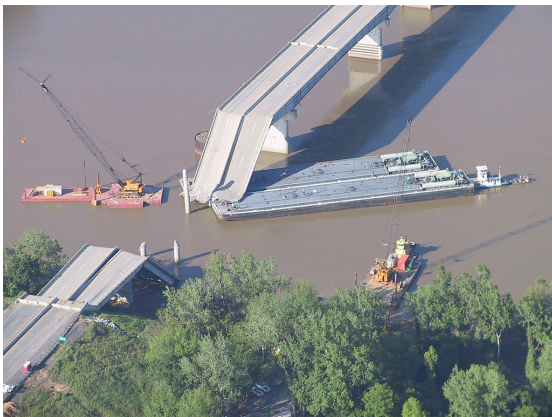
Champ d'application non exhaustif : **les structures "à enjeux"** d'une façon générale
Et coté Face...



1 - Contexte



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



1 - Contexte



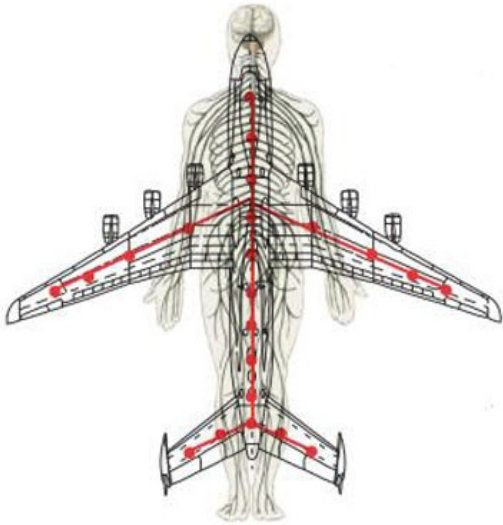
- Pas de réseau électrique
- Pas de réseau filaire 3G
- Grandes distances
- IP65
- “harsh environment”



1 - Contexte



Structures à enjeux ... enjeux du Monitoring :



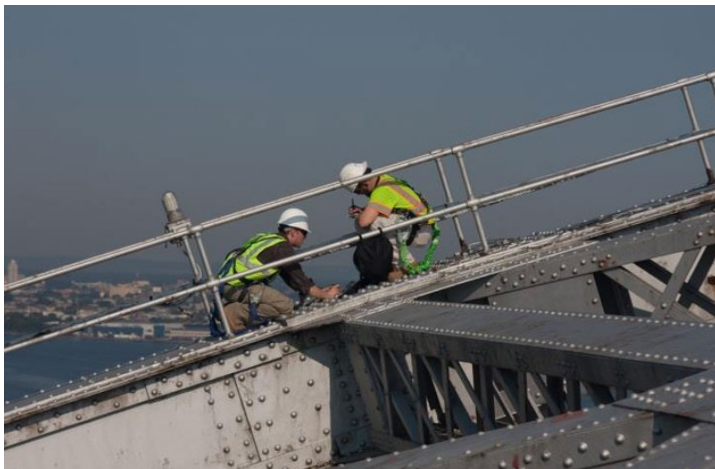
Une structure n'est pas une **vie humaine** mais beaucoup en dépendent...

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



7th European Workshop on Structural Health Monitoring

2nd European Conference of the Prognostics and Health Management (PHM) society



July, 8 - 11, 2014 - Nantes, France



...

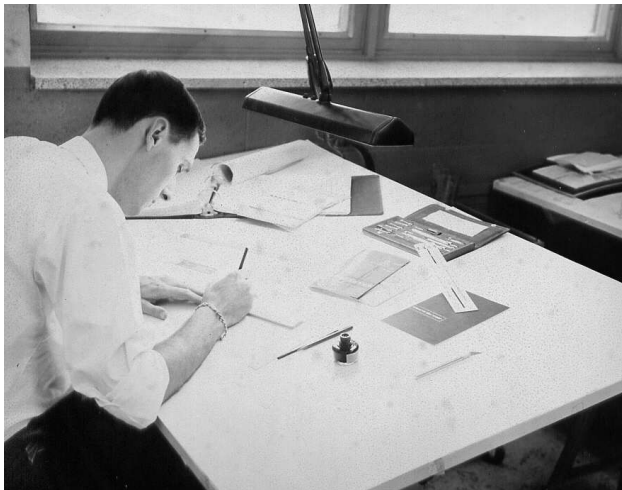
1 - Contexte



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



Moyen-age



Renaissance



1 - Contexte



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

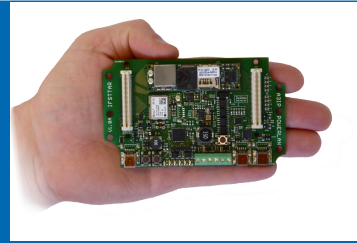
- se poser les bonnes questions, anticiper la Révolution Digitale
- faire des choix ne pas laisser venir...
- Echecs connus de mauvais choix ou d'absence de choix...



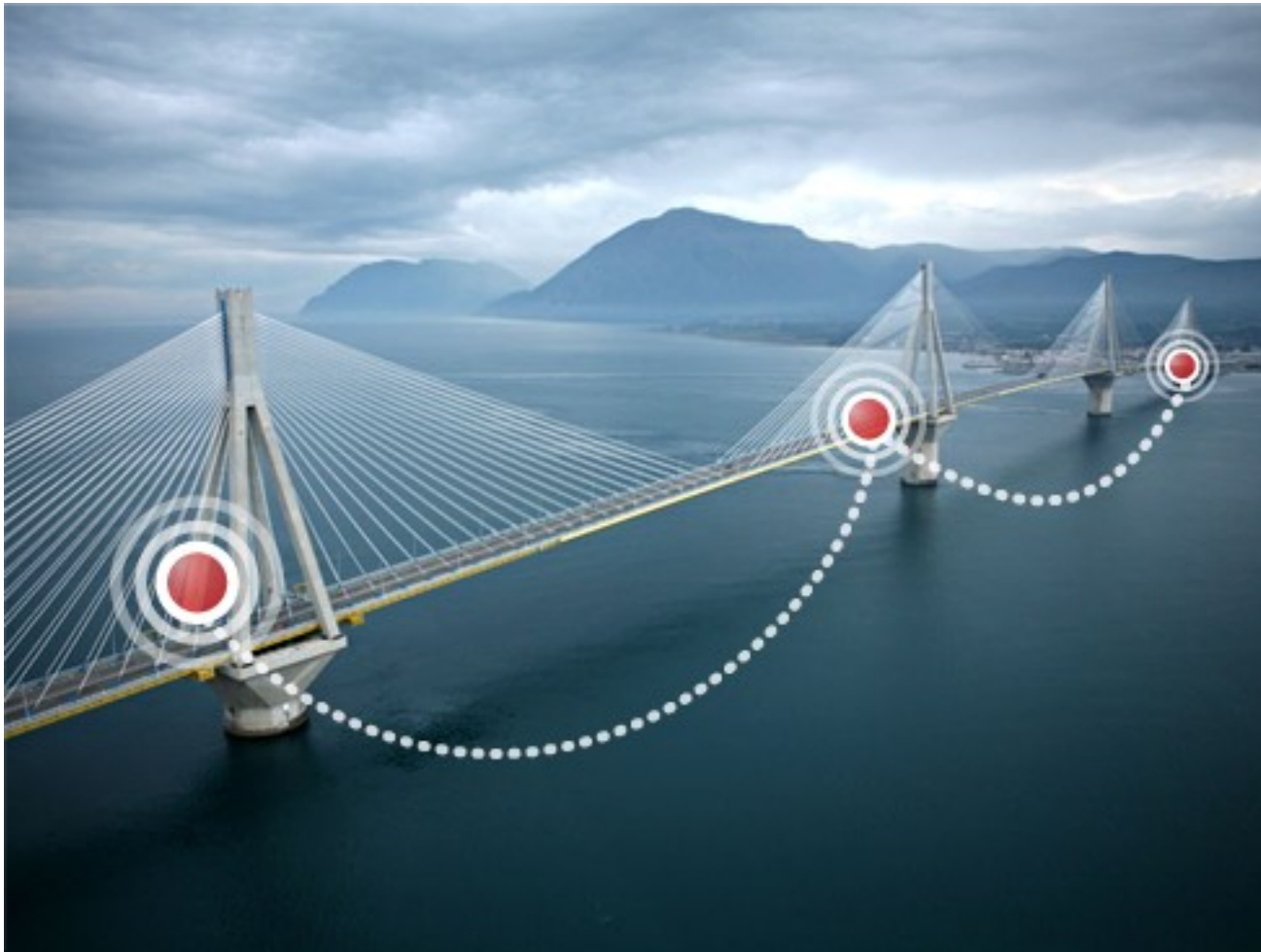
The Kodak logo, featuring the word 'Kodak' in red lowercase letters, centered between two horizontal yellow bars on a light grey background.



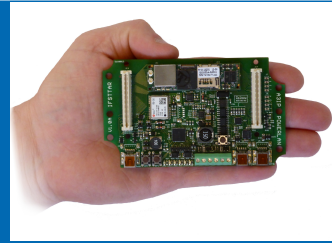
2- Emergence : capteurs sans-fil



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

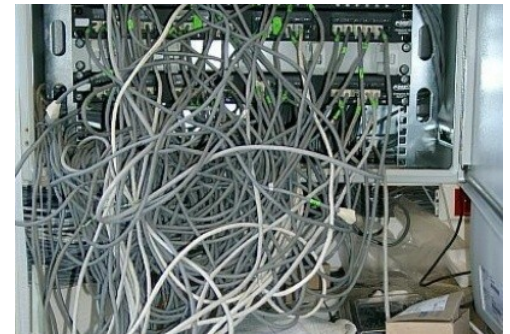


2- Emergence : capteurs sans-fil

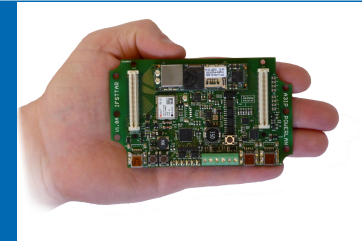


L'apport des réseaux de capteurs sans-fil ...

- 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



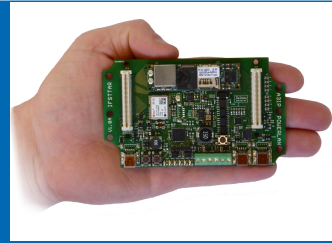
VCE
Vienna Consulting
Engineers ZT GmbH



acogec

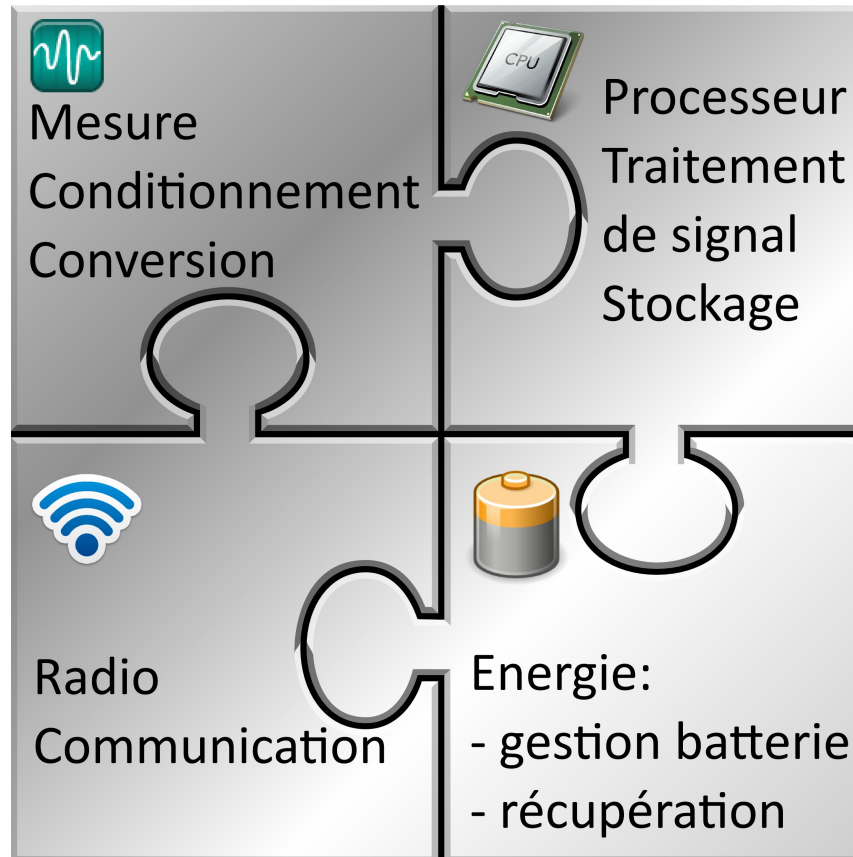
mageba
Switzerland www.mageba.ch

2- Emergence : capteurs sans-fil



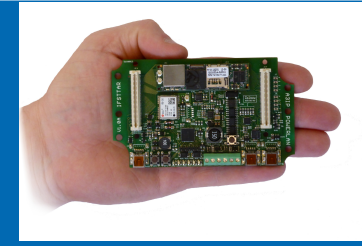
L'apport des réseaux de capteurs sans-fil ...

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

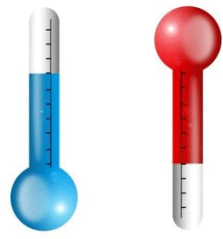


- La géolocalisation
- La synchronisation

2- Emergence : capteurs sans-fil



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



Le Mouvement:

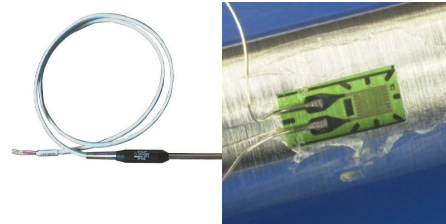
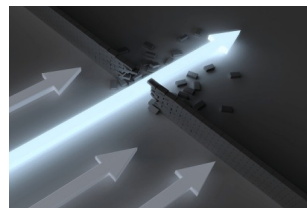
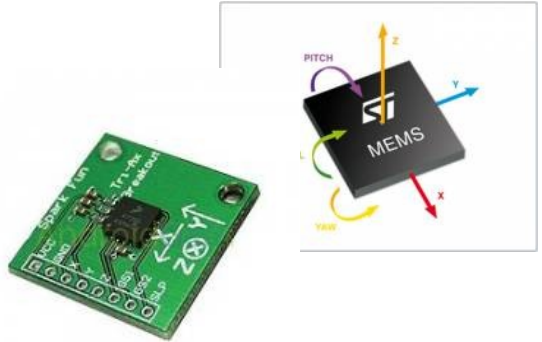
- Acceleration
- Vitesse
- Deplacement

- Chaleur
- Temperature

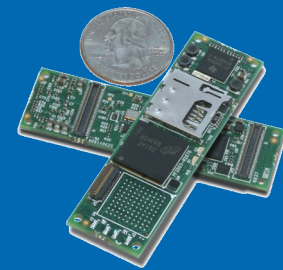
- Force
- Contraintes



...



2- Emergence : capteurs sans-fil



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

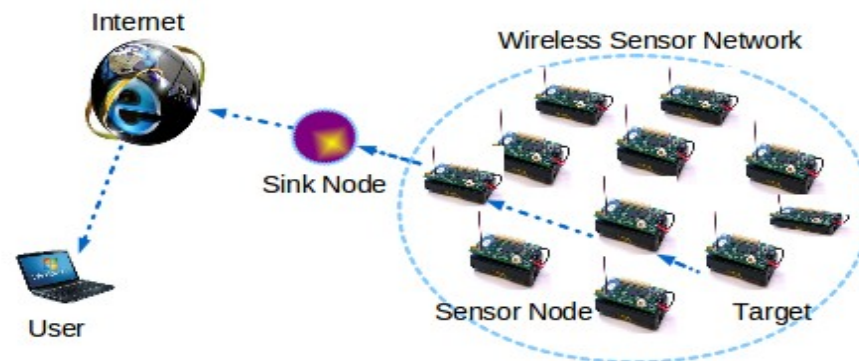
- Tendance mondiale à l'IOT : Internet Of Things – Internet des Objets.
- Pourquoi pas des objets “capteurs” ?

• *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

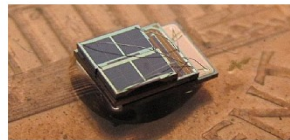
Structures

Bâtiment

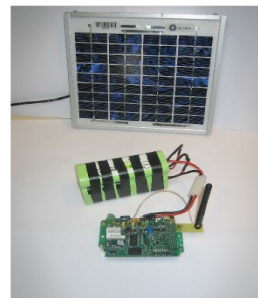
...



Vantage



Michigan

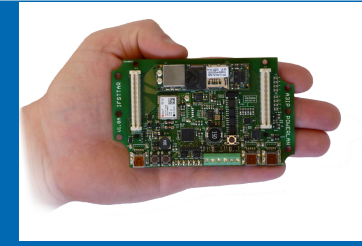


PEGASE



Pioneer

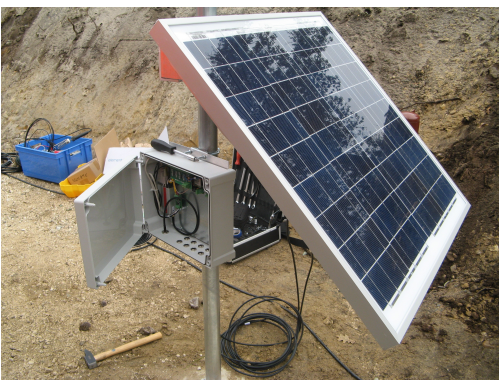
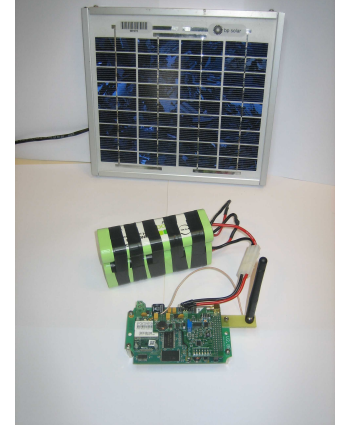
2- Emergence : capteurs sans-fil



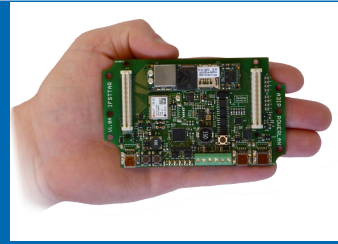
Retours d'expérience...mitigés



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



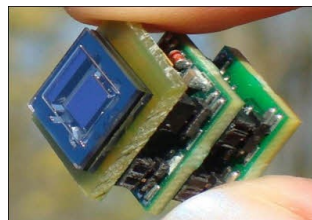
Solaire

~10aines W



Vent

~ 10aine μ W



Vibration

~ μ 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/dm³, nb de cycles, rapidité de recharge, autodécharge...
- Nouvelles sources d'énergie...



Solaire



Le souffle de l'air...

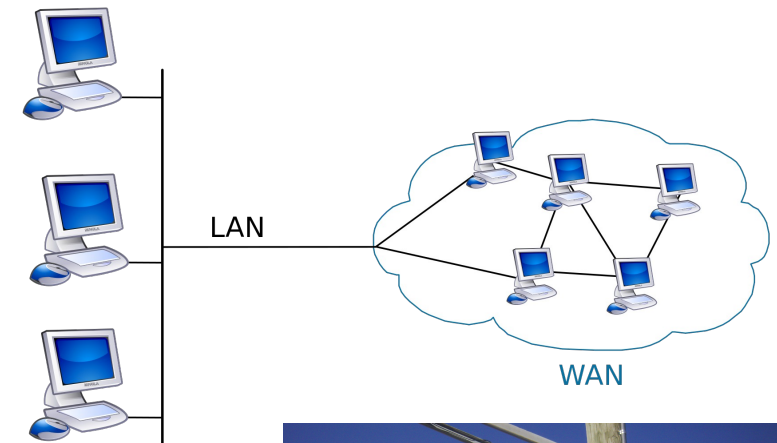
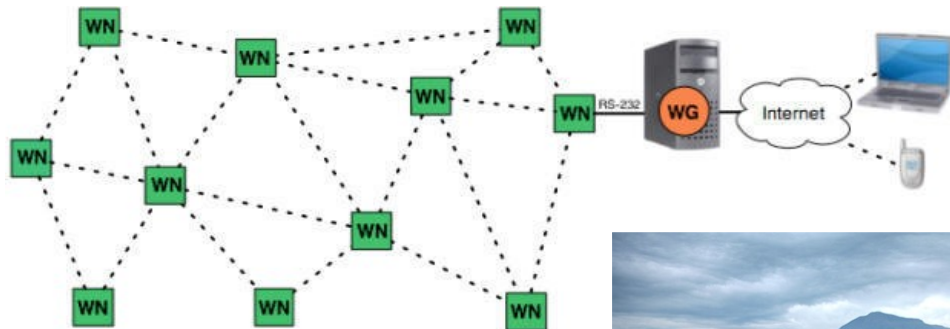
2- Emergence : capteurs sans-fil



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



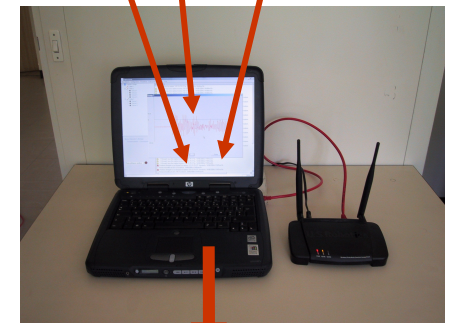
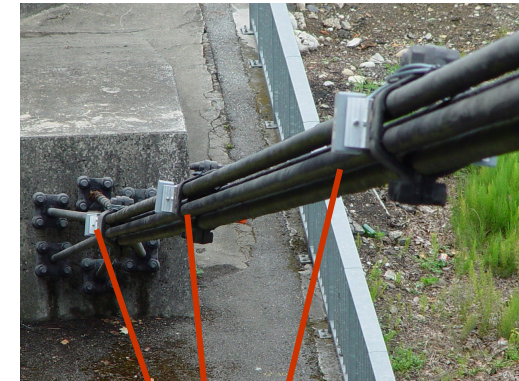
Trop souvent oubliée ou négligée...

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

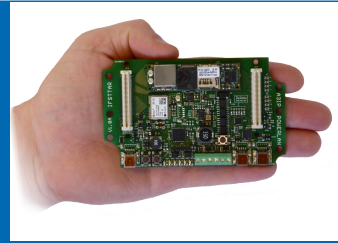
Or sans top synchro filaire, les compteurs de temps des **systèmes électroniques** (i.e. les quartz) **dérivent vite !**

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



Alerte !

2- Emergence : la Fibre Optique

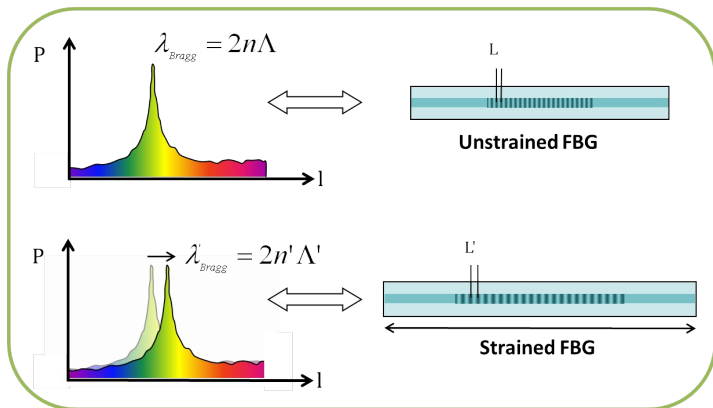
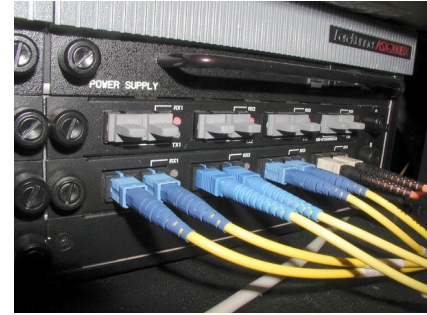


Boom de la mesure par **Fibre Optique** !

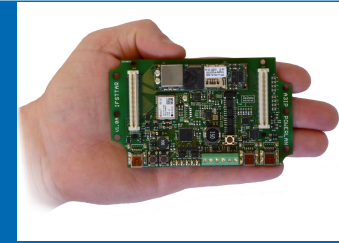
Avantages et caractéristiques de la FO :

- 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

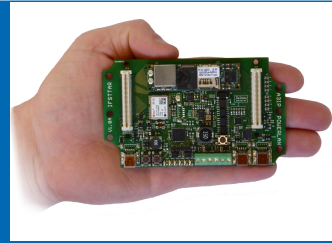


R&D :

- 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

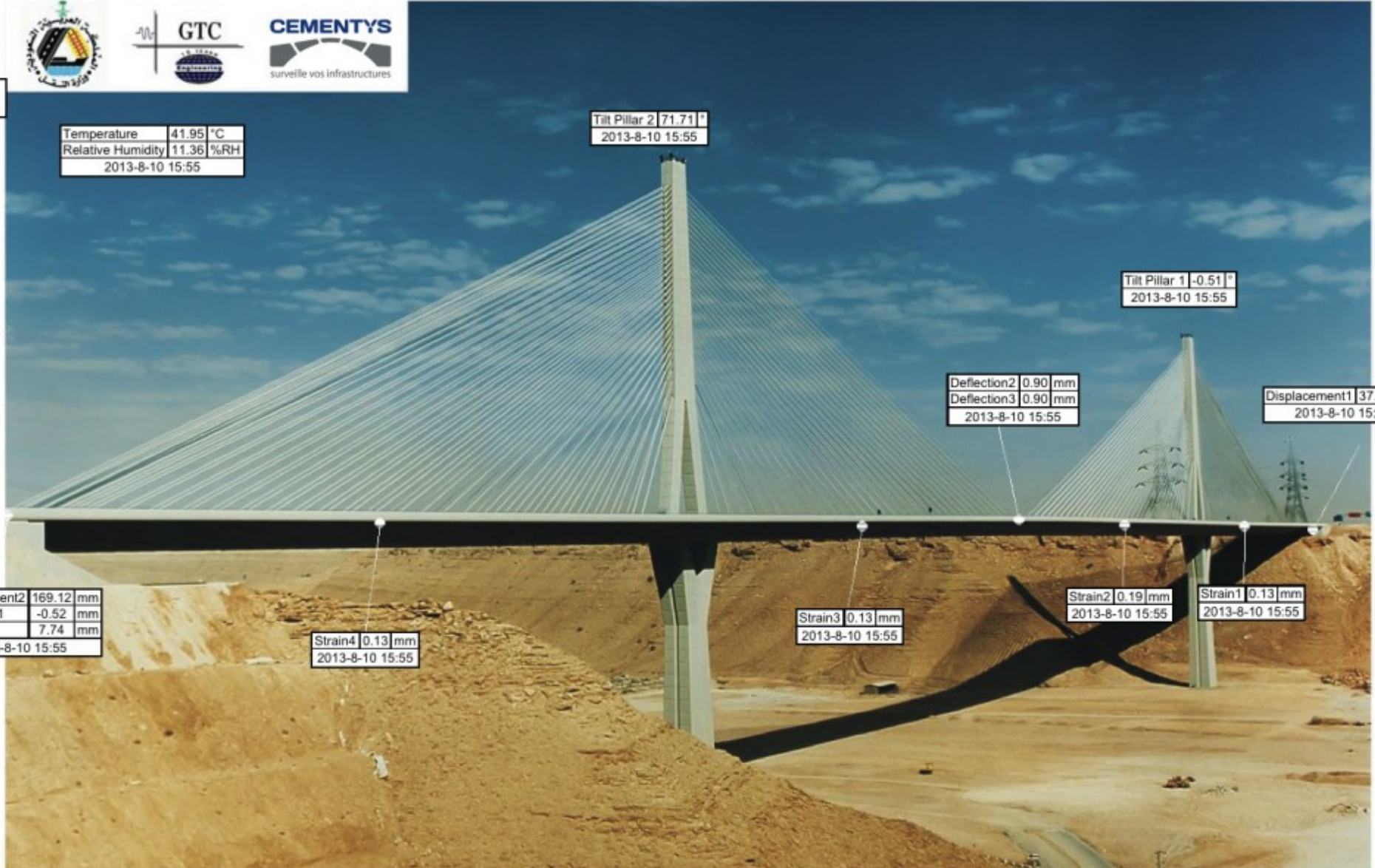
Displacement2	169.12 mm
Deflection1	-0.52 mm
Crack	7.74 mm
2013-8-10 15:55	

Strain4 0.13 mm
2013-8-10 15:55

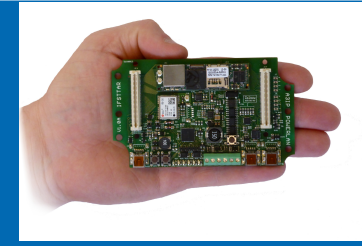
Strain3 0.13 mm
2013-8-10 15:55

Strain2 0.19 mm
2013-8-10 15:55

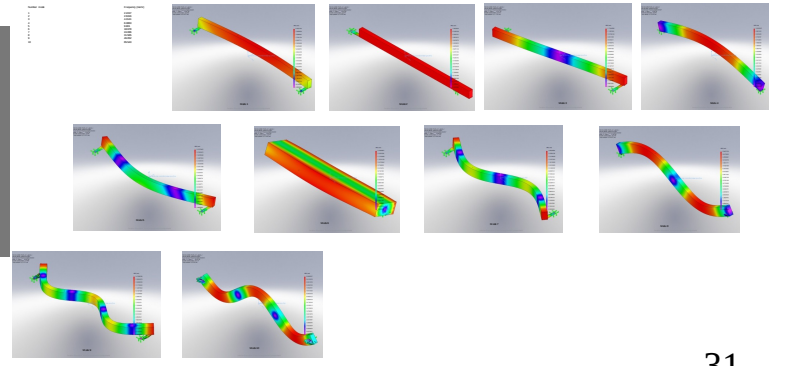
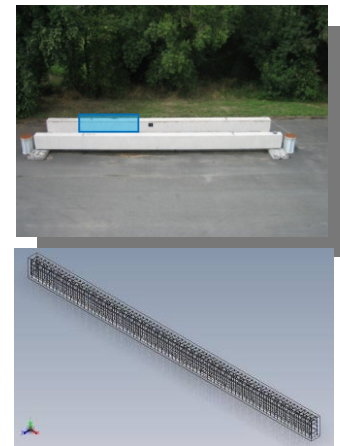
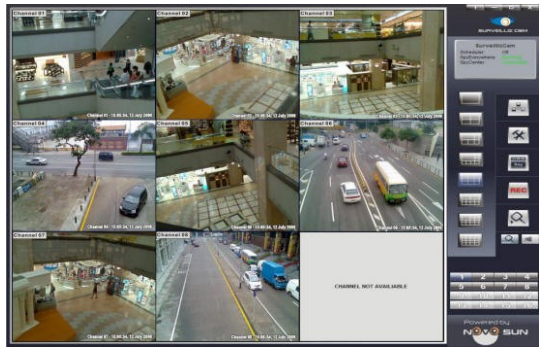
Strain1 0.13 mm
2013-8-10 15:55



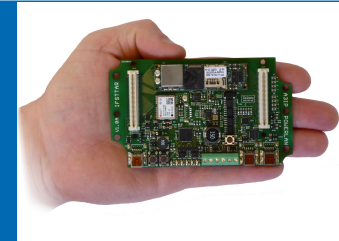
2- Emergence : capteurs d'Images



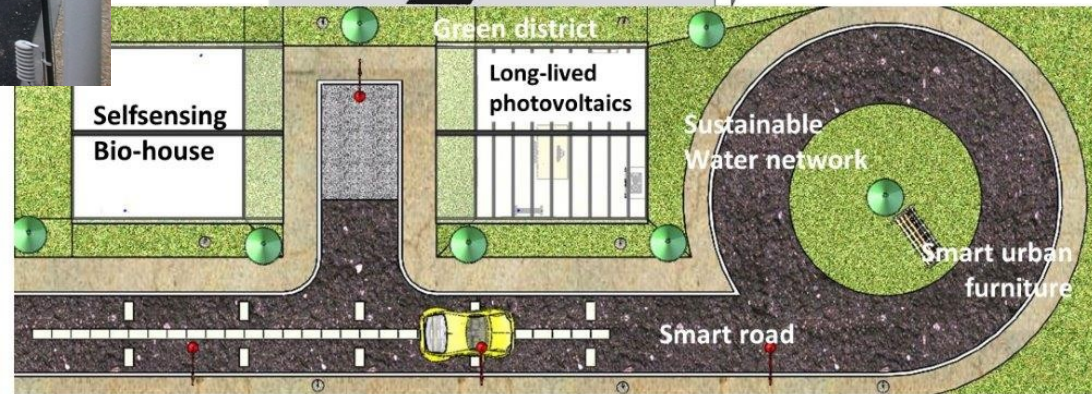
- Caméra et appareil photo numérique:**
- Capteur d'images ou de vidéos (Exemple : métro de Londres)
 - Associés à du traitement d'image :
 - Surveillance du trafic
 - Déplacement et vibration des structures
 - ...
 - Thermographie Infra-rouge
 - - couteux mais ça baisse
 - + quantitatif (collage, fissuration)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



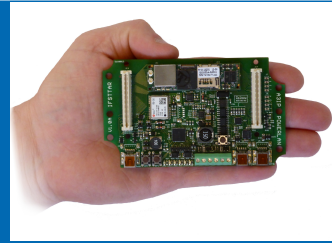
2- Emergence : un bon mix



Sensecity : le mix de l'instrumentation répartie ou non



2- Emergence : marché de l'intelligence



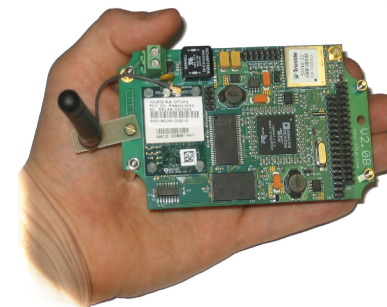
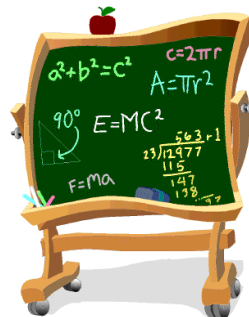
Intelligence à deux niveaux

- 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



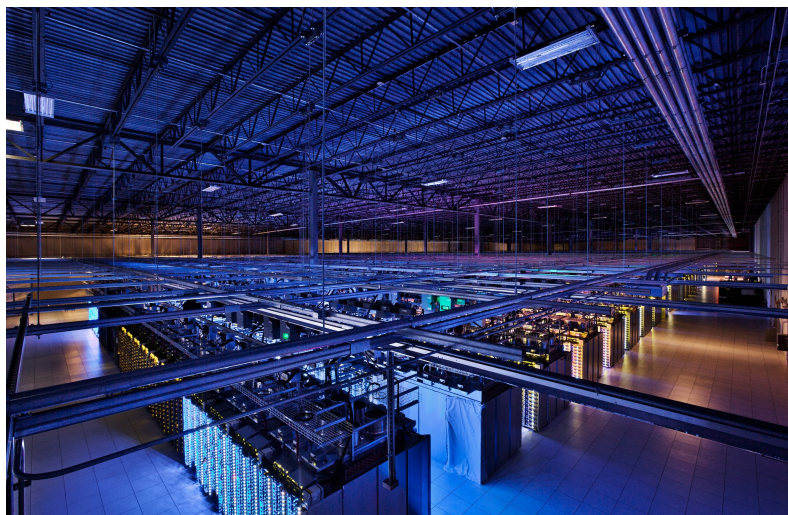
MESURE

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
A350 	#Parameters 670 000	4000	400 000	N/A	N/A	N/A
Data Recorded/flight <small>450 TB produced for the certification process in 2014</small>	500 GB	450 MB	300 GB	N/A	N/A	N/A
A380 	#Parameters 320 000	4 000	400 000	5.800	2,6 TB	1,1 PB
Data Recorded/flight	250 GB	450 MB	200 GB	5.800	2,6 TB	1,1 PB
Long Range 	#Parameters 14 000	1 500	40 000	84.000	17 TB	2,5 PB
Data Recorded/flight	10 GB	200 MB	30 GB	84.000	17 TB	2,5 PB
Single Aisle 	#Parameters 12 000	1 500	13 000	744.000	37 TB	9 PB
Data Recorded/flight	10 GB	50 MB	12 GB	744.000	37 TB	9 PB

x 50 in ~30 years (Flight tests)

Stored & used

Stored & limited use

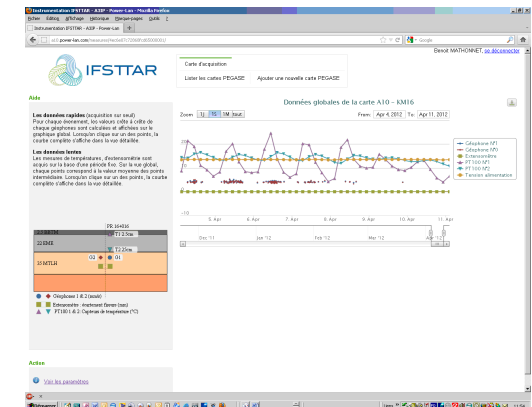
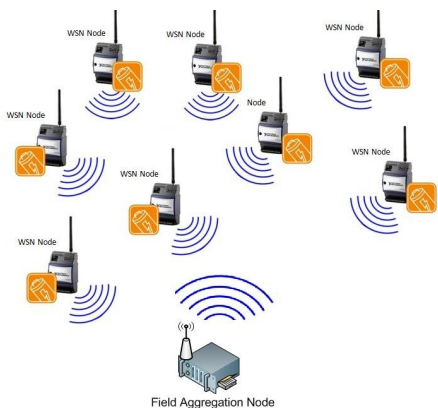
Not stored & not used

2- Emergence : marché de l'intelligence

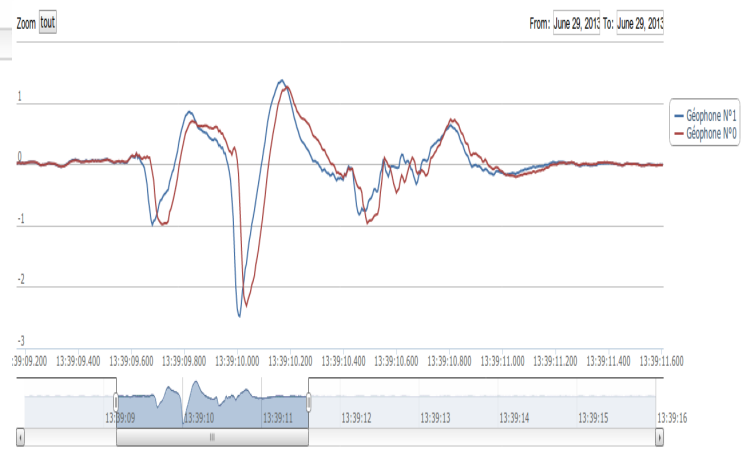
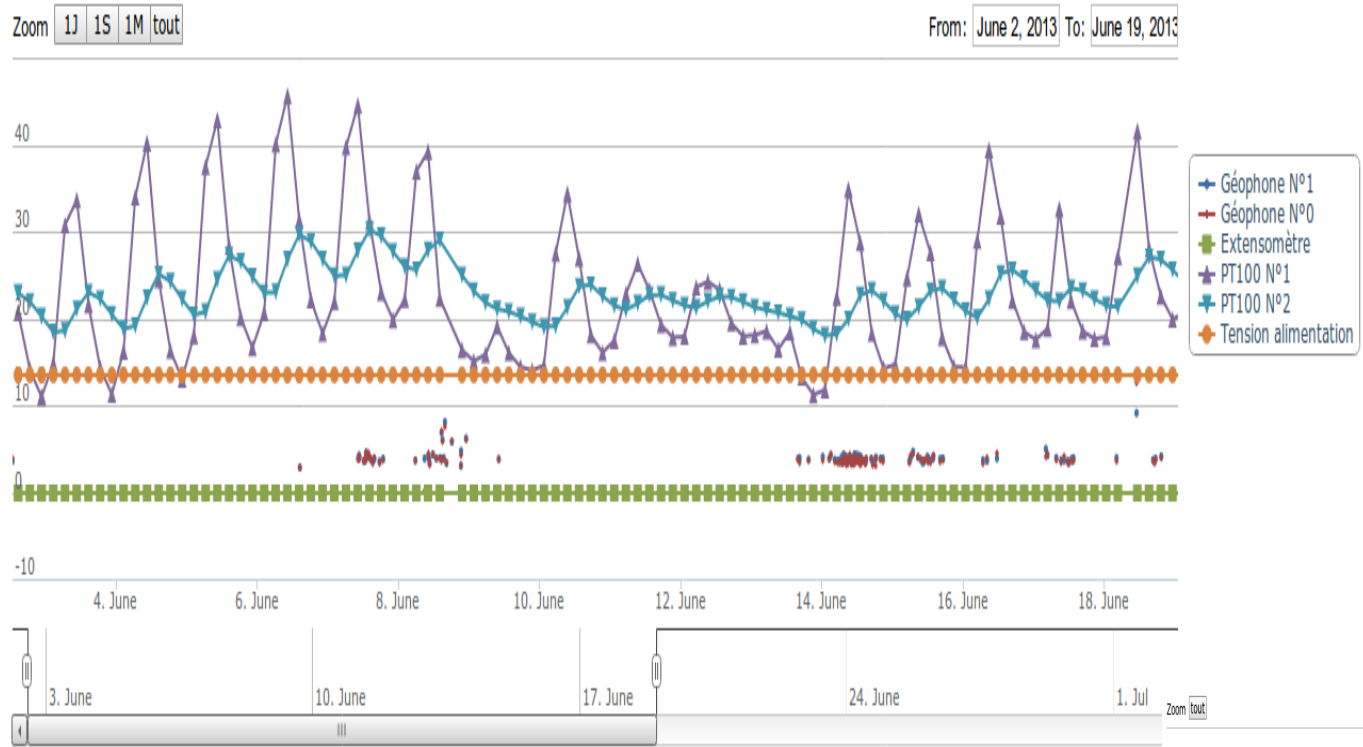
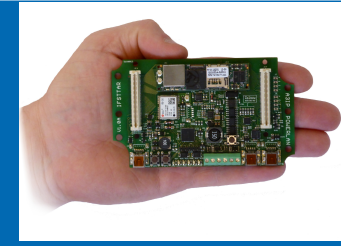


Pourquoi tant de bruit sur le « Big Data »

- 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

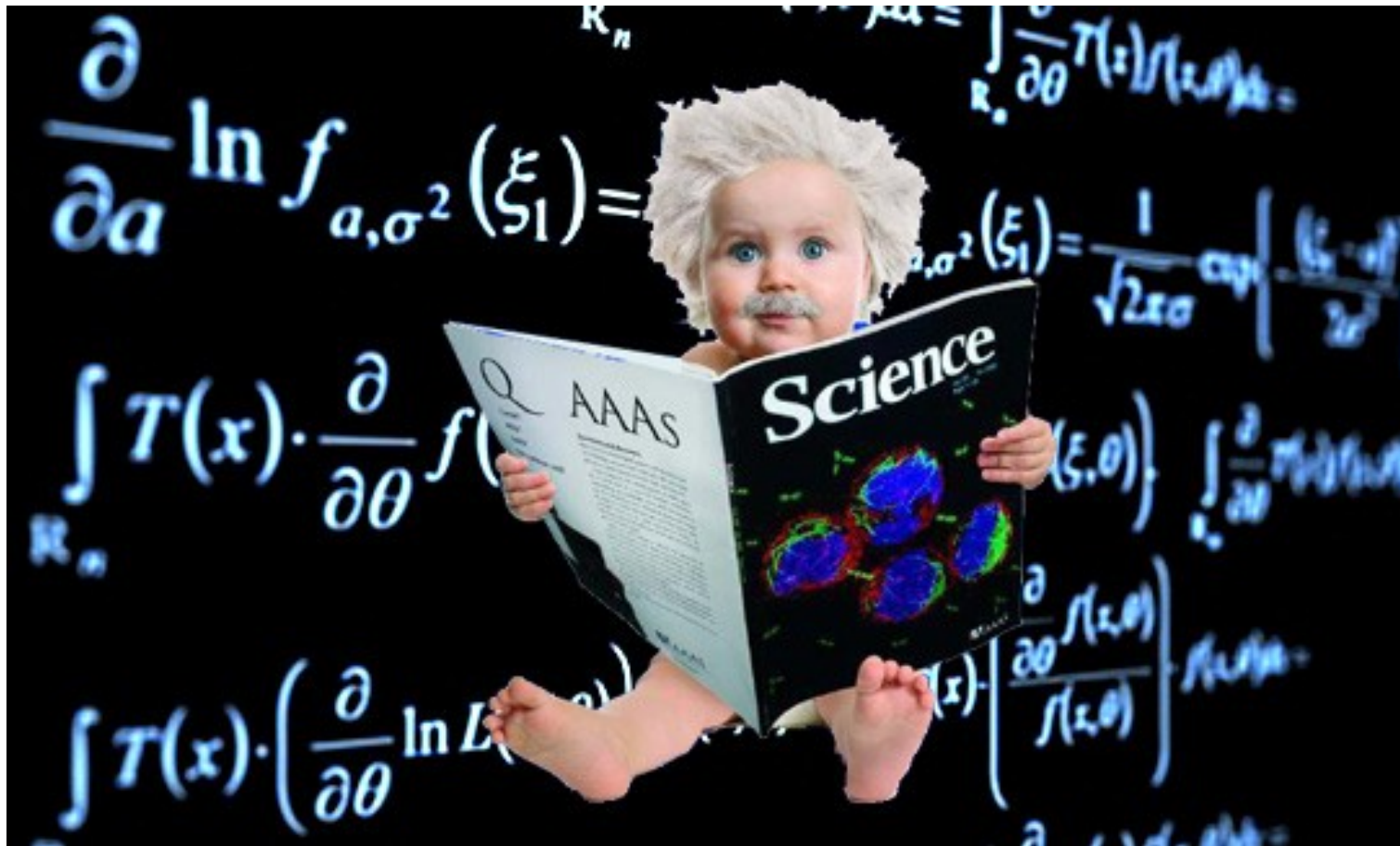
- Cloud, sécurisé
- Big Data : MongoDB, sauvegarde
- Liens aux algos
- Multicapteurs

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)



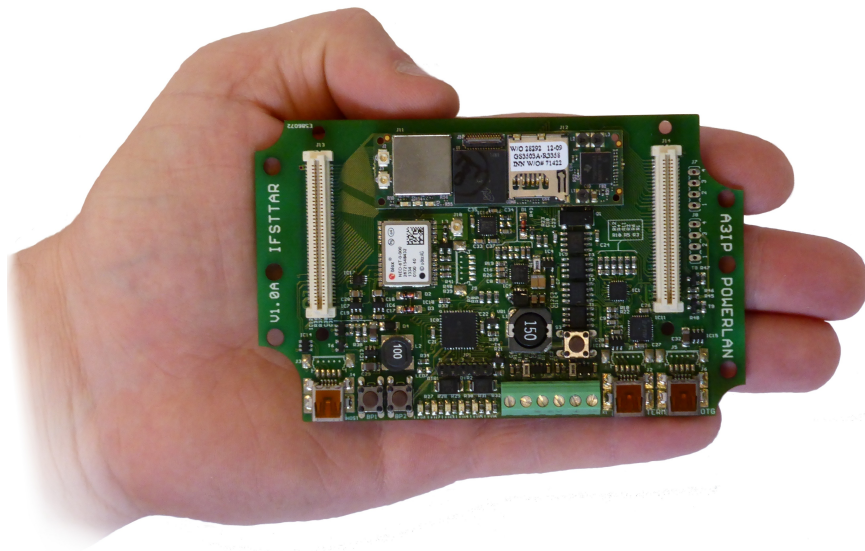
4- Illustration : la plateforme PEGASE d'Ifsttar



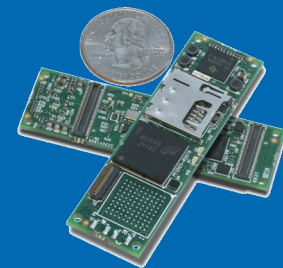
Ce que les Capteurs Intelligents permettent...

REX sur le Système IFSTTAR

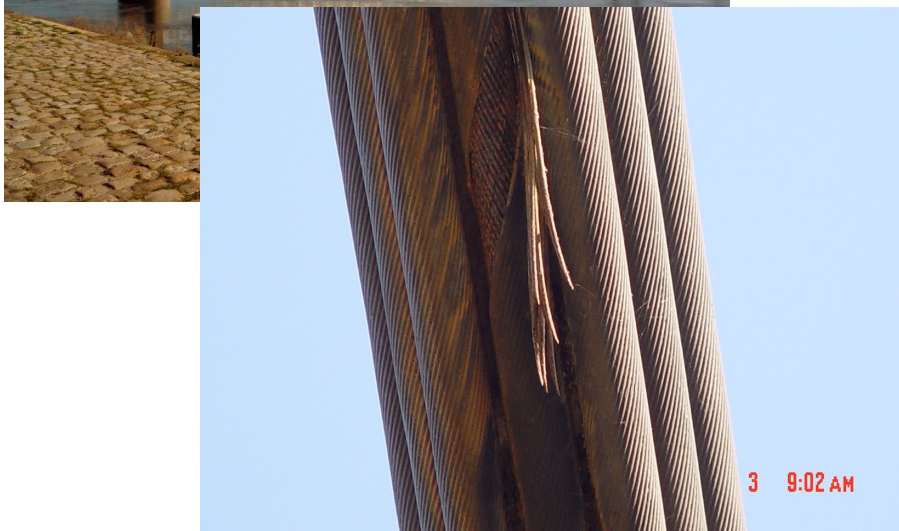
PEGASE :
Plateforme **Experte Générique** pour **Applications Sans-fils Embarquées**



4- Illustration : la plateforme PEGASE d'Ifsttar



Application 1 : Surveillance Acoustique des Câbles de pont

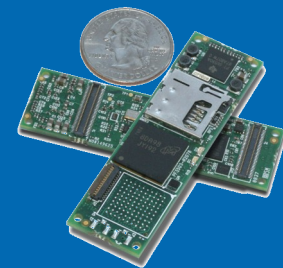


Pont d'Ancenis



Pont de Sully Sur Loire le 16 janvier 1985

4- Illustration : la plateforme PEGASE d'Ifsttar



Application 1 : Surveillance Acoustique des Câbles de pont



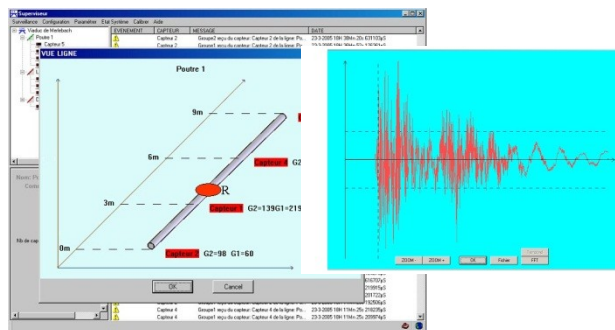
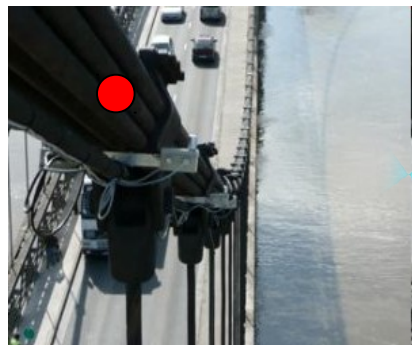
Objectif : Capteur acoustique pour la détection et la localisation de ruptures de fils dans les câbles de ponts

Description :

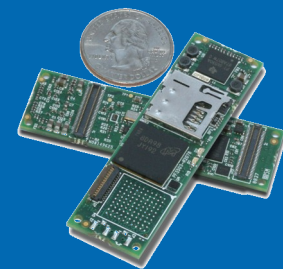
Chaque PEGASE "écoute" le câble à **250 kHz** et date les « événements » acoustiques à qqs μS ! => **local**

Transmission sans fil à un Superviseur

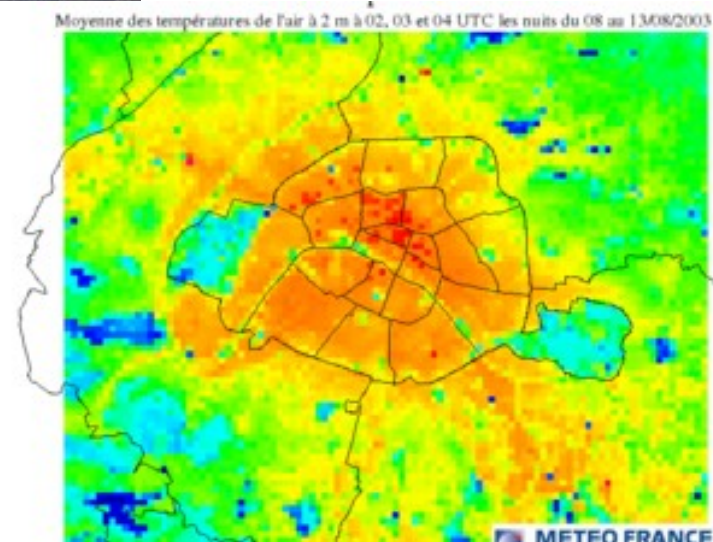
Localisation de la « rupture », envoi d'alarme...



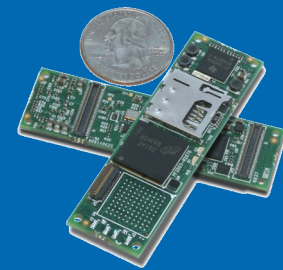
4- Illustration : la plateforme PEGASE d'Ifsttar



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 :

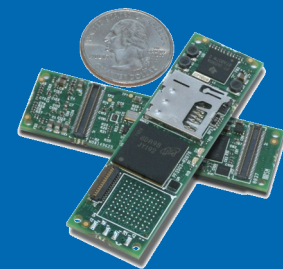
- Transmission WiFi directement ds BDD de l'opérateur
- Température
- Anémomètre
- Hygrométrie
- Sonomètre
- CO2
- Ensoleillement

Application: produit en 13 ex. dans Nancy agglo

Carte de **prévision des pics de pollution**



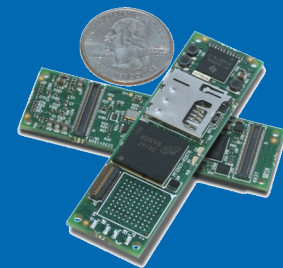
4- Illustration : la plateforme PEGASE d'Ifsttar



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

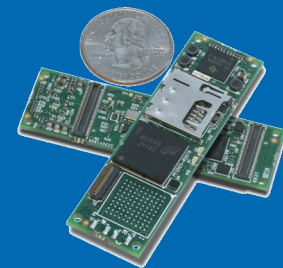
- Transmission sans fil en 3G/GSM à un Superviseur (très) distant
- Acquisition / analyse :
- 5 capteurs déplacement inductif
- 1 mesure de température



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



4- Illustration : la plateforme PEGASE d'Ifsttar



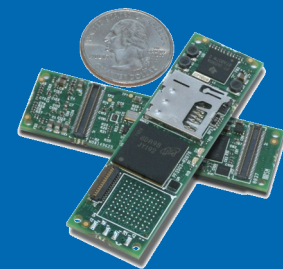
Application 5 : Surveillance vibratoire des Portiques Autoroutiers et OA



Des kms de codes Matlab qui “tournent” en local



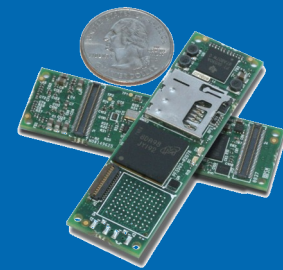
4- Illustration : la plateforme PEGASE d'Ifsttar



Application 6 : Surveillance des crues – Scour Monitoring



4- Illustration : la plateforme PEGASE d'Ifsttar



Application 7 : Surveillance des structures ferroviaires

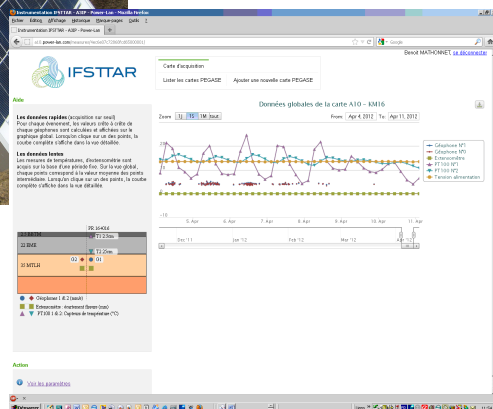
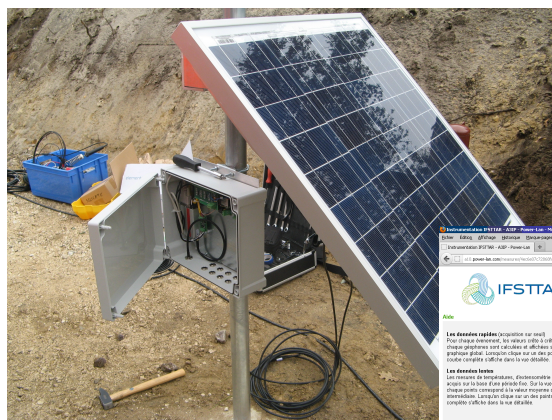


Objectif (S) :

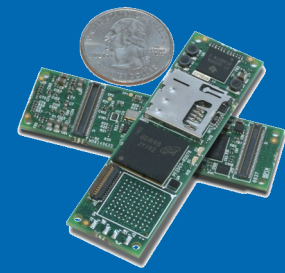
- Aider la **SNCF** à progresser dans l'instrumentation de terrain, autonome et wireless
- révolutionner la vision traditionnelle de la surveillance

Plusieurs systèmes variés à base de PEGASE pour suivre :

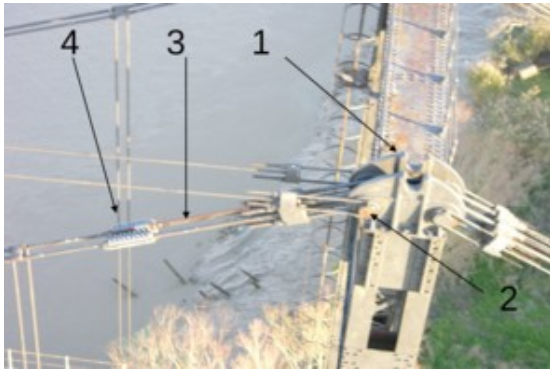
- La vibration au passage des trains
- Le comportement des nouvelles **chaussées béton**
- Le tassement des voies
- Les moteurs d'aiguille et de passage à niveau
- ...



4- Illustration : la plateforme PEGASE d'Ifsttar



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



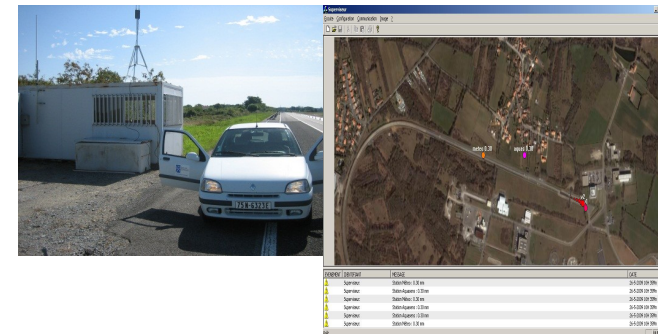
Monitoring poutre en béton



Monitoring par drone



Monitoring vent et acoustique



Monitoring du Traffic

3) Overview / perspectives



Prenons un de recul sur ces nouvelles technologies...



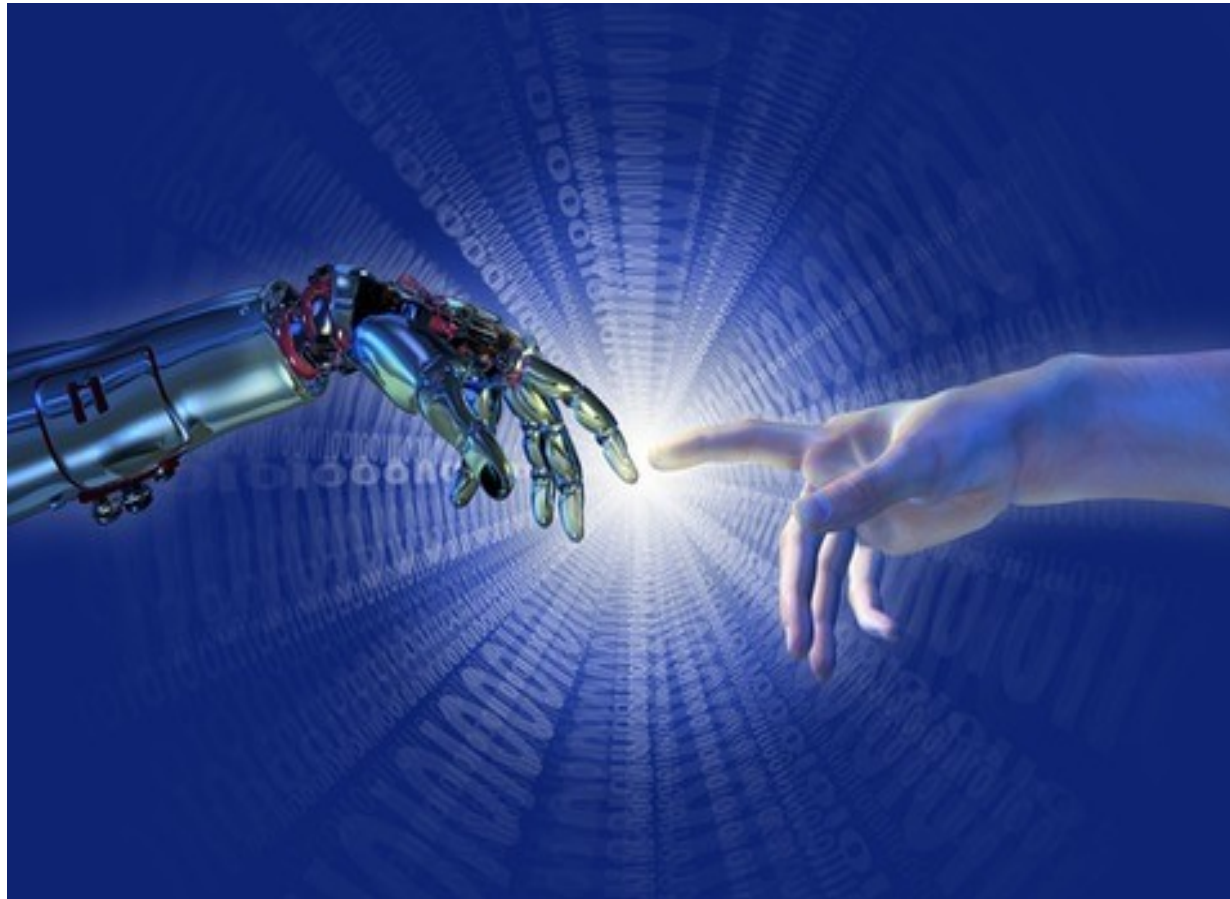
3) Overview / perspectives



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 ?



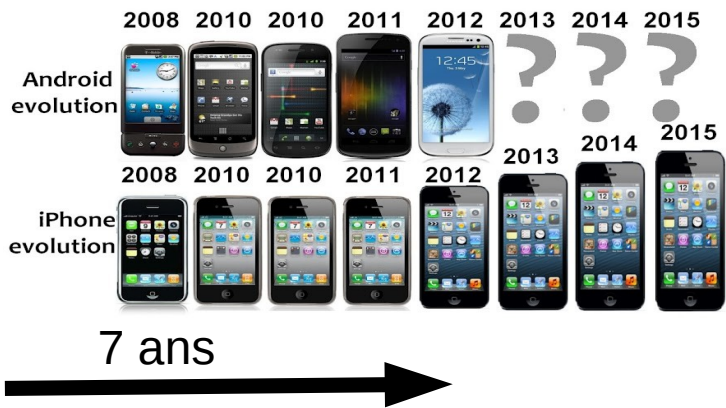
3) Overview / perspectives



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...
 - ...



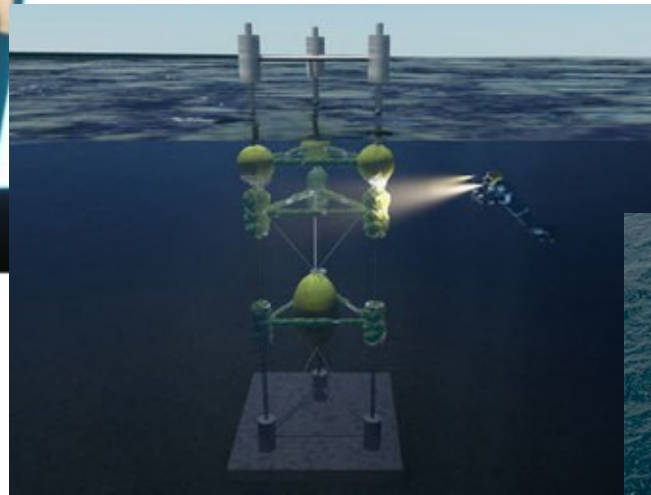
3) Overview / perspectives



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



3) Overview / perspectives



MERCI !!!

