

Vincent LE CAM
Université Gustave Eiffel

Réflexion sur les réseaux de capteurs sans fil au service du suivi des structures : actualités, enjeux technologiques et scientifiques, exemples applicatifs



Université
Gustave Eiffel

Préambule :

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

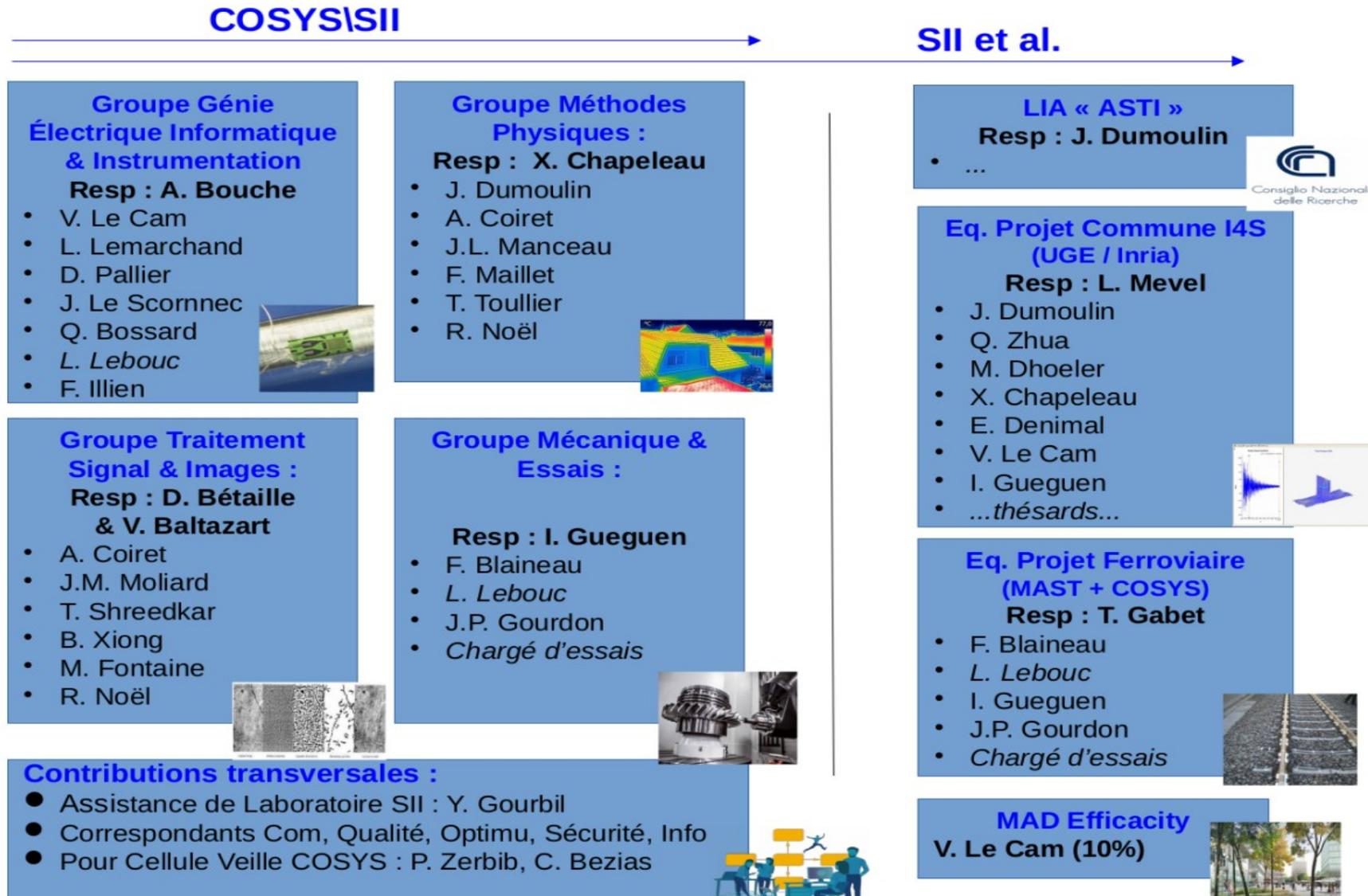


Sommaire :

- Le Laboratoire SII @ Université Gustave Eiffel
- Les attentes des Réseaux de Capteurs sans-fil / Biblio techno
- Enjeux scientifiques et techniques
- Exemples applicatifs @ UGE
- Conclusions - perspectives



1) Le Laboratoire SII (département COSYS de l'UGE)



1) Le Laboratoire SII (département COSYS de l'UGE)

Le Laboratoire SII adresse surtout des problématiques de **Contrôle Non Destructif** et **Structural Health Monitoring** des structures à enjeux :



Civil engineering



Aerospace & Aeronautic



Energy



Transport

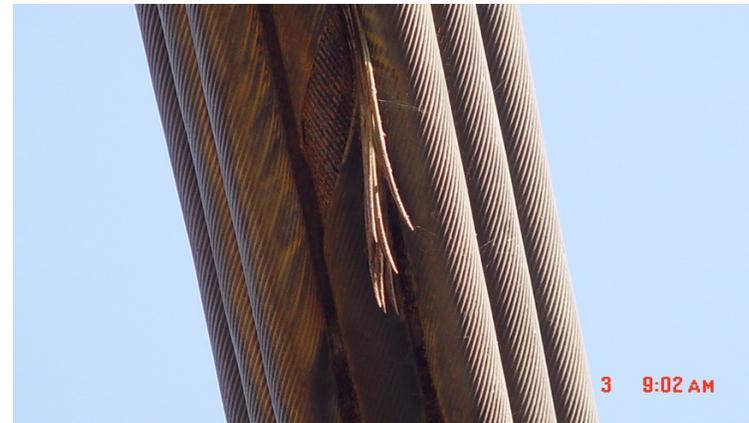


1) Le Laboratoire SII (département COSYS de l'UGE)

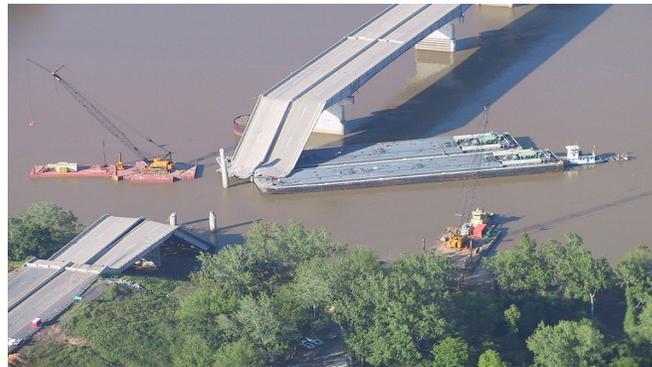


Corrosion, fuite, vibration...

1) Le Laboratoire SII (département COSYS de l'UGE)



1) Le Laboratoire SII (département COSYS de l'UGE)



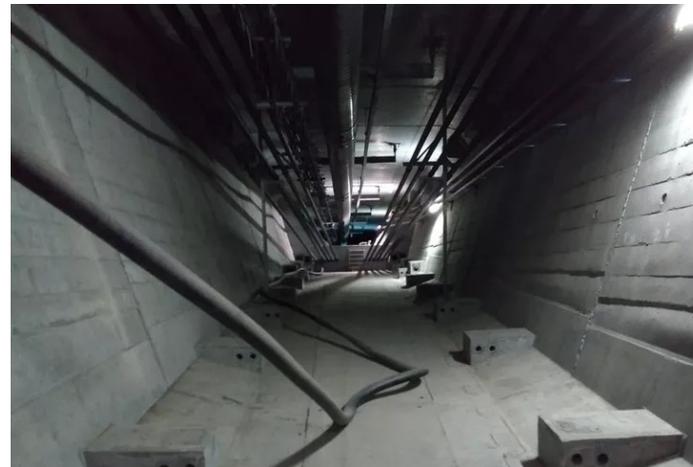
1) Le Laboratoire SII (département COSYS de l'UGE)



En France : cf le Rapport Sénatorial 2018 sur l'état des ouvrages d'art

Aux USA : le FMI met en demeure le New Jersey de ré-investir dans ses structures

...



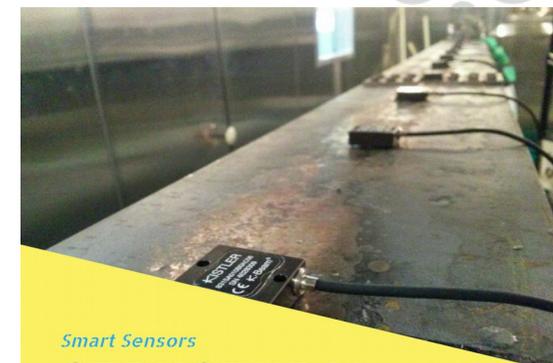
2) Les attentes des réseaux de capteurs sans-fil

Surveillance des Structures à Enjeux : le SHM à l'aide Wireless Sensor Network (WSN)

- **Gain financier**: « Pas de problème » de coût vs le coût de la câblerie
 - + maintenance plus aisée de l'instrumentation elle-même
 - + mobilité a priori plus grande des moyens de mesures
 - ...
- Contribution à la **maintenance Temps Réel des structures**
- Contribution à la **maintenance Préventive des structures**
- Contribution à une **meilleure connaissance des structures** pour Nourrir le REX des opérateurs et affiner les modèles scientifiques

La câblerie par nature et par ses coûts induits est un frein intrinsèque à la surveillance des structures

Exemples : CEREMA : 20 % de l'instrumentation du pont d'Ancenis en câblerie ; Pont Aquitaine 48.8 kE de câbles pour 200 capteurs ; Sixense : à Saint Cloud 64 kms de câbles électrique ; REX : typiquement 3 kE la voie de mesure filaire...



Smart Sensors

**STRUCTURAL
HEALTH
MONITORING**

2) Les attentes des réseaux de capteurs sans-fil



C. de déplacements



C. acoustiques



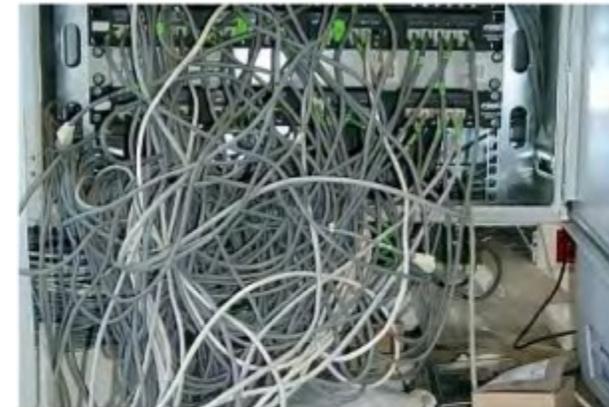
Jauges de déformation



Un PC dans un pont
gérant 8 capteurs
(seulement).



Syst. Multicartes
d'acquisition
(complexe).



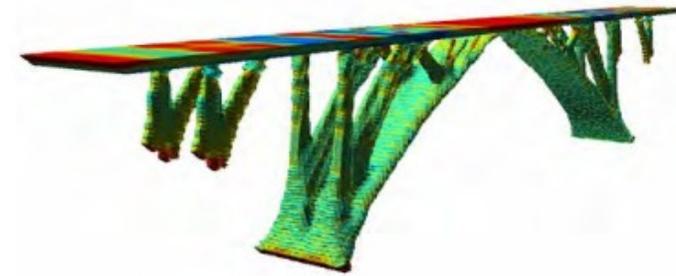
Baie de multiplexage

2) Les attentes des réseaux de capteurs sans-fil

Qu'entend on par « capteurs » avec ou sans fil ?

Que cherche-t-on à capter / mesurer ?
→ des grandeurs physiques

- Les paramètres du **mouvement** :
 - Déplacement (m)
 - Vitesse (m/s)
 - Accélération (m/s^2)
 - Les déformations ($\mu m/m$ ou μdef)
 - Inclinaisons et rotation (radians)
- Les **forces** :
 - Traction/compression (Newton - Pascal)
 - Contraintes ($Newton/m^2$)
- La **température** (C°) et chaleur



Modélisation des modes



Pont de Tacoma :

<http://www.youtube.com/watch?v=j-zczJXSxnw>

De manière ponctuelle ou plein champ.

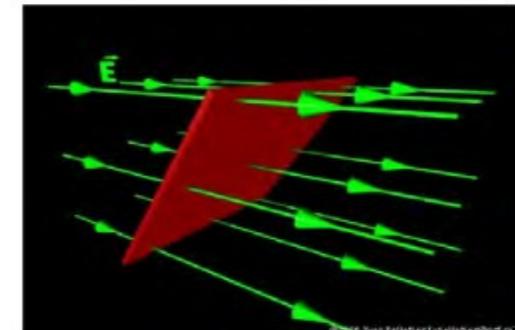
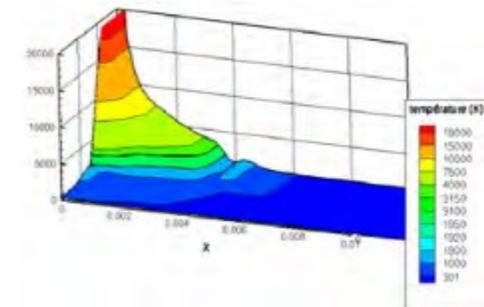
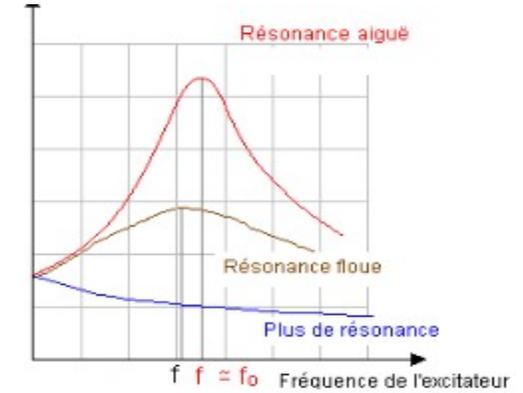
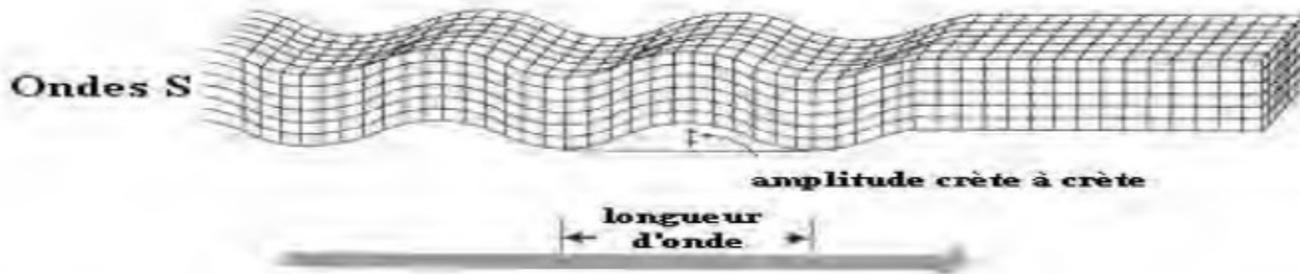
2) Les attentes des réseaux de capteurs sans-fil

Qu'entend on par « capteurs » avec ou sans fil ?

Que cherche-t-on à mesurer ?

Des phénomènes mettant en œuvre des combinaisons de grandeurs physiques:

- Fréquences (résonance, modes,...)
- Énergie, flux, conductivité
- Propagation d'ondes (e.m., méca, acoustique)
- Lumière (lux, watt)
- Rugosité,
- Turbidité
- etc.



2) Les attentes des réseaux de capteurs sans-fil

Comment mesurer ces grandeurs ?

Exemples d'éléments sensibles : **l'accéléromètre**



- Délivre un signal (tension, charges) proportionnel à l'accélération subie

- Plusieurs **technologies** :

- **Capacitif** => C varie avec le mouvement
- **Piézo** => Charges (Q) délivrées par un quartz, cristal
- **MEMS** => Principes physiques au niveau μM

- Gamme immense d'accéléromètres :

- Sensibilité (mV / g)
- Gamme de mesure (g)
- Gamme de fréquences :
 - De la basse fréquence (qqs Hz)
 - Vibration (100 / 1000 Hz)
 - Acoustique (10 KHz)
 - Et plus...



Accélération \approx déplacement :

$$X(t) = a_0 \cdot \sin(\omega t)$$

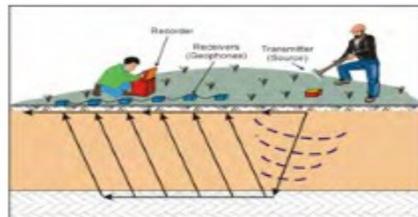
$$V(t) = dX = a_0 \cdot \omega \cdot \cos(\omega t)$$

$$A(t) = dV = -a_0 \cdot \omega^2 \cdot \sin(\omega t)$$

2) Les attentes des réseaux de capteurs sans-fil

Comment mesurer ces grandeurs ?

Exemples d'éléments sensibles : **le géophone**



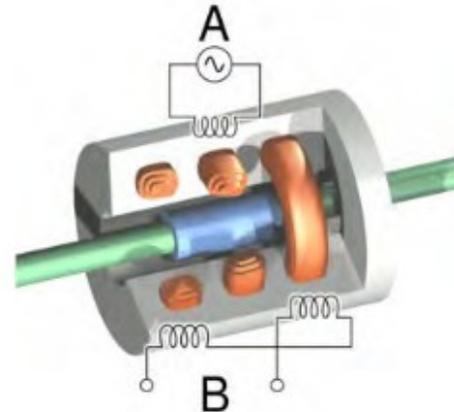
- Mesure de la vitesse (d'onde)
- Applications types du « Géo - Phone » (bruit de la terre)
 - Sismiques
 - Vibration ou mouvements de terrains
- Délivre une tension proportionnelle à la vitesse de déplacement
- Exemple : $15 \text{ V} / \text{m.s}^{-1}$
- Propriétés :
 - Cher, fragile et difficile à étalonner
 - Peu sensible aux basses fréquences ($< 5\text{Hz}$)
 - Plutôt « gros »
 - Ne consomme rien => une masse magnétique se déplace dans une bobine et crée un champ électrique

2) Les attentes des réseaux de capteurs sans-fil

Exemples d'élément sensible : **capteurs de déplacement**



- Mesure d'un déplacement sur un axe : $x(t)$ en m / mm / μm
- Nombreuses technologies possibles dont
 - Capacitifs
 - Résistif
 - Optique
 - Lv Dt (Linear Variable Differential Transformer)
 - => le déplacement d'un noyau au travers une bobine inductrice modifie les champs induits dans les 2 bobines réceptrices



2) Les attentes des réseaux de capteurs sans-fil

Comment mesurer ces grandeurs ?

Exemples d'élément sensible : **mesure de la température**

- Mesure souvent importante dans les modèles scientifiques
- Deux grandes familles de capteurs / technologies:



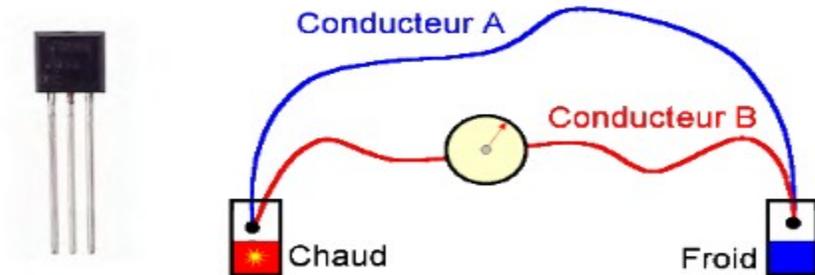
Sonde platine PT 100

- Les sondes **platines** : PT 100, PT 1000
=> variation d'une résistance $R = f(t^{\circ}\text{C})$
 - Conditionnement simple
 - Principe du pont de jauge

- Les **thermocouples** :

=> effet Peltier

- Grande gamme de mesure $-200 / + 1800^{\circ}\text{C}$
- Conditionnement plus complexe



Thermocouple en composant / principe



2) Les attentes des réseaux de capteurs sans-fil

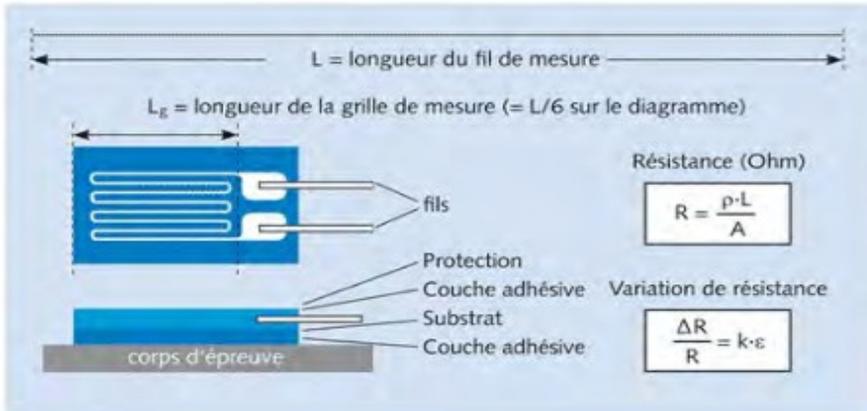
Comment mesurer ces grandeurs ?

Exemples d'éléments sensibles :



Capteurs de force

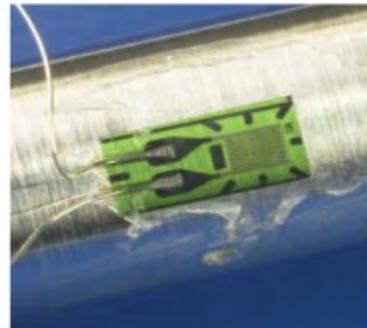
=> Newton ou Newton.mètres (couple)



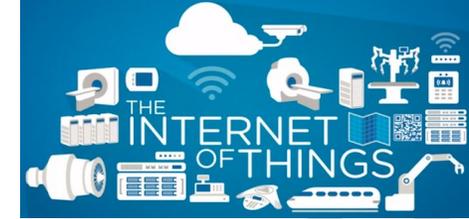
Jauges de déformation (contraintes)

=> déplacement relatif : $\mu\text{m} / \text{m}$ (ou $\mu.\text{def}$)

=> conditionnement $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{4}$ ou pont complet

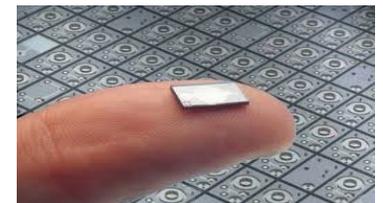
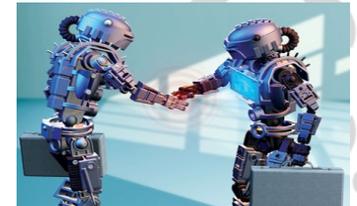


3) Les enjeux scientifiques et techniques



WSN : Wireless Sensor Network / IOT : Internet Of Things

- **De quoi parle -t- on ?**
 - La connexion des « choses » , des objets y compris des humains
 - Plus concrètement : des capteurs, des actionneurs...
 - Suite logique et technologique de l'Internet
- **Est ce si nouveau ?**
 - Historiquement l'homme est un *objet* communicant
 - ...comme les objets qu'il crée
 - Une généralisation du « M2M : Machine To Machine »...depuis 20 / 25 ans
 - Plus d'humain, plus de centralisation (cloud)
- **Pourquoi maintenant ?**
 - Business : les acteurs télécoms (opérateurs, électroniciens...) touchent une limite : 80 % des terriens téléphonent ; besoin de nouveaux marchés
 - La **technologie** électronique a fait de gros progrès :
 - Consommation des systèmes : réduction / récupération
 - Micro (MEMS) et Nano capteurs
 - Standardisation et portée des protocoles wireless
 - Capacité des réseaux IP (IPV6) et du stockage (Big Data)



3) Les enjeux scientifiques et techniques



« 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...
- 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 ?



3) Les enjeux scientifiques et techniques

Biblio



Airbean



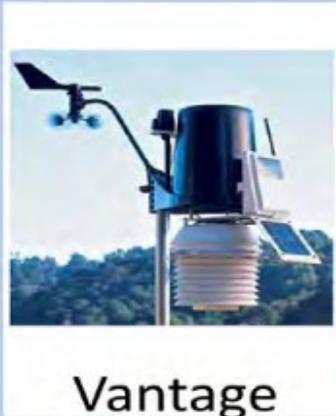
Formic



Newsteo



Microstrain



Vantage



Michigan



PEGASE



Pioneer

3) Les enjeux scientifiques et techniques

Biblio

Retours d'expérience...mitigés

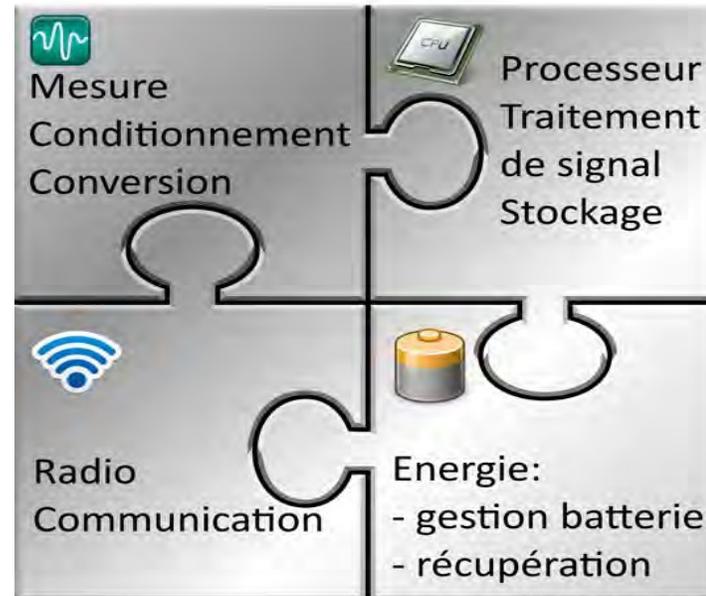


3. Wireless sensors are used to measure long-term stress and strain in civil engineering structures like buildings and bridges. (Courtesy: Microstrain Inc.)



3) Les enjeux scientifiques et techniques

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



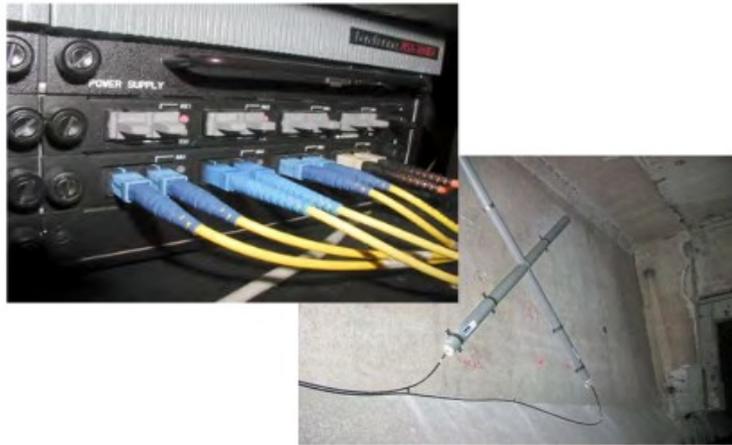
Conclusions d'étape :

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

3) Les enjeux scientifiques et techniques

- **Parenthèse** : d'où le succès actuel et parallèle des méthodes dites « plein champ »

Exemples d'éléments sensibles : d'autres techniques permettent des **mesures non pas ponctuelles mais dites réparties ou plein champ**



Fibre optique comme capteur réparti

- De déformation, mouvement, température
- Avec un interrogateur on exploite les effets :
 - Raman, Brillouin, Bragg



Caméra et appareil photo numérique:

- Capteur d'images ou de vidéos
- Associés à du traitement d'image :
 - Surveillance du trafic
 - Déplacement et vibration des structures
 - ...

3) Les enjeux scientifiques et techniques

- L'avènement des WSN doit encore progresser selon des axes techniques et scientifiques bien identifiés (énergie, protocole wireless...) ou moins (synchronisation, intelligence embarquée...)....
 - La vision d'ensemble de ces axes est complexes : 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,



3) Les enjeux scientifiques et techniques

3.1) L'énergie et les WSN



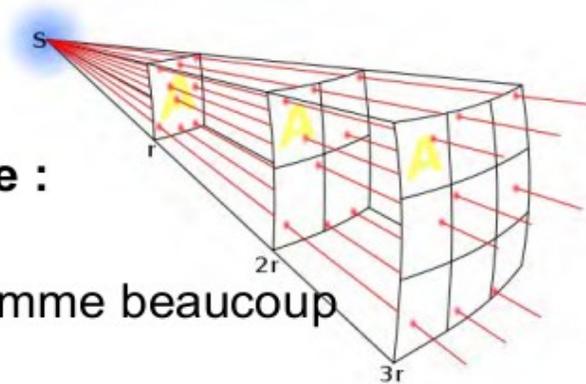
3) Les enjeux scientifiques et techniques

3.1) L'énergie et les WSN



L'énergie et les capteurs sans fils...

$$I = p \cdot v \propto \frac{1}{r^2}$$



Vaste sujet ! Quelques postulats et premiers éléments d'approche :

- **Communiquer** sans-fil (avec des modules radiofréquence) consomme beaucoup beaucoup d'énergie. **Plus que mesurer**, un comble !
- En GC, l'énergie disponible au niveau d'un capteur sans-fil est limitée voire inexistante
- Plus un capteur est distant (de son interlocuteur) ou enfoui (dans une structure) plus il a besoin d'énergie pour communiquer. Cf. Maxwell => carré de la distance
- « Plus c'est petit, moins ça consomme »

Premières conclusions :

- En wireless, l'électronicien, doit **tenir autant compte de la mesure spécifiée que de la consommation énergétique**
- Conclusion : Il n'y a **aucune évidence technologique** !

PS : conso typique d'un WSN de qqs mW à 1 W max





3) Les enjeux scientifiques et techniques

3.1) L'énergie et les WSN

Le **puissance** (W) et la **durée** (h) nécessaire pour faire fonctionner 1 WSN déterminent la complexité en terme d'énergie (W.h)

Il y a autant de problématiques que de systèmes visés !

On va distinguer 3 cas généraux : les 2 premiers sont solubles facilement

Cas 1) Si l'instrumentation est de courte durée (heures - jours) :

- solutions sur batteries OK
- Exemples: en véhicules, sur un drone, matériel d'inspection ponctuelle...

Cas 2) Si l'instrumentation est moyenne à longue durée et ne nécessite pas de communications / mesures fréquentes

- Exemples : 1 mesure de la t° par heure, mesure hauteur d'eau, analyse modale, ... une seule remontée par jour/par semaine...
- Optimisations en n'activant les modules d'acquisition/conditionnement et radios qu'aux seuls moments nécessaires
- Endormissement du processeur (STM32 : qqs μ W) le reste du tps.
- Sortie de l'état de veille paramétrée sur évènement, dépassement de seuil, RDV précis (RTC),...

3) Les enjeux scientifiques et techniques

3.1) L'énergie et les WSN



Cas 3) Si l'instrumentation est de longue durée ou impose des communications et de l'échantillonnage fréquents - Ce dont tout le monde rêve :

Alors la conception électronique doit :

- Viser la sobriété extrême du système constituant le capteur, minimiser le nombre de composants électroniques, employer tous les modes de veille possibles
- Optimiser les rapports cycliques des phases d'écoute ou de communication sur le réseau, et utiliser le protocole réseau basse consommation le + approprié (Wifi, BlueTooth). Ne communiquer qu'au besoin
- Possibilité de stockage et de traitement local des données (minimiser les échanges radio): mémoire + algos (DSP + OS embarqué pour aller + loin). Optimiser le process local
- Possibilités d'employer des répéteurs intermédiaires et de diminuer les distances acceptables entre capteurs et Superviseur.

Mais à un moment il faut :

- Adjoindre au capteur une ou plusieurs sources de **récupération d'énergie externe pour charger les batteries et assurer le fonctionnement continu**

Philosophie : consommer moins et récupérer de l'énergie ambiante !

3) Les enjeux scientifiques et techniques

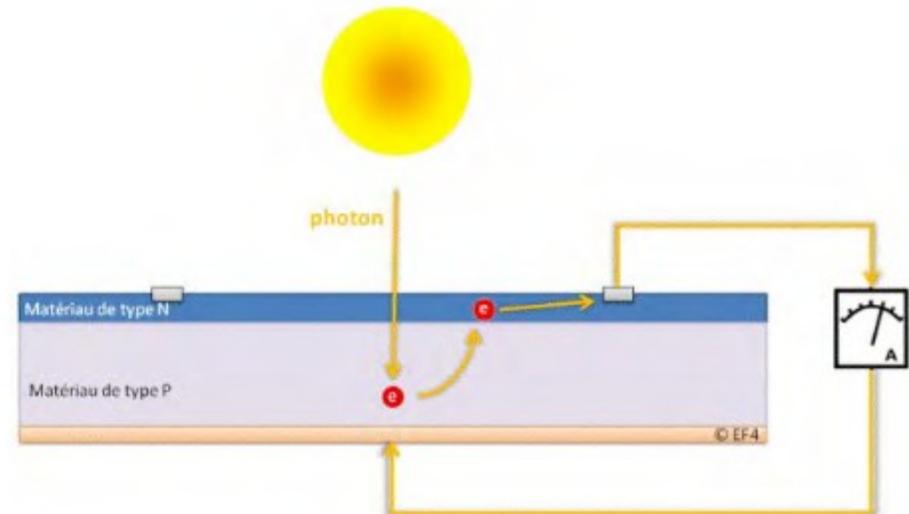
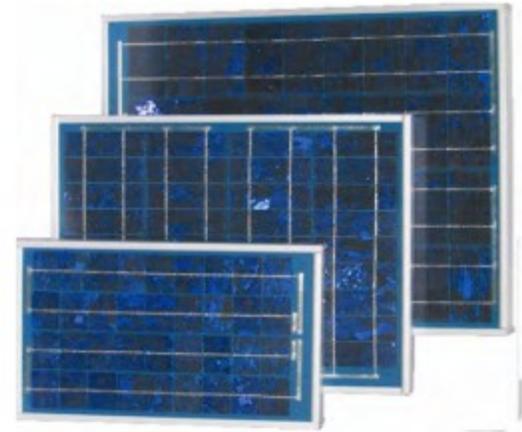
3.1) L'énergie et les WSN



Les principales sources d'énergie :

Les panneaux solaires :

- utilise l'effet photovoltaïque
- technique relativement connue (~30 ans)
- en plein essor
- énergie de l'ordre : $\sim 100 \text{ mW}$ à qqs W par m^2
- rendement : de 10 à 16 % selon techno
- impose l'outdoor évidemment
- durée de vie ≥ 10 ans



3) Les enjeux scientifiques et techniques

3.1) L'énergie et les WSN



Les principales sources d'énergie :

Les différents panneaux solaires :

Comparaison des 3 grandes familles de panneaux solaires :

- qqs dizaines de cm



Polycristallins : rendement correct (10 - 12%) +100 Wc/m² - Inefficace lors de mauvais temps ou faible luminosité +/- bon marché + en plein développement + simple à produire



Monocrystallins : bon rendement (14 - 16%) +150 Wc/m² - Inefficace lors de mauvais temps ou faible luminosité – Assez cher - En plein développement



Amorphes : rendement faible (5-7%) + fonctionne même avec un faible éclaircissement (cf calculatrice) - moins cher que les 2 autres – intégration sur support souple (meilleur captage)

3) Les enjeux scientifiques et techniques

3.1) L'énergie et les WSN



Dimensionnement du panneau solaire :

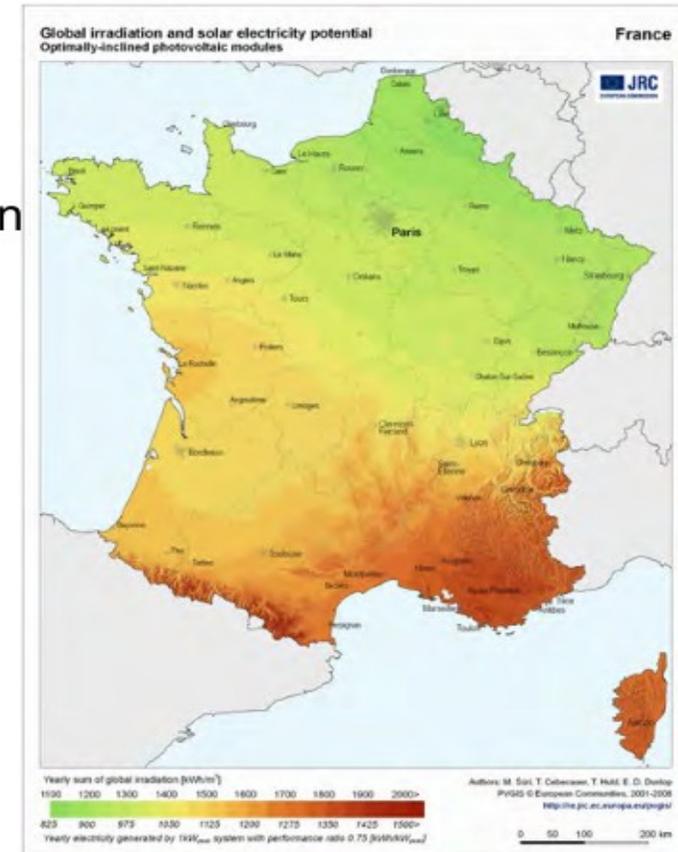
Comment déterminer la taille du PS dont on a besoin ?

- Partant de l'énergie nécessaire pour le capteur
- Partant d'un choix de technologie de PS (mono/poly cristallin ou amorphe) on connaît le rendement
- Partant des bases de données disponibles (HelioClim-1, NASA SSE, ESRA) et assez fiables
 - W/Jour_de_année/Lieu/m²
- Surface du panneau connue => calcul prévisionnel de l'énergie théorique disponible tout au long de l'année pour un site donné



Mois	H(70)	Hopt	lopt
Jan	1740	1680	63
Feb	2670	2670	57
Mar	3840	4100	47
Apr	4010	4670	32
May	3910	4910	18
Jun	4020	5250	13
Jul	4230	5450	17
Aug	4350	5240	27
Sep	4350	4770	43
Oct	3380	3430	55
Nov	2520	2390	64
Dec	1560	1460	66
Year	3880	3880	36

Hopt : Irradiation on optimally inclined (36°) plane (Wh/m²)
H(70) : Irradiation on plane at angle : 70deg. (Wh/m²)
lopt : Optimal inclination (deg.)



3) Les enjeux scientifiques et techniques

3.1) L'énergie et les WSN



Les principales sources d'énergie :

Eolien : mini centrales éoliennes

- bon rendement (max 59 %)
- ordre : qqs Watts à qqs 10aines de Watts
- Inconvénient : non déterministe
- fonctionnement outdoor bien pensé et dépendant du lieu
- dimensions encore importantes / fixations

En cours de R&D des composants MEMS-Eolien
(Micro Electro Mechanical Systems) utilisant l'effet piezo



© DWTMA 1998

Principe : génératrice à induction
principe de la dynamo

3) Les enjeux scientifiques et techniques

3.1) L'énergie et les WSN



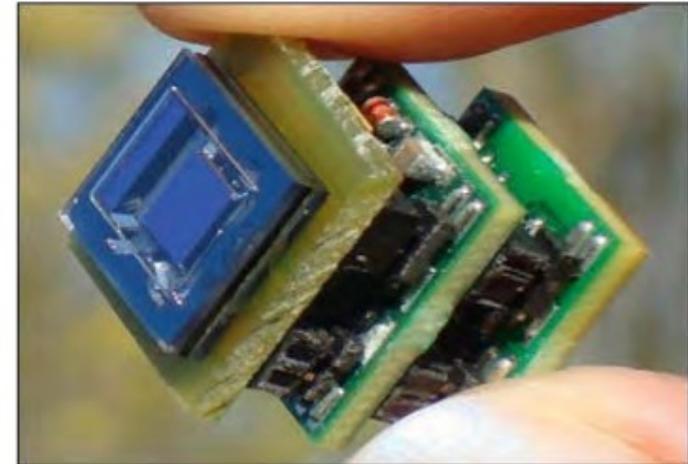
Les principales sources d'énergie :

Energie de vibration / déformation :

- principe de l'effet piezo électrique
- résonne à une ou une plage de fréquence limitée (souvent trop haute)
- souvent à base de MEMS
- faible niveau d'énergie : **qqmW à 10 mW sur qqm cm²**
- +ou- sur étagère
- très dépendant du lieu d'emploi / fréquence locale
- gros travaux de R&D en cours (CEA-LETI)

Notamment :

- piezo large bande : plusieurs μ -systèmes en parallèle
- polymères électrostrictif : énergie de déformation



3) Les enjeux scientifiques et techniques

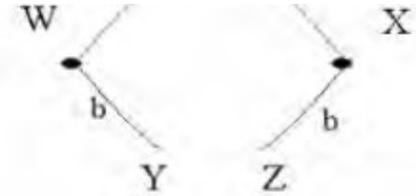
3.1) L'énergie et les WSN



Énergie issue du gradient de température :

- principe de l'effet Seebeck :

Une différence de température entre les deux jonctions W et X peut induire une différence de potentiel électrique entre Y et Z (a et b : 2 conducteurs de nature différente)



- effet Peltier = l'inverse



- faible niveau d'énergie : **qqs 10 mW**

- rend le système très dépendant du lieu d'emploi. Challenge :

Maintenir un gradient thermique élevé (+ de 10/20 °C) aux bornes du système. Contraintes d'étanchéité.



3) Les enjeux scientifiques et techniques

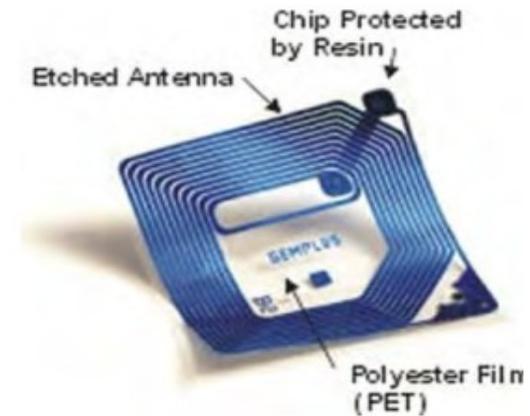
3.1) L'énergie et les WSN



Les principales sources d'énergie :

La télé-alimentation / alimentation électro-magnétique :

- Principe : des ondes électro-magnétiques à des gammes de fréquence et d'amplitude déterminées excitent un transducteur intégré au capteur et qui délivre des charges électriques
- Exemple le + aboutie : la **RFID passive** (active = utilise 1 batterie)
- Associée à une puce électronique, le système induit peut recevoir et répondre aux requêtes radio émises depuis l'émetteur-récepteur.
- Puces électroniques comprenant un identifiant et qqs données complémentaires.
- Objets : objets, antivols,...
- Alimentation/Interrogation en champ très proche : **qqz dizaines de cm**
- Exemple de RFID-active : télépéage. **qqz dizaines de m.**
Plus les pbs de sécurité
- Techno adaptée pour des systèmes communiquant très peu de données très peu souvent et impliquant très peu de process
- Intéressant pour les systèmes enfouis (ds le béton...)



3) Les enjeux scientifiques et techniques

3.1) L'énergie et les WSN



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

~100 mW au W



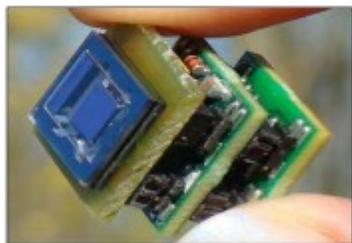
Solaire

~10aines W



Vent

~ 10aine μ W

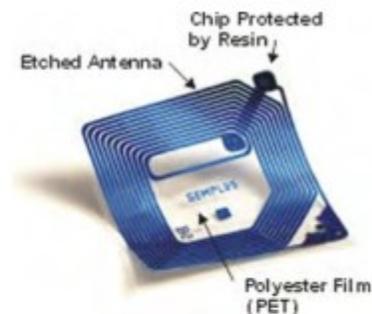


Vibration



Chaleur

$W < 0$



E.M.

3) Les enjeux scientifiques et techniques

3.1) L'énergie et les WSN



Peu de WSN avec optimisation de la source solaire

Objectifs :

- récupérer le maximum d'énergie (et pas juste lorsque $V_{ps} > V_{batt}$)
- Réduire dimensions et donc coûts et exploitation du panneau solaire





3) Les enjeux scientifiques et techniques

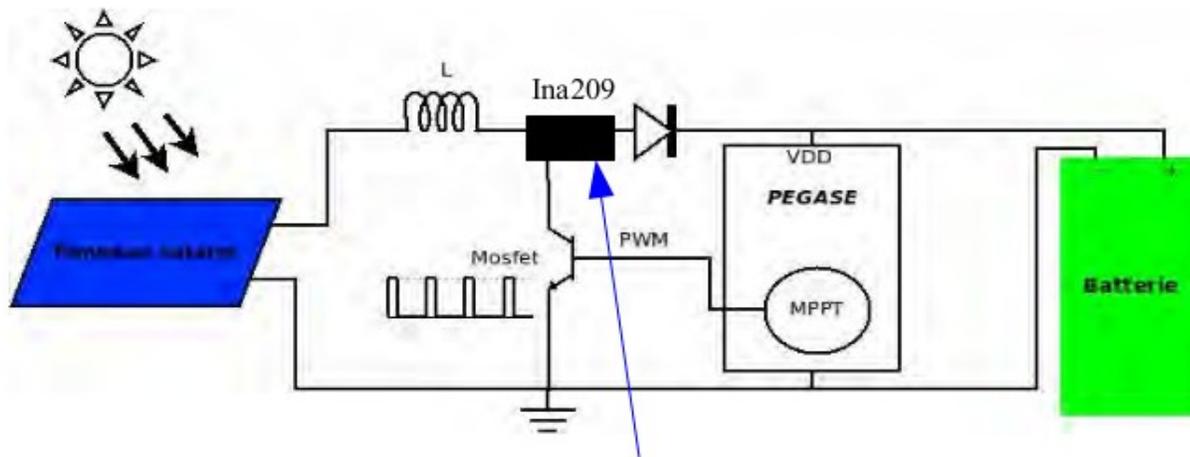
3.1) L'énergie et les WSN

La gestion et l'**optimisation** de la source et du stockage:

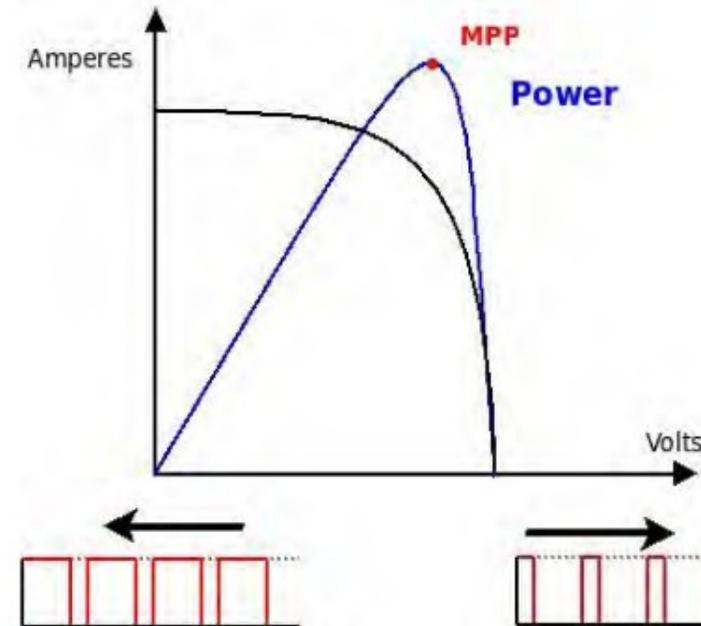
Principe de l'algorithme de **MPPT: Maximum Power Point Tracking**

Le montage boost offre une augmentation de la Tsource mais pas le point maximale

MPPT = un algorithme à implémenter et qui **modifie en temps réel et en permanence le pas de la PWM** pour rechercher le maximum de la puissance ($V * I$) issue du PS + self via un transistor MOSFET



A l'aide du INA209, V et I sont lues en tps-réel



3) Les enjeux scientifiques et techniques

3.1) L'énergie et les WSN

Pour aller plus loin, tendances ou idées :

1) Auto détection de l'encrassement du PS : comparer chaque jour « Énergie Récupérée / Énergie théoriquement Récupérable » → suivre évolution de ce rapport
Plus généralement : voir le « PS comme capteur » (photons, météo,...)

2) Puisque le dimensionnement Batterie + PS est aligné sur les mois les plus sombres, proposer des algorithmes « réactifs » : plus puissants ou offrant plus de fonction lorsque l'énergie solaire ne manque pas

3) Développement des OPV : Panneaux Solaires Organiques : moins chers, moins rentables en plein développement (cf Armor)

4) Vers de nouvelles récupérations de l'énergie. Exemple thèse IETR / UGE sur la récupération du flux de l'air par brins piezo. (exemple : en tunnels)



3) Les enjeux scientifiques et techniques

3.1) L'énergie et les WSN



Les batteries :

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	--	++	++		+	++	--	--

3) Les enjeux scientifiques et techniques

3.1) L'énergie et les WSN

Les batteries :

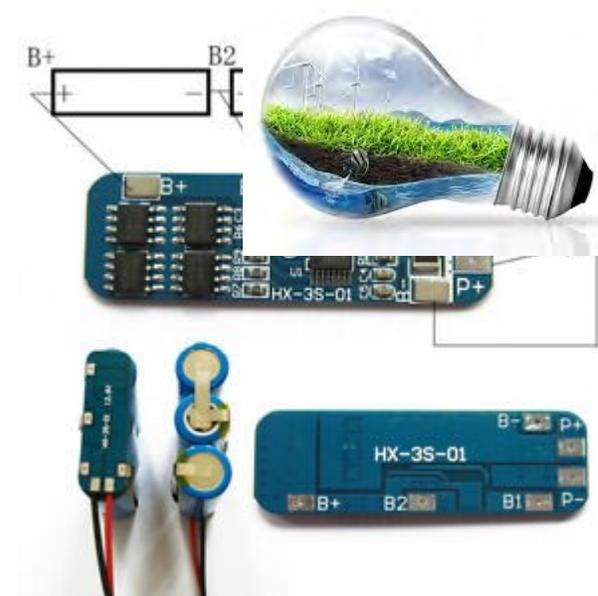
Tendances :

Guerre de la R&D et des brevets dans les batteries (drivée par le Véhicule Electrique). Cf mars 2021 :

« Samsung a réussi à développer des «boules de graphène» capables daugmenter la capacité de ses batteries lithium-ion actuelles de 45% et de se recharger cinq fois plus vite que les batteries actuelles»

Suggestion de R&D :

- Baisse des prix + augmentation des capacités des **SuperCapa**
- => **Mixer Batterie Lithium + SuperCapa** pour bénéficier des charges longs termes et emmagasiner l'énergie volatile
- Evacuer ainsi la contrainte des BMS et de la régulation qu'impose le Lithium



Contrainte des BMS !



3) Les enjeux scientifiques et techniques

3.2) Les protocoles Wireless



3) Les enjeux scientifiques et techniques

3.2) Les protocoles Wireless

Pourquoi utiliser un protocole pour la communications entre les capteurs ?

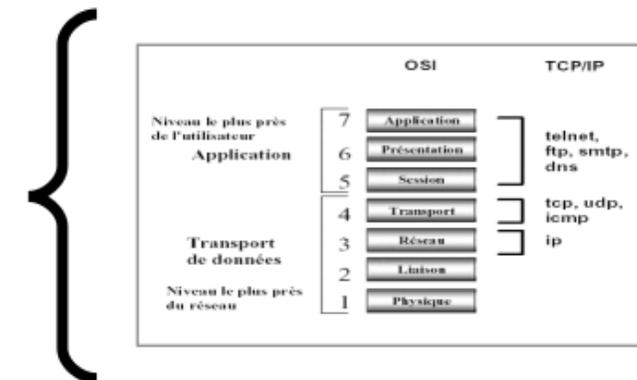
Un protocole modélise un ensemble de couches **logicielles** et **matérielles** INDEPENDANTES qui assurent la transmission des données.

Un protocole garantit que **tout octet émis d'un point A du réseau parvient à un point B sans perte d'intégrité**. En cas de non-acheminement (coupure réseau, masquage), le protocole « indique » à l'application A ou B que le transfert a échoué. Le programme assigné au Capteur **peut alors « réagir » à cet échec**.

Exemple : le modèle 7 couches de l'OSI est mondialement diffusé sous le nom de **Internet Protocole ou TCP/IP**.

(Mécanisme des « sockets » en C)

Ce protocole a 40 ans !



3) Les enjeux scientifiques et techniques

3.2) Les protocoles Wireless

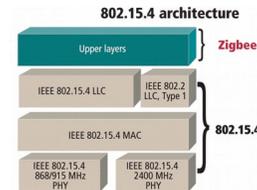
Les principaux protocoles WIRELESS connus :



802.11xxx



Zigbee / 802.15.4



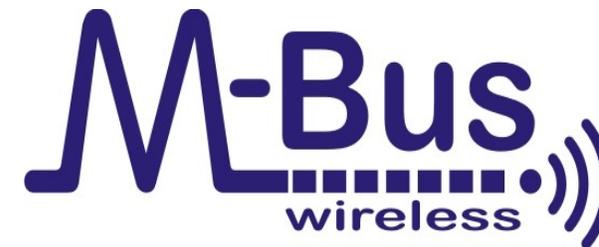
BlueTooth
802.15.1



Télécom



LiFi



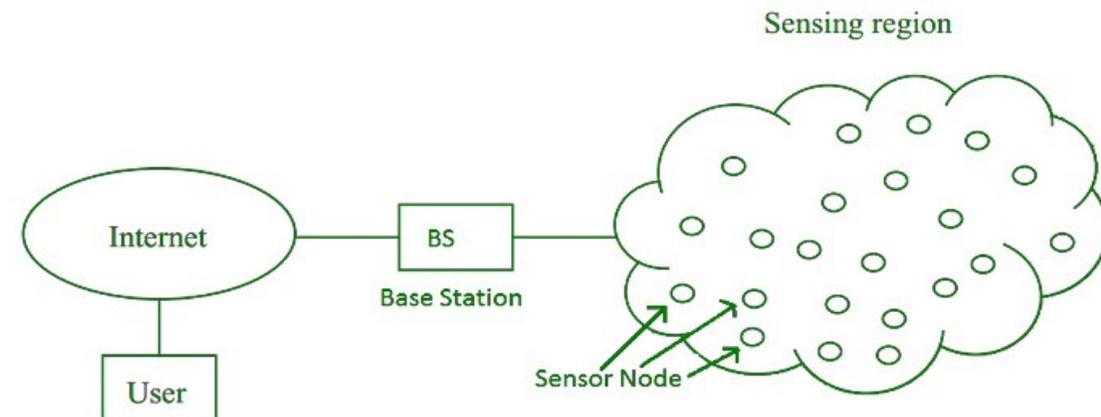
3) Les enjeux scientifiques et techniques

3.2) Les protocoles Wireless

Pas de « protocole idéal » : très dépendant du Cas d'Application / CDC

Principaux critères pour choisir et qualifier un protocole :

- Consommation / énergie : 1, 10, 100 mW. Poss. de OFF / veille...
- Fiabilité
- Sécurité et résilience à l'intrusion
- Scalabilité et nombre de noeuds max. (Ex Bluetooth = 7 noeuds max)
- Débits max envisageables
- Facilité de mise en oeuvre (Zigbee = une alliance de constructeur)
- Portée / distance : 1m, 10m, **100m**, **1 km** ?
- Topologies offertes : multihop, étoile, bus...
- Support / communauté
- ...



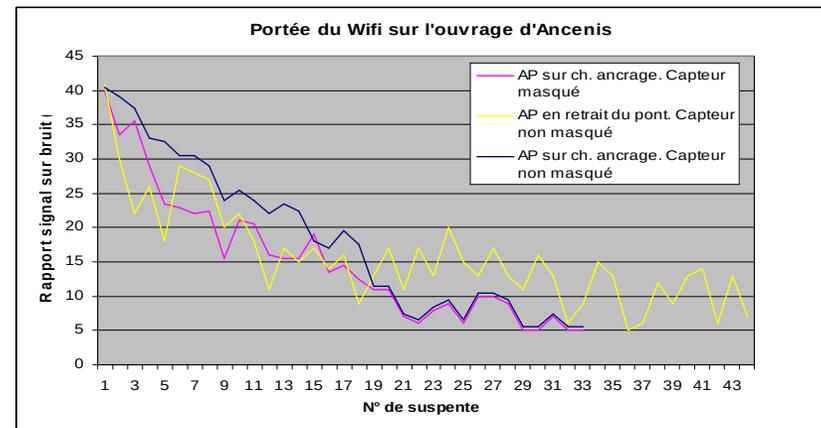
3) Les enjeux scientifiques et techniques

3.2) Les protocoles Wireless

Importance de la validation de terrain : théorie de la datasheet vs conditions in situ

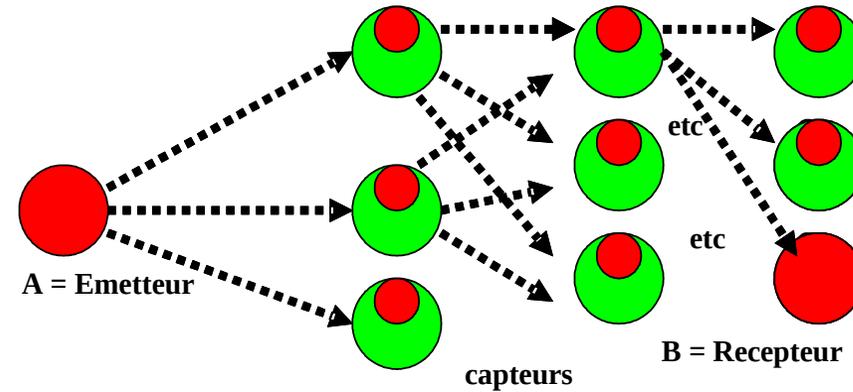
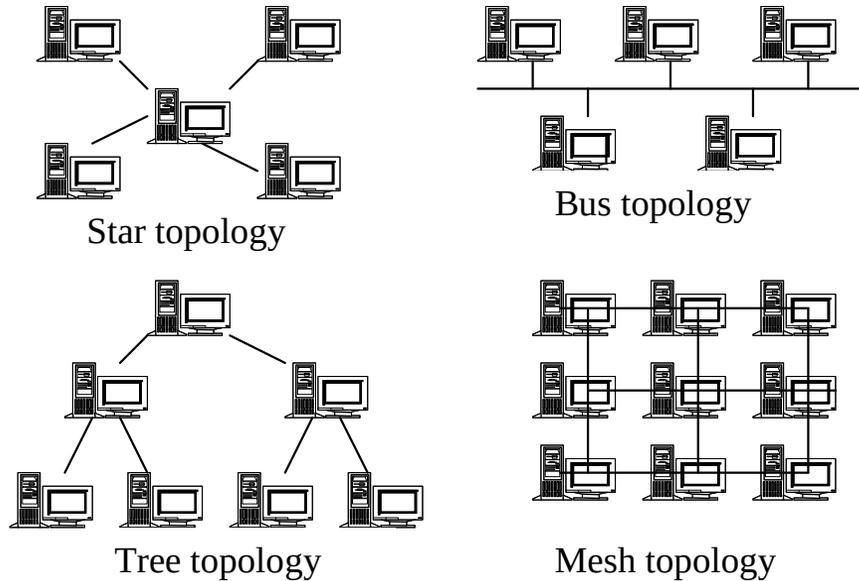


Exemple : campagne de mesures du rapport signal à bruit du WiFi 802.11b opéré localement sur le pont d'Ancenis



3) Les enjeux scientifiques et techniques

3.2) Les protocoles Wireless



Exemple : échec cuisant de la technologie Zigbee => chemins critiques

Importance de la **topologie** !

3) Les enjeux scientifiques et techniques

3.2) Les protocoles Wireless

Quand on conçoit un concept Wireless , en général on envisage un protocole local c'est-à-dire utilisant un LAN

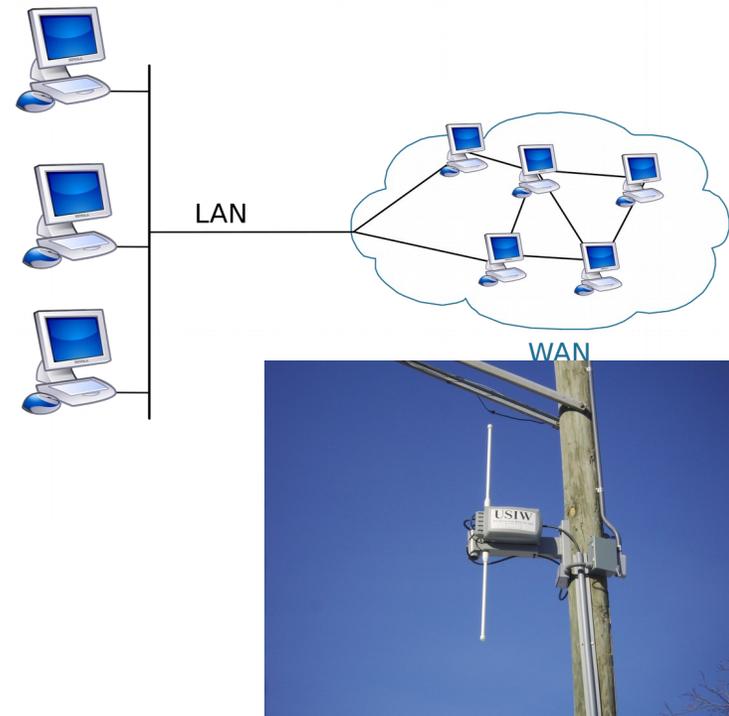
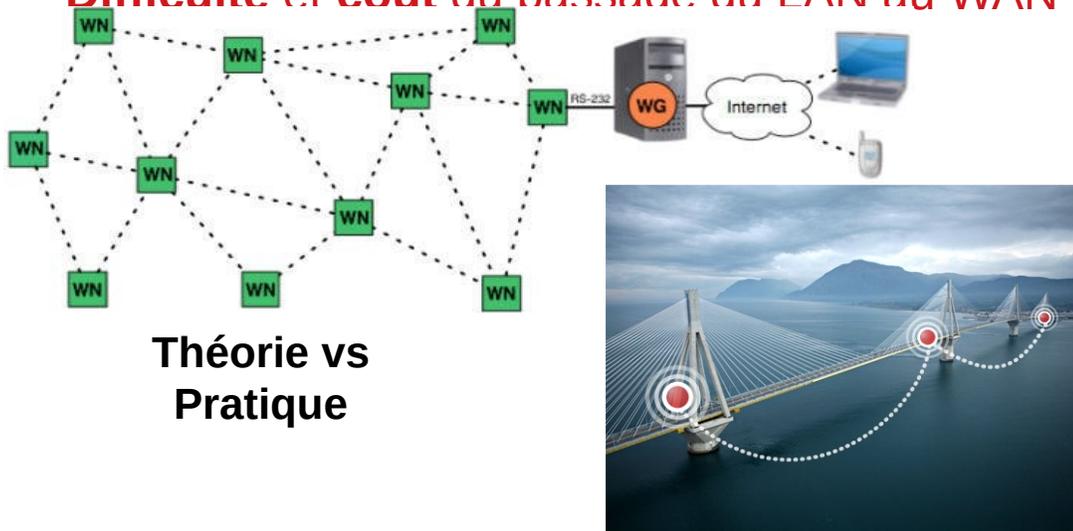
TECHNOLOGY	APPLICATION	SUCCESS METRICS	DATA RATE	RANGE
Wi-Fi	LAN, Internet	Speed, Flexibility	.1-7 Gbps	100m
Li-Fi	LAN, Internet	Security, Speed, Cost	1-3.5 Gbps	10m
Bluetooth	PAN, Mobile Credentials	Cost, Convenience	48 Mbps	<300m
ZigBee	Sensor Networks	Reliability, Power, Scalability, Cost	.250 Mbps	70-300m

3) Les enjeux scientifiques et techniques

3.2) Les protocoles Wireless

Deux constats des limites à franchir :

- **Échec** des protocoles locaux (Bluetooth / WiFi) conçus comme des protocoles bureautiques ou télécom et **détournés pour l'IOT : énergivores, portées limitées, en sucapacité, surcoût (abonnement 3G)...**
- **Échec** relatif des protocoles Multisaut (mesh) : chemins critiques, dépendance fortes, energievore, vulnérabilité
- **Difficulté et coût** du passage du LAN au WAN



3) Les enjeux scientifiques et techniques

3.2) 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



Avenir à surveiller :



5G and IoT Will Be Leading a Paradigm Shift in M2M Communication Management

3) Les enjeux scientifiques et techniques

3.2) Les protocoles Wireless



- Opérateurs LoRa ou être son propre opérateur
- Opérateurs : TheThingNetwork, Objenious, Orange
- Bande passante : jusque **qqs ko/ jours**
- Attention : pas de l'IP ! Intégrité des données, sécurité, bidirectionnalité ?
- Très low power (mW) + low cost : 1 E / Mois pour 3 ans / node

- Sigfox = 1 technologie et 1 opérateur Sigfox:fermé
- Bande passante : **1440 octets / jour**
- Attention : pas de l'IP ! Intégrité des données, sécurité, bidirectionnalité ?
- Perte de vitesse au profit de LoRa mais déploiement Sigfox Satellite
- Très low power (mW) + low cost : 1 à 9 E / an / node



5G and IoT Will Be Leading a Paradigm Shift in M2M Communication Management

- Déploiement en cours
- Peu de recul sur capacités réelles et surtout en terme de consommation vue du device Sensor
- IP et birectionnel
- Très haut débit (qqs 10 Mo/s)
- Modèle économique IOT : non encore dévoilé

3) Les enjeux scientifiques et techniques

3.2) Les protocoles Wireless



Les enjeux pour les protocoles Wireless en cours ou en émergence au service du SHM :

- Enjeux de la **Bande Passante** => plus elle est faible et plus les traitements seront locaux au capteur
- Enjeux de la **consommation** : la 5G ou des protocoles réellement bi-directionnels sont consommateurs d'énergie et elle demeure à être qualifiée
- Pour le SHM (i.e. Structures à Enjeux) le critère de la **fiabilité** est déterminant : pas de perte de données, intégrité et (cyber) sécurité, latence contrôlée,...
- Problème des **zones blanches** (exemples : structures en mer non couverte par opérateur) auquel pourrait répondre les protocoles par satellites ...
- Enjeux de la **stabilité technologique** : aujourd'hui un ennemi de l'IOT est l'IOT lui même : foisonnement des protocoles et normes IEEE Wireless. Exemple « Question de la DT SNCF : qui me garantit que mes passages à niveau télé-surveillés en LoRa le seront encore en 2030 ? ».
- Éthique de la 5G et du pré-requis énergétique que le réseau suppose ?

POINT D'ETAPE

Points précédents :

- Pour l'**énergie** et le **wireless** : assurer une veille et une qualification des évolutions technologiques ;
- le chercheur en WSN/SHM est +ou- **dépendant de ces évolutions technologiques**

Points suivants :

- Des questions peu ou pas adressées dans les WSN
- Pourtant déterminantes pour leur épanouissement
- Le chercheur a la main et est attendu pour pousser ces évolutions



3) Les enjeux scientifiques et techniques

3.3) L'intelligence embarquée

Par intelligence embarquée : **ne pas comprendre qu'il s'agit de transposer du code Matlab** sur un système Wireless

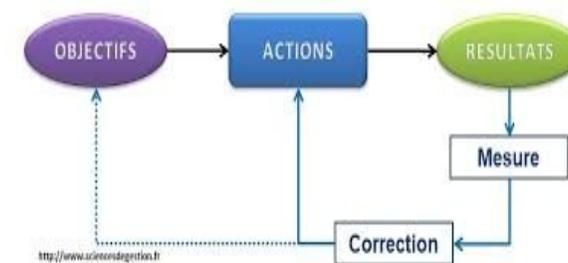
Intelligence embarquée sur un WSN : **prise en compte, au niveau du noeud, des spécificités qu'impose le wireless et les conditions de terrain**



La synchronisation



Placement optimal



Auto test, auto correction

3) Les enjeux scientifiques et techniques

3.3) L'intelligence embarquée : la synchronisation



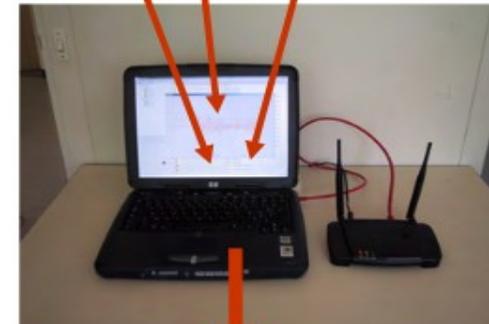
Ou comment doter des systèmes sans liens physiques d'une base de temps commune ?

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

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 !



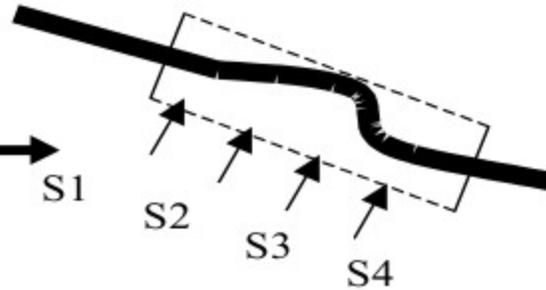
Alerte !

3) Les enjeux scientifiques et techniques

3.3) L'intelligence embarquée : la synchronisation



Exemple 1 : Mesurer les mouvements d'un hauban



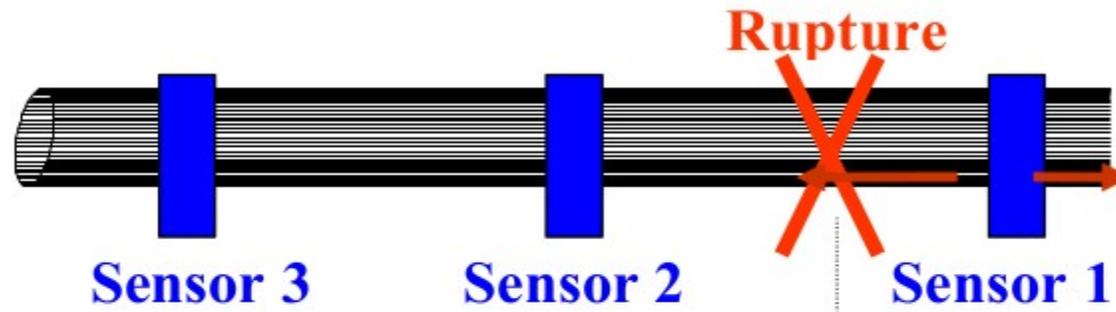
- Vibrations jusque ~ 30 Hz
 - Echantillonnage des capteurs à ~ 300 Hz
- => Conclusion, pour que les données puissent être rationnellement comparées : chaque capteur $\{S_i, S_j\}$ doit avoir une base de temps tel que $\| T_i - T_j \| \leq 3 \text{ mS} \forall t$.

3) Les enjeux scientifiques et techniques

3.3) L'intelligence embarquée : 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 $\| T_i - T_j \| \leq 30 \mu S \forall t$.

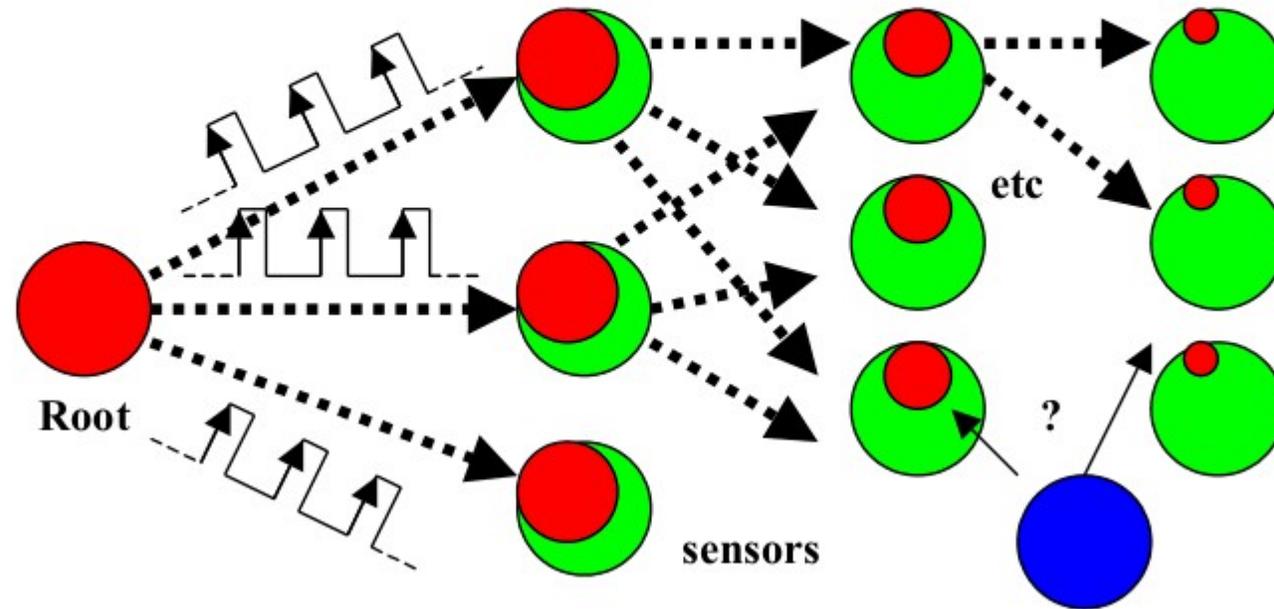


3) Les enjeux scientifiques et techniques

3.3) L'intelligence embarquée : la synchronisation

Biblio :

- Domaine le + actif en terme de R&D.,
- Basées sur mécanisme de diffusion (**Broadcast**) : Le superviseur du réseau envoie **périodiquement** une balise qui « reset » la base de temps des capteurs sans-fil à réception.



3) Les enjeux scientifiques et techniques

3.3) L'intelligence embarquée : la synchronisation



Biblio :

- **NTP : Network Time Protocol**

Réseaux de capteurs TCP/IP (filaire IEEE 802.3 ou sans fil : WiFi IEEE 802.11). Les capteurs prennent en compte la latence du réseau (moyennage) et corrigent la dérive

- + Précision jusqu'à 10 μ s, fiable,
- Solution très lourde = une pile NTP à chaque capteur; consomme beaucoup (pas de sleep-mode). La précision décroît avec la distance

- **RBS : Reference Broadcast Protocol**

Ressemble au NTP mais fonctionne au niveau MAC, pas forcément source externe de précision (ex.: GPS) au niveau Superviseur.

- + Précision jusqu'à 10 μ s, fiable,
- +/- : nécessite du (re)développement hardware à chaque capteur
- : encore en phase de validation, consomme beaucoup (pas de sleep-mode)

- **Autres : TPSN** (Timing-sync Protocol for Sensor Network), TDP : (Time D

	Sync. distribuées	Sync. Post-facto
Précision	Peut être très bon (μ s) ↓ avec la distance, taille réseau	Correcte (ms) mais non déterministe ! ↓ avec la distance, taille réseau
Conso. Energie	Mauvaise ou alors ↓ précision	Correcte
Dépend de la topologie	Très dépendant	Peu dépendant
Prêt à l'emploi	Oui (RBS et TPSN) mais pas de réel standard	Pas encore (ou inconnu) Trav. en laboratoires

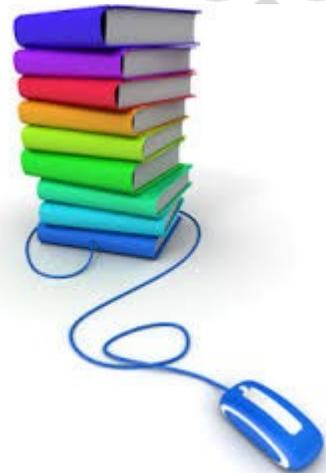
3) Les enjeux scientifiques et techniques

3.3) L'intelligence embarquée : la synchronisation



Constat bibliographique :

- **Il n'existe pas (vraiment) de solution industrielle** assurant dans n'importe quel type de réseau un niveau de synchronisation :
 - d'une précision d'un niveau paramétrique : mS, μ S, nS...
 - d'une stabilité (variance) garantie
 - Indépendante du réseau wireless lui-même : topologie, distance, nombre de nœuds, présence de routeur...
- L'immense majorité des solutions de synchronisation dans les WSN utilisent le réseau wireless pour se synchroniser. Ce qui :
 - est très **énergivore** (communiquer = consommer)
 - **limite les distances et/ou le nombre de nœuds synchronisables**
 - n'est pas déterministe : typiquement RBS : $100 \mu\text{S}$ à $\pm 30 \mu\text{S}$ dans un réseau très local
- Université Gustave Eiffel et d'autres acteurs WSN attaquent de front cette question avec des **solutions basées GPS** :
 - Indépendance du réseau
 - Consommation d'un récepteur GPS à prendre en compte



3) Les enjeux scientifiques et techniques

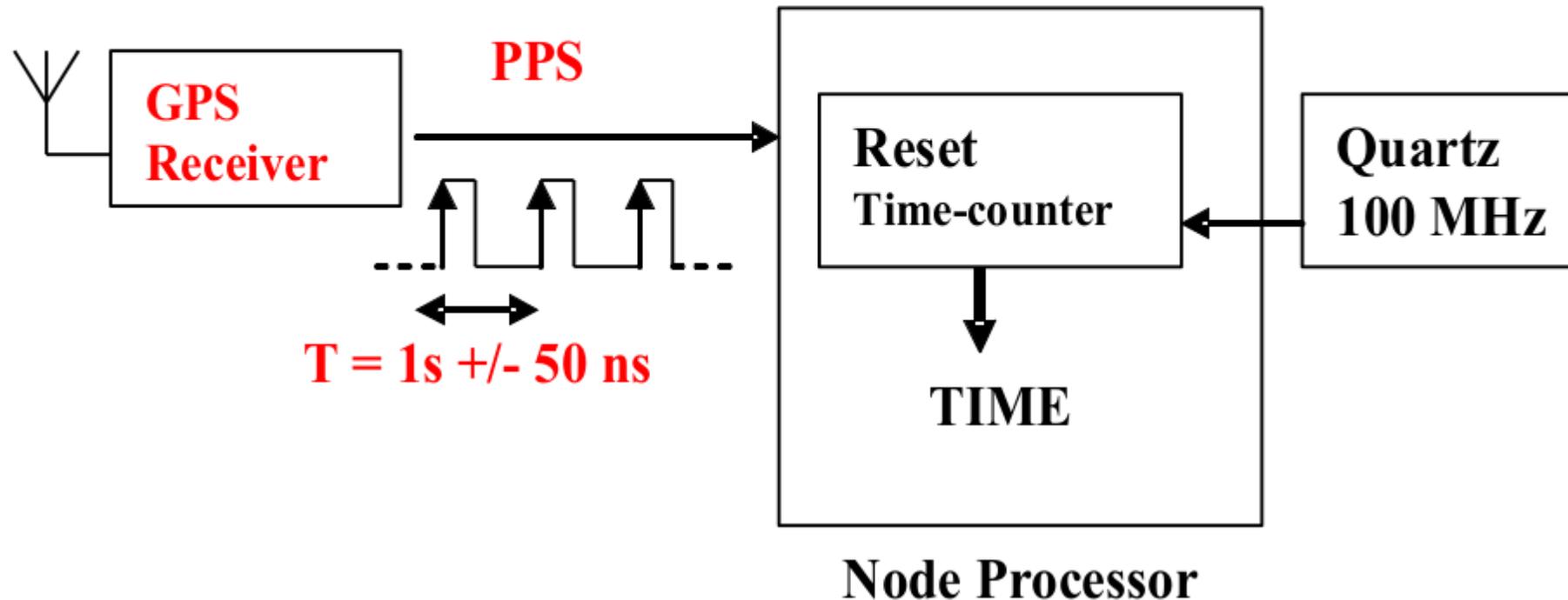
3.3) L'intelligence embarquée : la synchronisation



Principe : chaque Sec, tout récepteur GPS délivre deux signaux:

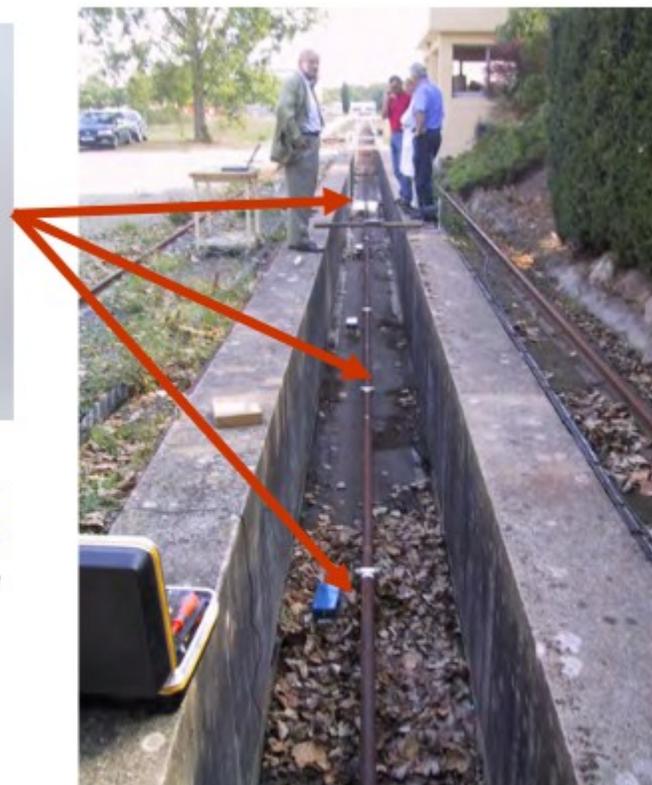
- une trame série RS232 contenant heure GMT, longitude, latitude, constellation,...
- un signal carré **PPS synchrone à 20/50 nS** entre tous les récepteurs GPS.

Sur chaque front du signal PPS, le capteur « reset » sa base de temps.



3) Les enjeux scientifiques et techniques

3.3) L'intelligence embarquée : la synchronisation



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).

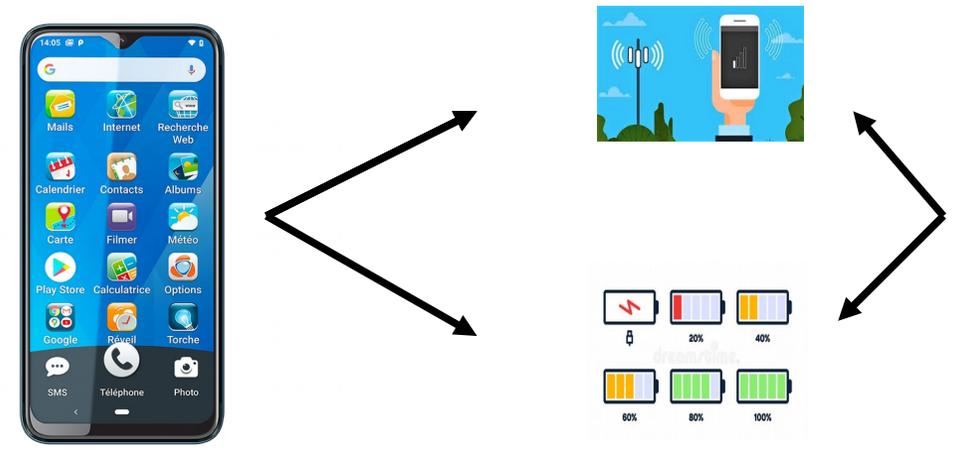
Précision nécessaire **< 30 μ S !**
Comment faire ? Comment optimiser ?
(cf. PEGASE)

3) Les enjeux scientifiques et techniques

3.3) L'intelligence embarquée : placement optimal

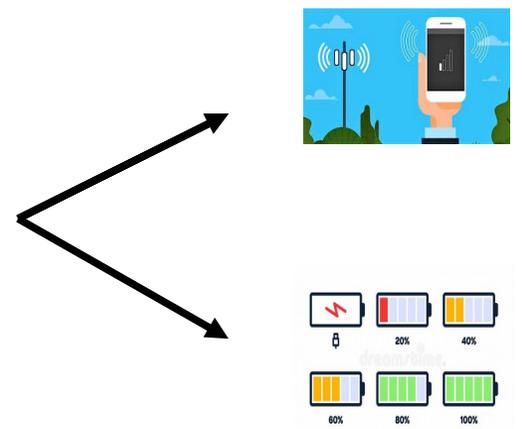


Analogie : un Smartphone est un wireless sensor comme un autre



Le Smartphone me dit :

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



?



Que dit le capteur sans fil ? :

- Rien !!!

3) Les enjeux scientifiques et techniques

3.3) L'intelligence embarquée : placement optimal



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 du end-user et de l'opérateur**
- Passer du « j'installe où je peux » à « j'installe où je dois »

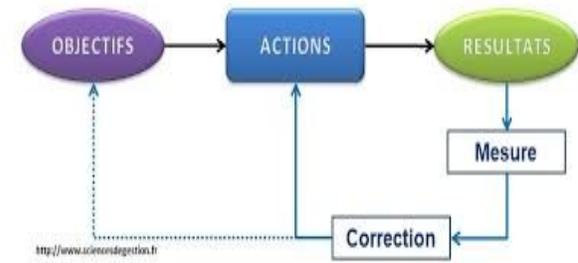
Point clé du développement des capteurs sans fil :

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



3) Les enjeux scientifiques et techniques

3.3) L'intelligence embarquée : 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 ?

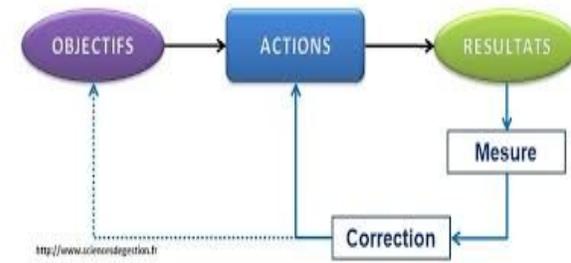


Futurs centre de stockage Andra...



3) Les enjeux scientifiques et techniques

3.3) L'intelligence embarquée : 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 de 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 observe la bonne datation



4) Exemples applicatifs

Les exemples donnés ici veulent illustrent que la « **simple** » prise en compte de la **synchronisation** a ouvert un champ incroyable de nouveaux projets pour la labo SII



Thèse sur la **synchronisation par GPS**
→ David Pallier / SENTAUR
+ Travaux amonts



Surveillance acoustique des câbles



Surveillance des lignes H.T.



Surveillance US des rails



ENABLE

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**
- Contre-intuitivement, en outdoor, certains besoins sont +ou- bien couverts comme pour **l'énergie** via les **panneaux solaires**
- 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...)
- De fortes attentes des utilisateurs ne sont pas encore comblées ! Cf Livre Blanc GT SHM @ Cofrend
- **L'émergence et la convergence des protocoles Wireless** est à suivre et qualifier : Lora/ SigFox, 5G.... la surenchère des protocoles est aujourd'hui un frein
- Dans tous les cas, militer pour plus d'intelligence embarquée pour :
 - Moins de data produites → moindre dépendance au réseau => couplage calcul/structure
 - Moins d'empreinte CO2 (énergie)

5) Conclusions & perspectives

D'autres enjeux à prévoir :

- Empreinte CO2 des capteurs eux-mêmes, des données produites, de l'empreinte numérique...etc (on produit 1 zeta octets par jour)
- Enjeux humains :
 - un cheminot doit il se reconvertir en data-scientist ?
 - perte de l'expertise technique ? Syndrome du pilote de ligne
- Vers une « intelligence mobile » : vieillissement de l'électronique vs celle des ouvrages ! Un GAP !
- Cofrend et Livre Blanc et démarche de structuration + journée du 19 oct 2021

5) Conclusions & perspectives

BIG DATA at Airbus Group
We are sitting on a huge amount of data we do not fully leverage
Example: Aircraft Operation Data

		Stored & used		Stored & limited use		Not stored & not used	
		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
		Data Recorded/flight	500 GB	450 MB	300 GB	N/A	N/A
			<small>450 TB produced for the certification process in 2014</small>				
	A380	#Parameters	320 000	4 000	400 000	5.800	2,6 TB
		Data Recorded/flight	250 GB	450 MB	200 GB	1,1 PB	
	Long Range	#Parameters	14 000	1 500	40 000	84.000	17 TB
		Data Recorded/flight	10 GB	200 MB	30 GB	2.5 PB	
	Single Aisle	#Parameters	12 000	1 500	13 000	744.0	
		Data Recorded/flight	10 GB	50 MB	12 GB		

~30 years (Flight tests)

Transferring data from structure.stanford.edu...



5) Conclusions & perspectives



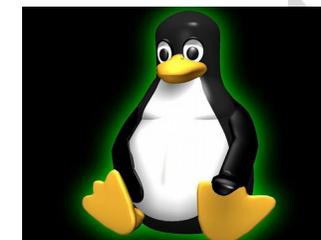
2000 ans



Développer une science portable !!!

Votre algorithme sera toujours valable dans 10 ans

Pas votre carte électronique





4ÈME JOURNÉE ANNUELLE SHM@COFREND, LE 19 OCTOBRE

from 10/19/21
to 10/19/21



Les membres du COPIL SHMv de la COFREND vous donne Rendez-Vous le 19 Octobre 2021 pour la :

4^{ème} Journée annuelle SHM@COFREND

Cette journée s'inscrit dans une nouvelle phase de structuration de la filière française du SHM, notamment par :

- La restitution des travaux des membres du COPIL et des GT SHM, soutenue par le cabinet en stratégie CMI,
- La concrétisation du livre blanc du SHM en France,
- Des interventions techniques et scientifiques,
- Des témoignages sur de grands projets institutionnels collaboratifs,
- Et un invité plénier international.

Le programme, ainsi que les détails de la journée vous seront communiqués ultérieurement.

En attendant, **réservez la date du 19 octobre.**



Merçi

