MATÉRIELS ET MESURES ASSOCIÉES

De la grandeur physique à la donnée exploitable

Que mesure-t-on, avec quels moyens, quelles performances et quelles limites ?

Un capteur ne mesure pas l'état de santé d'un ouvrage : il mesure une grandeur physique



Willy BOUCHET – DterOuest, Cerema, Angers
Yannick FALAISE – MAST-SMC, Université Gustave Eiffel, campus de Nantes
Emilie LEPRETRE – MAST-SMC, Université Gustave Eiffel, campus de Nantes

Journée technique – Instrumentation des Ouvrages d'Art
7 octobre 2026 – INSA Rennes, Amphi GCU
Organisateurs : CTT – Cerema, en partenariat avec : IMGC et AFGC

De la question à la mesure

- **La question du gestionnaire et la grandeur mesurée ne sont pas la même chose !**

  → Quelques exemples :
  - Cette fissure évolue-t-elle ?
  - Cette pile se déplace-t-elle ?

- Entre la question du gestionnaire et la décision finale, il existe toute une chaîne :



- Le capteur n'est qu'un maillon de la chaîne !
- Pour un gestionnaire la bonne approche commence par : « je veux savoir si ce mouvement évolue et à partir de quelle évolution je dois agir »

Quelles grandeurs mesure-t-on sur un ouvrage ?

Les grandeurs géométriques	Les grandeurs mécaniques	Les grandeurs dynamiques	Les grandeurs environnementales	Les grandeurs liées à la durabilité
▪ Déplacement ▪ Rotation ▪ Ouverture de fissure	▪ Déformations ▪ Efforts	▪ Accélération ▪ Vitesse ▪ Déplacement au cours du temps	▪ Température ▪ Humidité ▪ Vent ▪ Trafic	▪ Potentiel électrochimique ▪ Résistivité

- Les pathologies sont nombreuses, les grandeurs mesurées le sont beaucoup moins !
- Une fois que l'on sait quelle grandeur mesurer, la question suivante est : quelle technologie utiliser ?

➡ Plusieurs moyens de mesure … pour une même grandeur

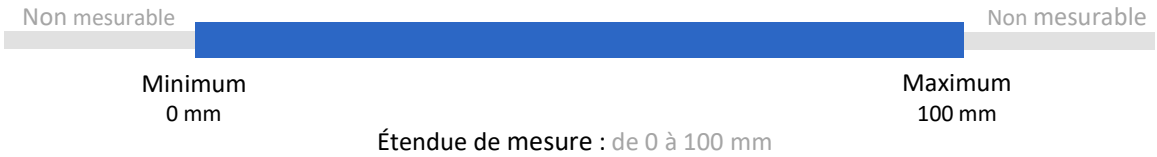
Capteurs ponctuels	Capteurs répartis	Mesures sans contact	Approches globales
▪ LVDT ▪ Jauges ▪ Inclinomètres ▪ Accéléromètres	▪ Fibres optiques distribuées ▪ Chaîne de capteurs	▪ Suivi topométrique ▪ GNSS ▪ Caméra ▪ Caméra / Laser / radar	▪ Essais de chargement ▪ Analyse vibratoire

- Aucune famille ne remplace les autres : elles répondent à des besoins différents et sont souvent complémentaires.

Même grandeur mesurée ≠ même information obtenue

Local ou global ? – relatif ou absolu ? – ponctuel ou continu ? – avec ou sans contact ?

Performance



Étendue de mesure : intervalle des valeurs mesurables.

Résolution : plus petite variation détectable.

Répétabilité : proximité des mesures répétées.

Sensibilité : réaction du capteur à une variation.

Temps de réponse : délai de réaction du système.

Bruit : fluctuations parasites du signal.

Incertitude : doute associé au résultat.

Biais : décalage systématique par rapport à la référence.

Étalonnage : comparaison avec une référence connue.

Saturation : dépassement de la capacité de mesure.

Dérive : décalage progressif dans le temps.

Fréq. d'échantillonnage : nombre de mesures par seconde.

Performance

Étendue de mesure : intervalle des valeurs mesurables.

Résolution : plus petite variation détectable.

Répétabilité : proximité des mesures répétées.

Sensibilité : réaction du capteur à une variation.

Temps de réponse : délai de réaction du système.

Bruit : fluctuations parasites du signal.

Incertitude : doute associé au résultat.

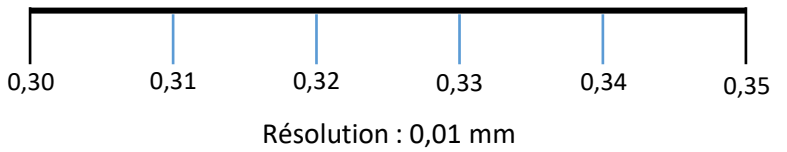
Biais : décalage systématique par rapport à la référence.

Étalonnage : comparaison avec une référence connue.

Saturation : dépassement de la capacité de mesure.

Dérive : décalage progressif dans le temps.

Fréq. d'échantillonnage : nombre de mesures par seconde.



Performance

Étendue de mesure : intervalle des valeurs mesurables.

Résolution : plus petite variation détectable.

Répétabilité : proximité des mesures répétées.

Sensibilité : réaction du capteur à une variation.

Temps de réponse : délai de réaction du système.

Bruit : fluctuations parasites du signal.

Incertitude : doute associé au résultat.

Biais : décalage systématique par rapport à la référence.

Étalonnage : comparaison avec une référence connue.

Saturation : dépassement de la capacité de mesure.

Dérive : décalage progressif dans le temps.

Fréq. d'échantillonnage : nombre de mesures par seconde.

5 répétitions de la même mesure
La grandeur physique reste inchangée



Performance

Étendue de mesure : intervalle des valeurs mesurables.

Résolution : plus petite variation détectable.

Répétabilité : proximité des mesures répétées.

Sensibilité : réaction du capteur à une variation.

Temps de réponse : délai de réaction du système.

Bruit : fluctuations parasites du signal.

Incertitude : doute associé au résultat.

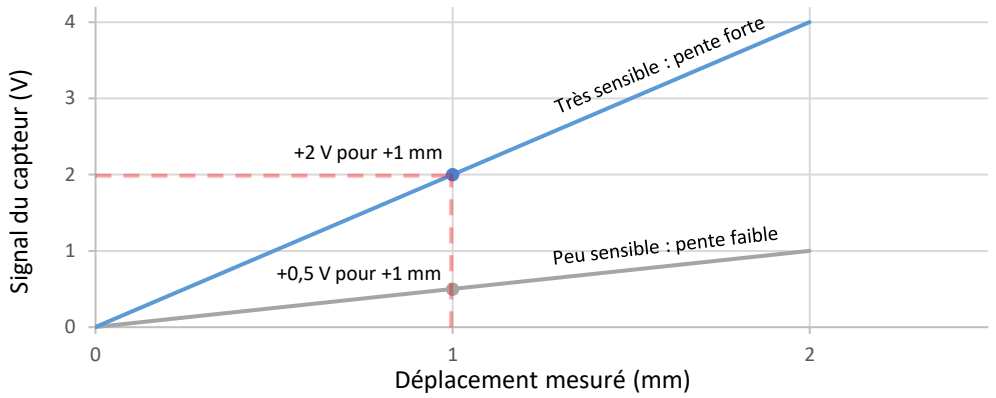
Biais : décalage systématique par rapport à la référence.

Étalonnage : comparaison avec une référence connue.

Saturation : dépassement de la capacité de mesure.

Dérive : décalage progressif dans le temps.

Fréq. d'échantillonnage : nombre de mesures par seconde.



Performance

Étendue de mesure : intervalle des valeurs mesurables.

Résolution : plus petite variation détectable.

Répétabilité : proximité des mesures répétées.

Sensibilité : réaction du capteur à une variation.

Temps de réponse : délai de réaction du système.

Bruit : fluctuations parasites du signal.

Incertitude : doute associé au résultat.

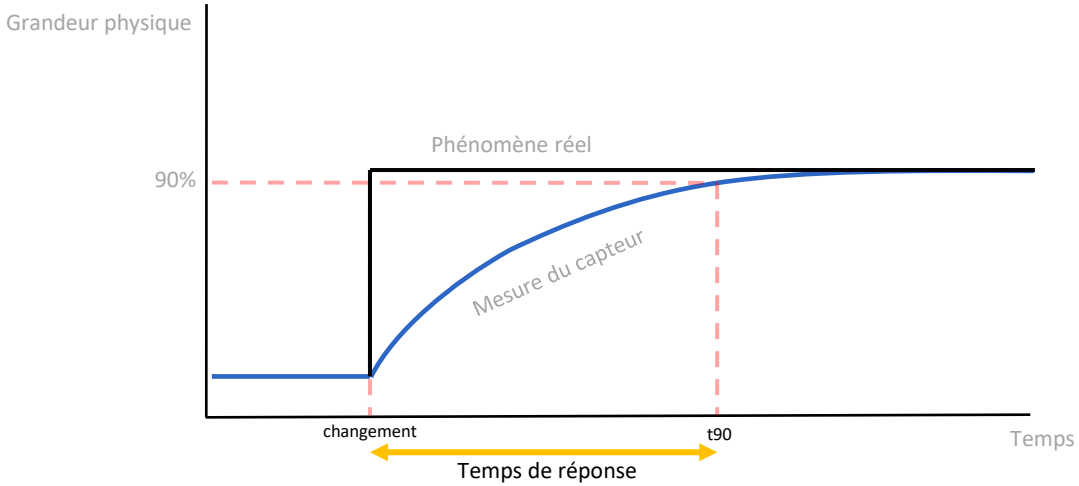
Biais : décalage systématique par rapport à la référence.

Étalonnage : comparaison avec une référence connue.

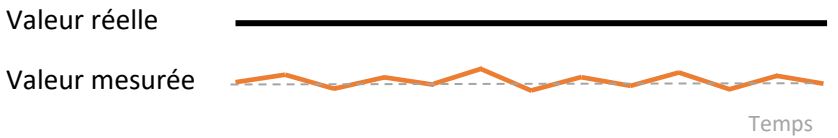
Saturation : dépassement de la capacité de mesure.

Dérive : décalage progressif dans le temps.

Fréq. d'échantillonnage : nombre de mesures par seconde.



Performance



Étendue de mesure : intervalle des valeurs mesurables.

Résolution : plus petite variation détectable.

Répétabilité : proximité des mesures répétées.

Sensibilité : réaction du capteur à une variation.

Temps de réponse : délai de réaction du système.

Bruit : fluctuations parasites du signal.

Incertitude : doute associé au résultat.

Biais : décalage systématique par rapport à la référence.

Étalonnage : comparaison avec une référence connue.

Saturation : dépassement de la capacité de mesure.

Dérive : décalage progressif dans le temps.

Fréq. d'échantillonnage : nombre de mesures par seconde.

Performance

Étendue de mesure : intervalle des valeurs mesurables.

Résolution : plus petite variation détectable.

Répétabilité : proximité des mesures répétées.

Sensibilité : réaction du capteur à une variation.

Temps de réponse : délai de réaction du système.

Bruit : fluctuations parasites du signal.

Incertitude : doute associé au résultat.

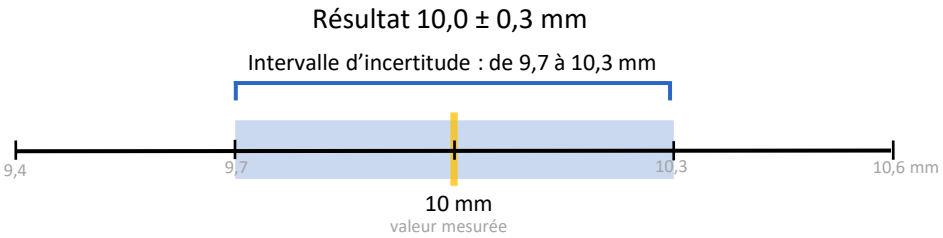
Biais : décalage systématique par rapport à la référence.

Étalonnage : comparaison avec une référence connue.

Saturation : dépassement de la capacité de mesure.

Dérive : décalage progressif dans le temps.

Fréq. d'échantillonnage : nombre de mesures par seconde.



Performance

Étendue de mesure : intervalle des valeurs mesurables.

Résolution : plus petite variation détectable.

Répétabilité : proximité des mesures répétées.

Sensibilité : réaction du capteur à une variation.

Temps de réponse : délai de réaction du système.

Bruit : fluctuations parasites du signal.

Incertitude : doute associé au résultat.

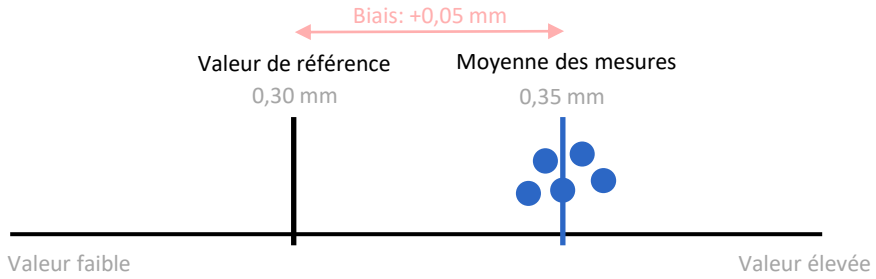
Biais : décalage systématique par rapport à la référence.

Étalonnage : comparaison avec une référence connue.

Saturation : dépassement de la capacité de mesure.

Dérive : décalage progressif dans le temps.

Fréq. d'échantillonnage : nombre de mesures par seconde.



Performance

Étendue de mesure : intervalle des valeurs mesurables.

Résolution : plus petite variation détectable.

Répétabilité : proximité des mesures répétées.

Sensibilité : réaction du capteur à une variation.

Temps de réponse : délai de réaction du système.

Bruit : fluctuations parasites du signal.

Incertitude : doute associé au résultat.

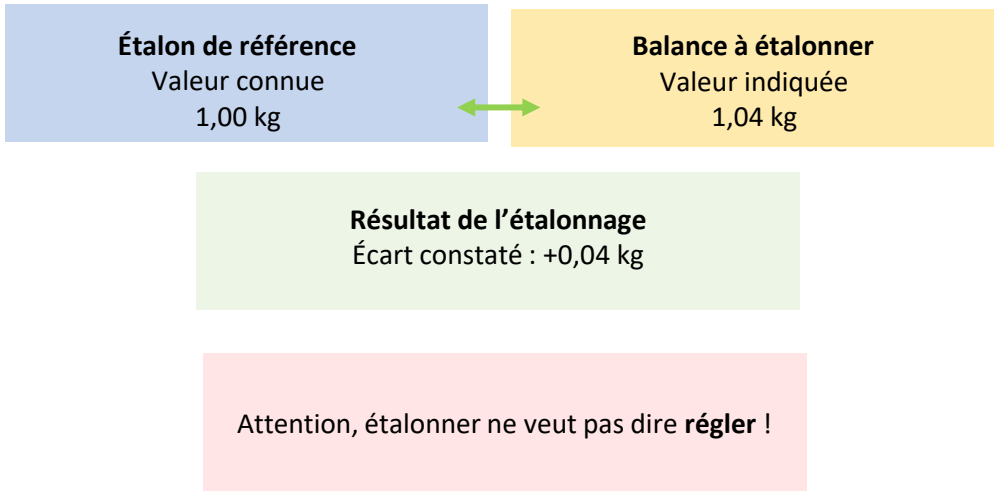
Biais : décalage systématique par rapport à la référence.

Étalonnage : comparaison avec une référence connue.

Saturation : dépassement de la capacité de mesure.

Dérive : décalage progressif dans le temps.

Fréq. d'échantillonnage : nombre de mesures par seconde.



Performance

Étendue de mesure : intervalle des valeurs mesurables.

Résolution : plus petite variation détectable.

Répétabilité : proximité des mesures répétées.

Sensibilité : réaction du capteur à une variation.

Temps de réponse : délai de réaction du système.

Bruit : fluctuations parasites du signal.

Incertitude : doute associé au résultat.

Biais : décalage systématique par rapport à la référence.

Étalonnage : comparaison avec une référence connue.

Saturation : dépassement de la capacité de mesure.

Dérive : décalage progressif dans le temps.

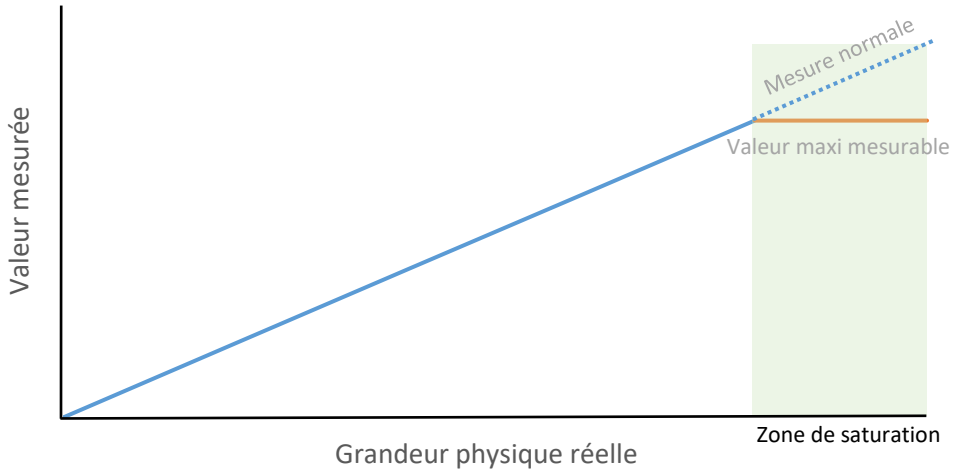
Fréq. d'échantillonnage : nombre de mesures par seconde.

Étalon de référence
Valeur connue
1,00 kg

Balance à étalonner
Valeur indiquée
1,04 kg

Résultat de l'étalonnage
Écart constaté : +0,04 kg

Attention, étalonner ne veut pas dire **régler** !



Performance

Étendue de mesure : intervalle des valeurs mesurables.

Résolution : plus petite variation détectable.

Répétabilité : proximité des mesures répétées.

Sensibilité : réaction du capteur à une variation.

Temps de réponse : délai de réaction du système.

Bruit : fluctuations parasites du signal.

Incertitude : doute associé au résultat.

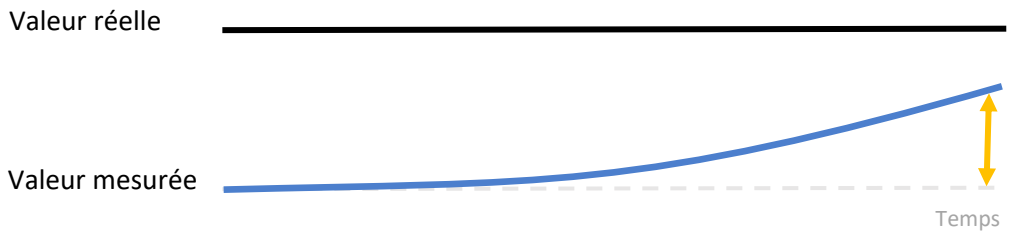
Biais : décalage systématique par rapport à la référence.

Étalonnage : comparaison avec une référence connue.

Saturation : dépassement de la capacité de mesure.

Dérive : décalage progressif dans le temps.

Fréq. d'échantillonnage : nombre de mesures par seconde.



Performance

Étendue de mesure : intervalle des valeurs mesurables.

Résolution : plus petite variation détectable.

Répétabilité : proximité des mesures répétées.

Sensibilité : réaction du capteur à une variation.

Temps de réponse : délai de réaction du système.

Bruit : fluctuations parasites du signal.

Incertitude : doute associé au résultat.

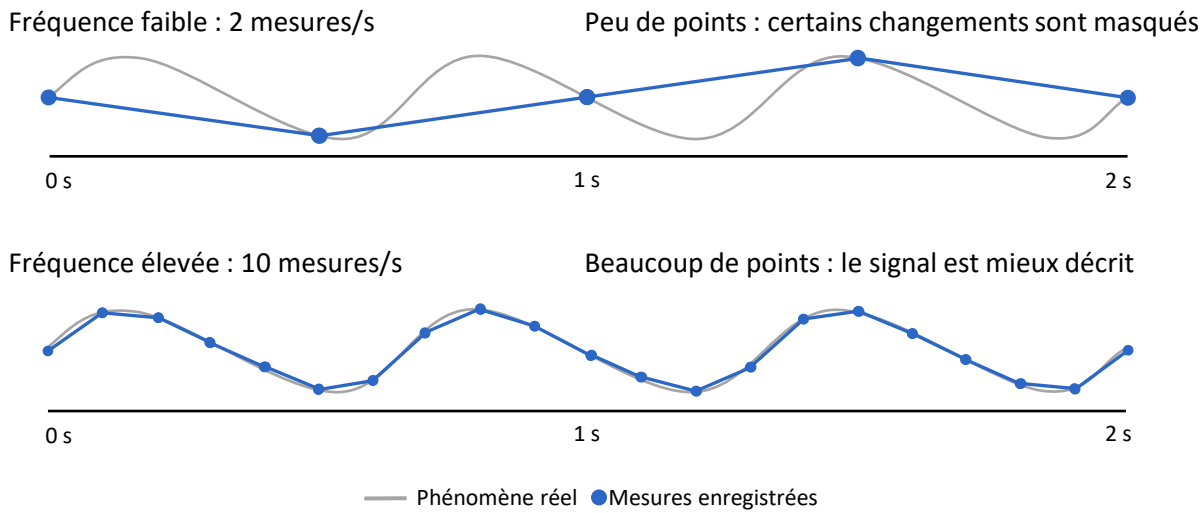
Biais : décalage systématique par rapport à la référence.

Étalonnage : comparaison avec une référence connue.

Saturation : dépassement de la capacité de mesure.

Dérive : décalage progressif dans le temps.

Fréq. d'échantillonnage : nombre de mesures par seconde.



Acquisition - alimentation - transmission

Grandeur physique
Ce que l'on veut suivre
Déplacement, force, température, vibration…

Acquisition - alimentation - transmission

Grandeur physique
Ce que l'on veut suivre
Déplacement, force, température, vibration…

Capteur
Transforme la grandeur en un signal exploitable
ex : mm en Volts

Acquisition - alimentation - transmission

Grandeur physique
Ce que l'on veut suivre
Déplacement, force, température, vibration…

Capteur
Transforme la grandeur en un signal exploitable
ex : mm en Volts

Acquisition
Prépare le signal, le convertit en données numériques et ajoute la date et l'heure.

Acquisition - alimentation - transmission

Grandeur physique
Ce que l'on veut suivre
Déplacement, force, température, vibration…

Capteur
Transforme la grandeur en un signal exploitable
ex : mm en Volts

Acquisition
Prépare le signal, le convertit en données numériques et ajoute la date et l'heure.

Stockage locale
Enregistre les mesures sur place

Acquisition - alimentation - transmission

Grandeur physique
Ce que l'on veut suivre
Déplacement, force, température, vibration…

Capteur
Transforme la grandeur en un signal exploitable
ex : mm en Volts

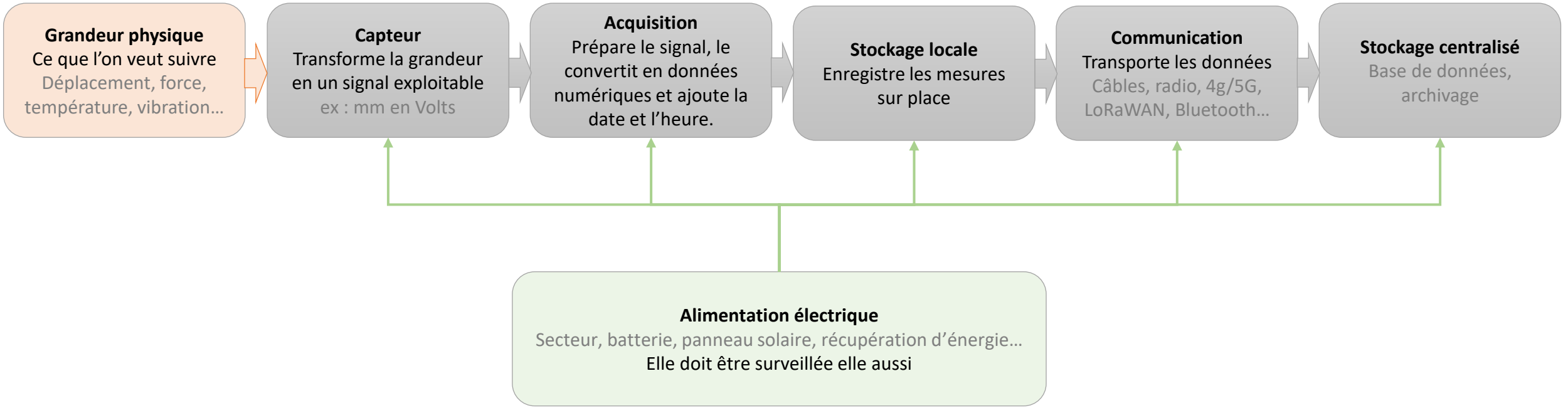
Acquisition
Prépare le signal, le convertit en données numériques et ajoute la date et l'heure.

Stockage locale
Enregistre les mesures sur place

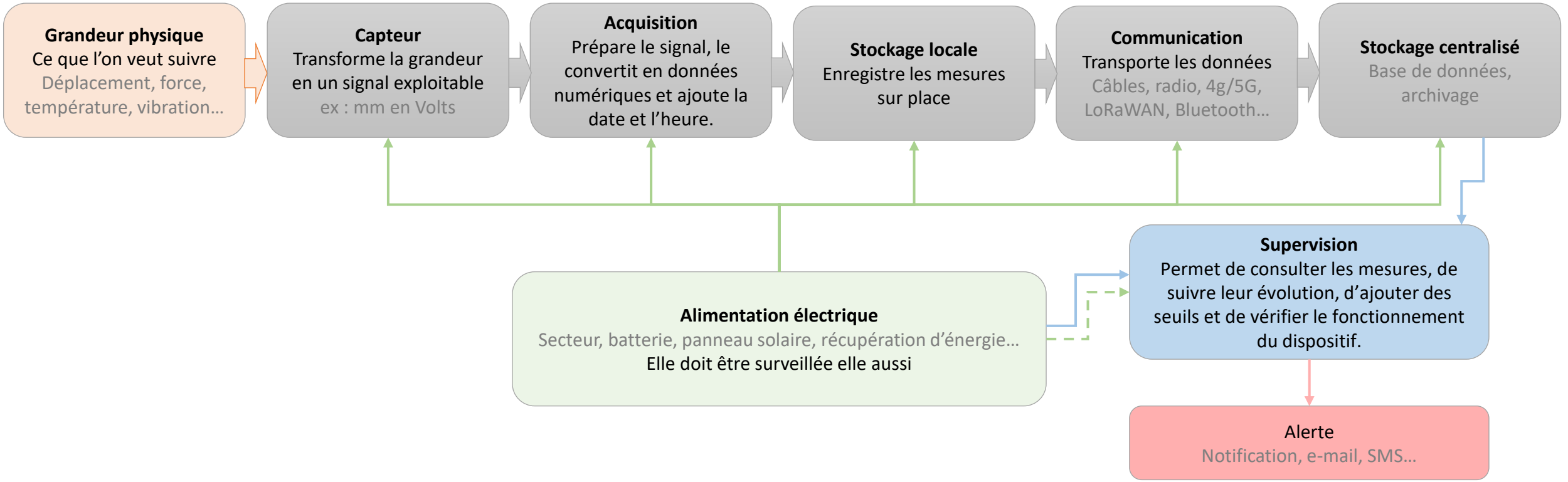
Communication
Transporte les données
Câbles, radio, 4g/5G, LoRaWAN, Bluetooth…

Stockage centralisé
Base de données, archivage

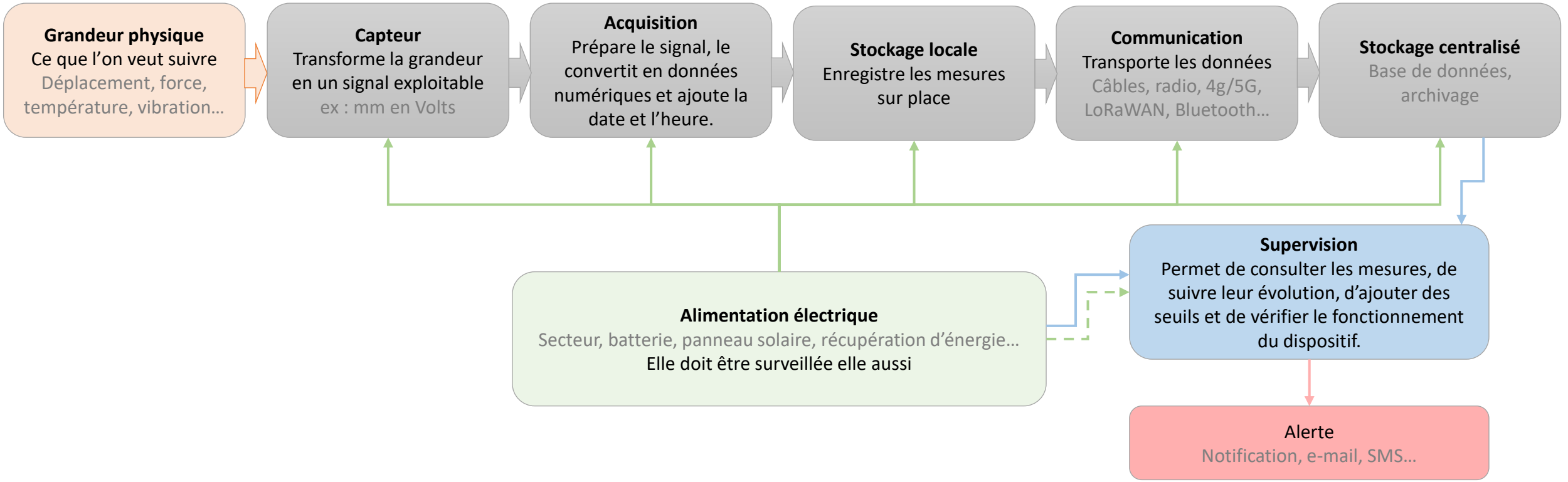
Acquisition - alimentation - transmission



Acquisition - alimentation - transmission



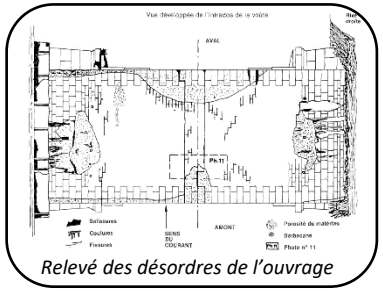
Acquisition - alimentation - transmission



Chaque maillon compte : une défaillance peut fausser une mesure, perdre des données ou empêcher une alerte.

Mesures ponctuelles ou surveillance continue

Inspection détaillée


Relevé des désordres de l'ouvrage

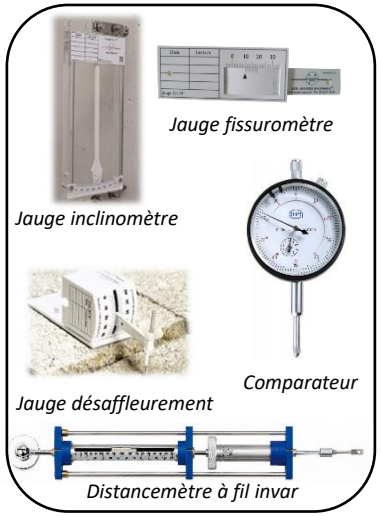

Petit matériel de l'inspecteur

Campagnes de mesures

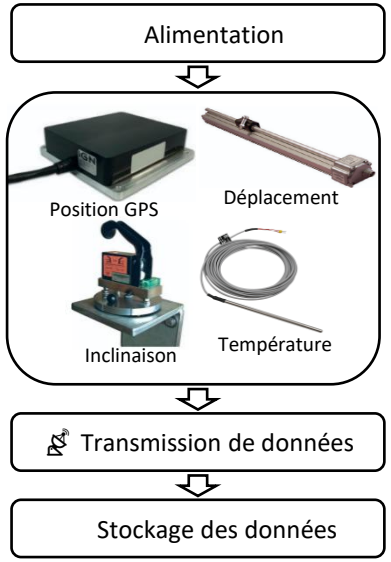

Petit matériel de l'inspecteur


Tachéomètre / Scan3D
Matériel spécifique

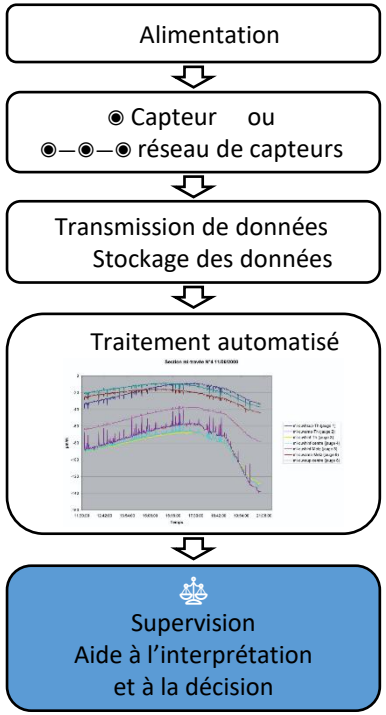
Instrumentation légère mesures périodiques



Instrumentation avec mesures en continu



Structural Health Monitoring SHM



Des moyens croissants permettent de caractériser plus finement le comportement de l'ouvrage.
Mais au prix de contraintes croissantes de coût, d'exploitation et de gestion des données.

→ **Le dispositif de surveillance doit donc être adapté aux objectifs et aux moyens disponibles.**

Le terrain change les performances

Un capteur performant sur le papier ne garantit pas une mesure fiable !

Sources d'incertitude et de dérive de la mesure :

- Température ;
- Humidité / eau ;
- Corrosion ;
- Vibration / chocs ;
- Environnement électromagnétique ;
- Environnement mécanique ;
- Et les dégradation par des tiers…

Prise en compte des effets environnementaux :

- Mesure des paramètres (température, humidité…) pour effectuer une compensation ;
- Adaptation de l'ensemble de la chaine au site ;
- Choix du capteur adapté ;
- Protection anticorrosion ;
- Blindage
- Réflexion sur les fixations ;
- Réflexion sur la maintenance préventive et curative

La bonne prise en compte des facteurs extérieurs est au moins aussi importante que la qualité du capteur que l'on peut choisir.

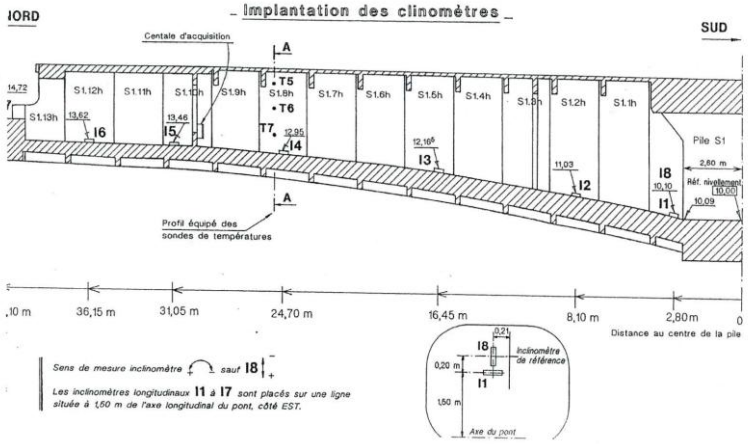
Fluage du fléau Sud du pont de Cheviré



1994 : Constatation de déformations anormales (fortes flèches) aux 4 articulations de l'ouvrage, dues à un fluage excessif du béton.

1994 : Mise en place d'un suivi topométrique.

2001 : Mise en place de 8 clinomètres sur le fléau Sud, ainsi que de 11 capteurs de température.



2015 : Mise en place d'un suivi de l'ouverture des joints de chaussée (semestriel puis annuel).



2016 : Mise en place d'un suivi des déplacements au niveau des appareils d'appui (semestriel puis annuel).





2022 : Suivi automatisé des joints de chaussée de la travée centrale par capteur laser.

2025 : Mise en place d'un suivi altimétrique par Differential Global Positionning system (DGPS).

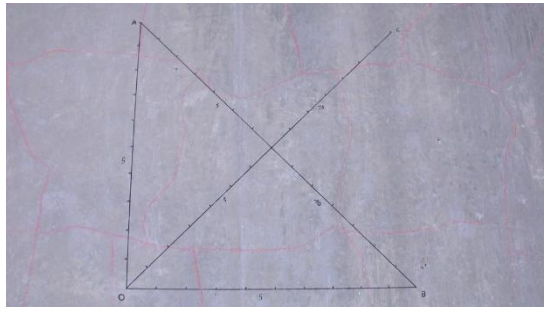


Socles des piles du pont de Cheviré

1998 : Constatation de la présence de réseaux de fissuration de type maillage sur les socles des piles.

Le diagnostic réalisé dans la foulée a conclu à la présence d'une réaction de gonflement de béton (RGI) de type Réaction sulfatique interne (RSI).

2003 : Mise en place d'un suivi de la fissuration par indice de fissuration (interruption entre 2006 et 2014).



2015 : Mise en place d'un suivi au distancemètre à fil invar.



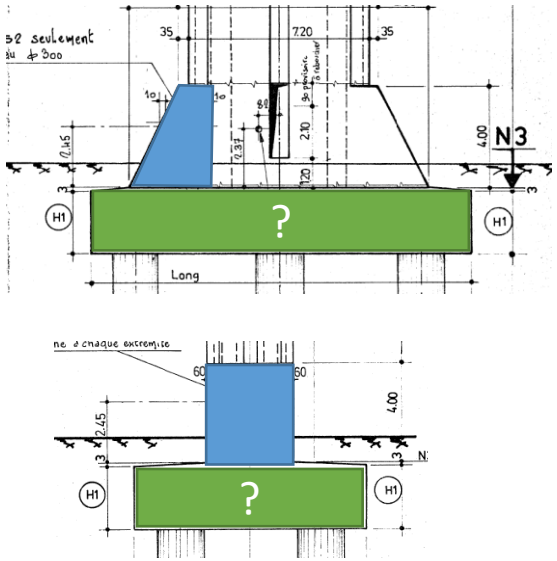
2018 : Mise en place d'un suivi au Scan 3D pour qualifier les bombements du béton.





Semelles des piles du pont de Cheviré
extension de la surveillance

Questionnement : La réaction de gonflement interne concerne les socles des piles, mais pourquoi ne concernerait-elle pas semelles ?

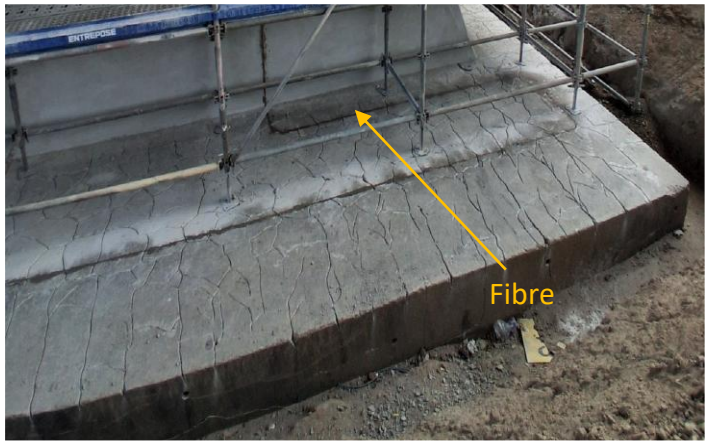


Volume socles ≈ 50 m³
Volume semelles ≈ 275 à 450 m³

2018 : Réalisation d'un fouille de la semelle de la pile S3 → présence de fissuration plus importante que sur les socles.



2023 : Mise en place d'un suivi de la fissuration des l'ensemble des socles et de quatre semelles par fibre optique, en lien avec des sondes hygrométriques implantées dans les socles de 3 piles.



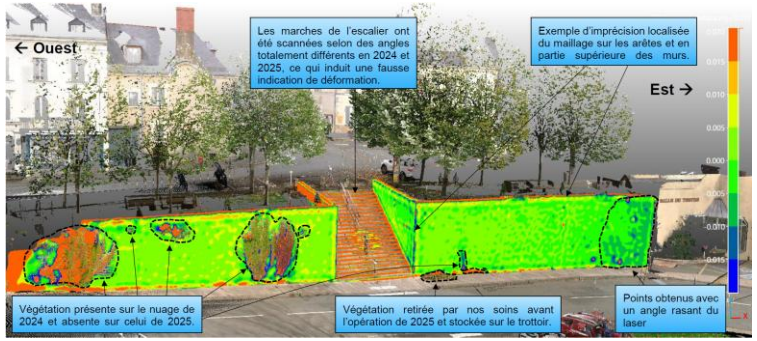
Mur du Tertre à Brissac-Quincé

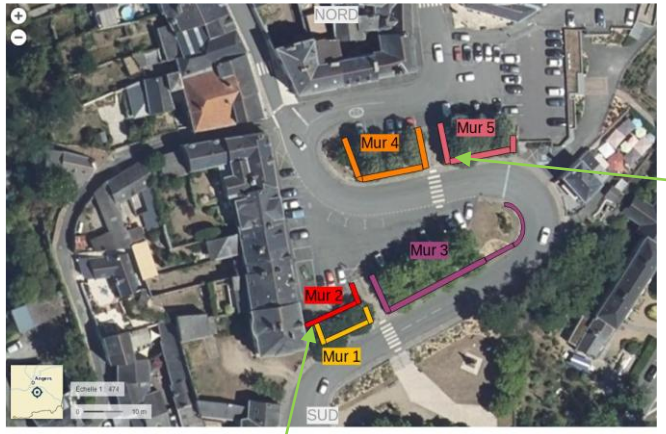
2023 : Inspection détaillée des murs qui pointe la présence de fissures/fractures accompagnée de bombements dans la maçonnerie.

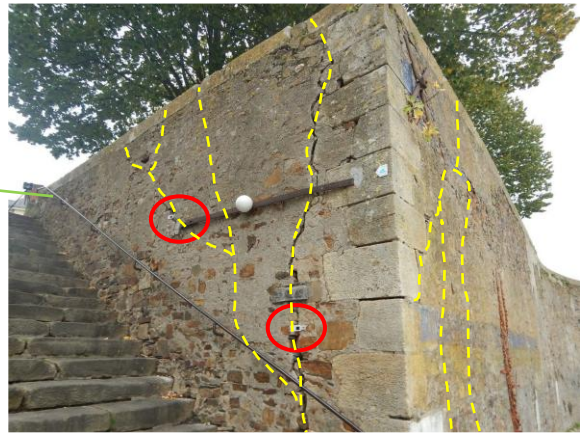
Question : ces désordres sont-ils évolutifs ?

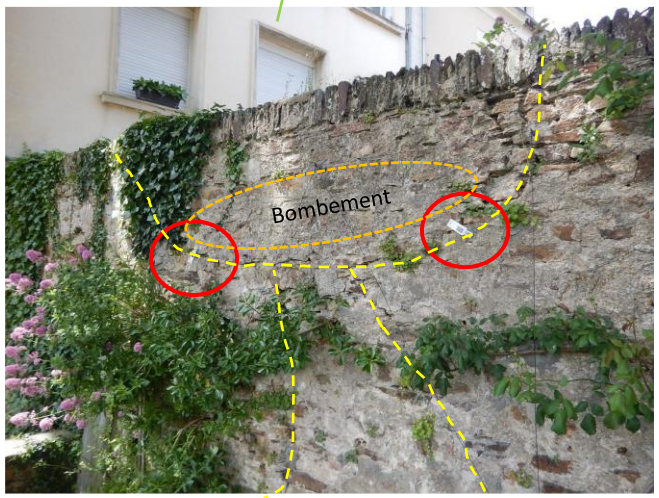
2023 : Mise en place d'un suivi de l'ouverture des fissure à l'aide de jauges fissuromètres.

2024 : Mise en place d'un suivi par scan3D pour détecter des mouvements d'ensemble.











Projets - poutre de Clerval

Objectifs :
Emission acoustique - Caractériser le son d'un décollement de patch composite et celui d'une rupture de fil de précontrainte

Surveillance acoustique - Développement de méthode pour passer d'un système de localisation de rupture 1D (utilisé sur câble) en 2D voir 3D

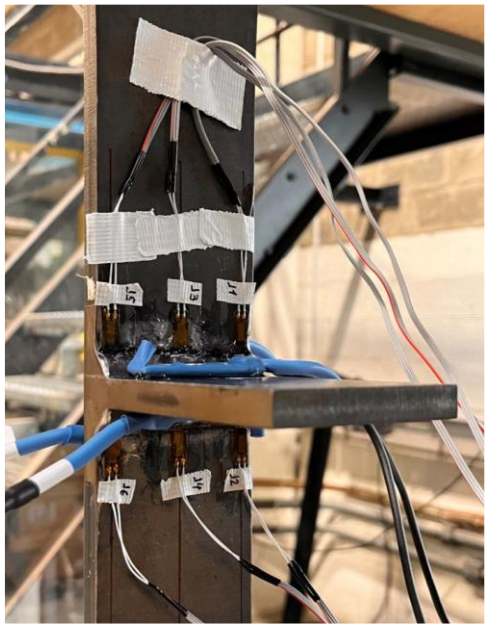




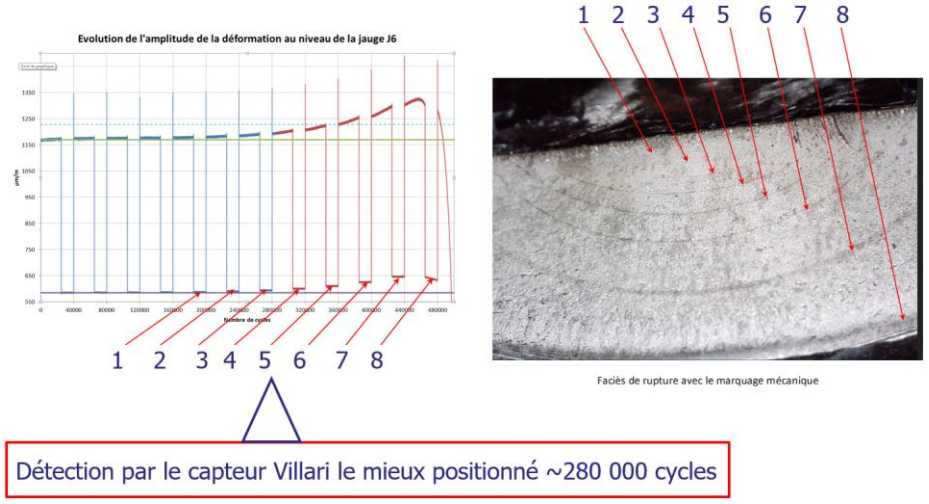
Projets - essais capteurs Villari

Caractérisation des performances d'un capteur proposé par la société Villari basée aux Pays-Bas pour la surveillance des fissures dans les assemblages métalliques,
Comparaison avec des capteurs classiques (jauges résistives),
Transfert vers les acteurs opérationnels via communications en conférence sur les avantages / inconvénients.



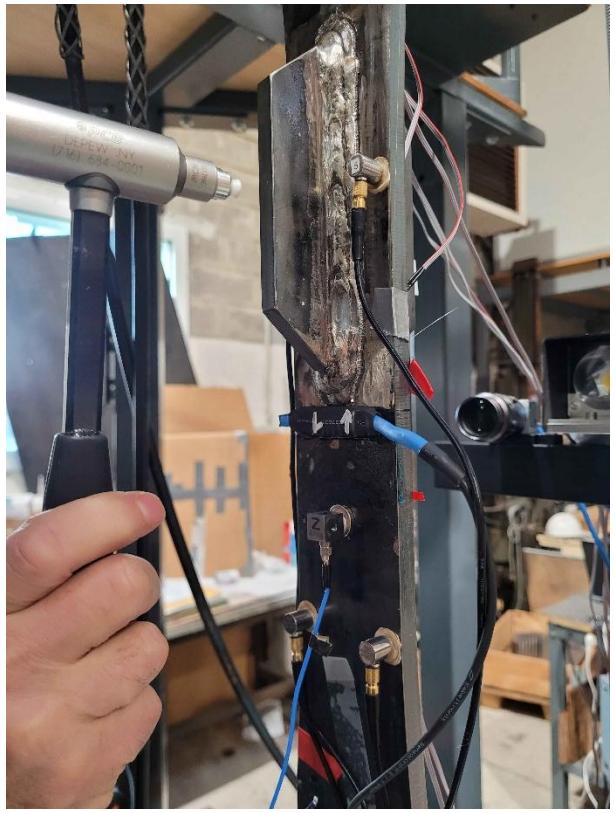




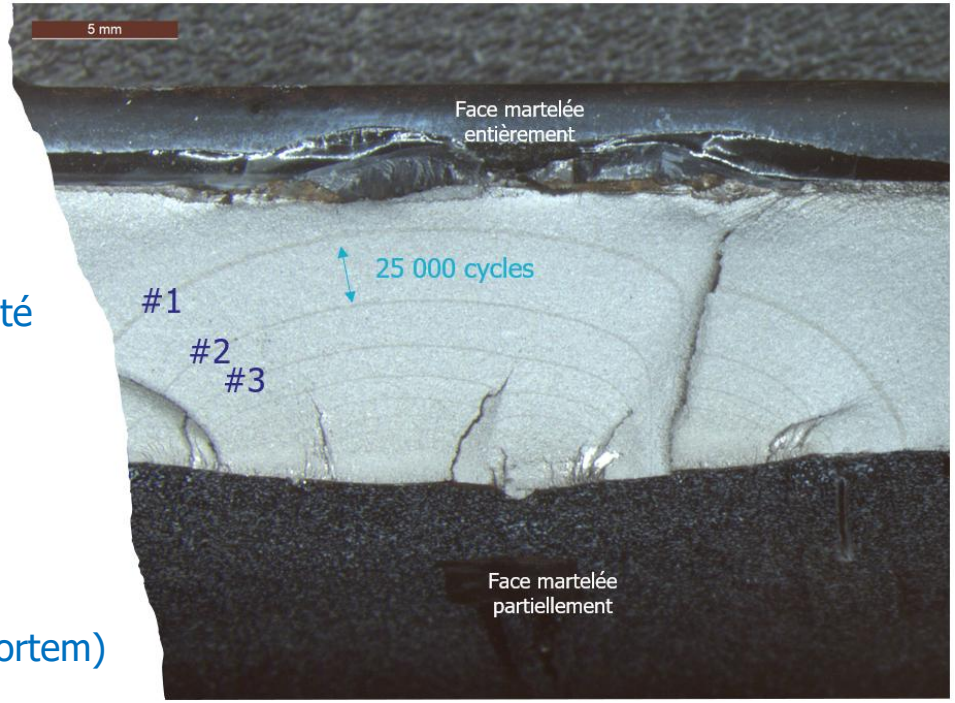


Détection par le capteur Villari le mieux positionné ~280 000 cycles

Projets - Suivi multi-capteurs de la fissuration en fatigue d'assemblages soudés



1/ Jauges résistives
2/ Fibre optique à réseau de Braggs
3/ Emission Acoustique
4/ Fibre optique continue
5/ Accéléromètre + choc au marteau instrumenté
6/ Capteur Villari©
7/ Stéréo-corrélation d'images numérique
8/ Température
9/ Ultrasons
10/ Marquage mécanique (observations post mortem)



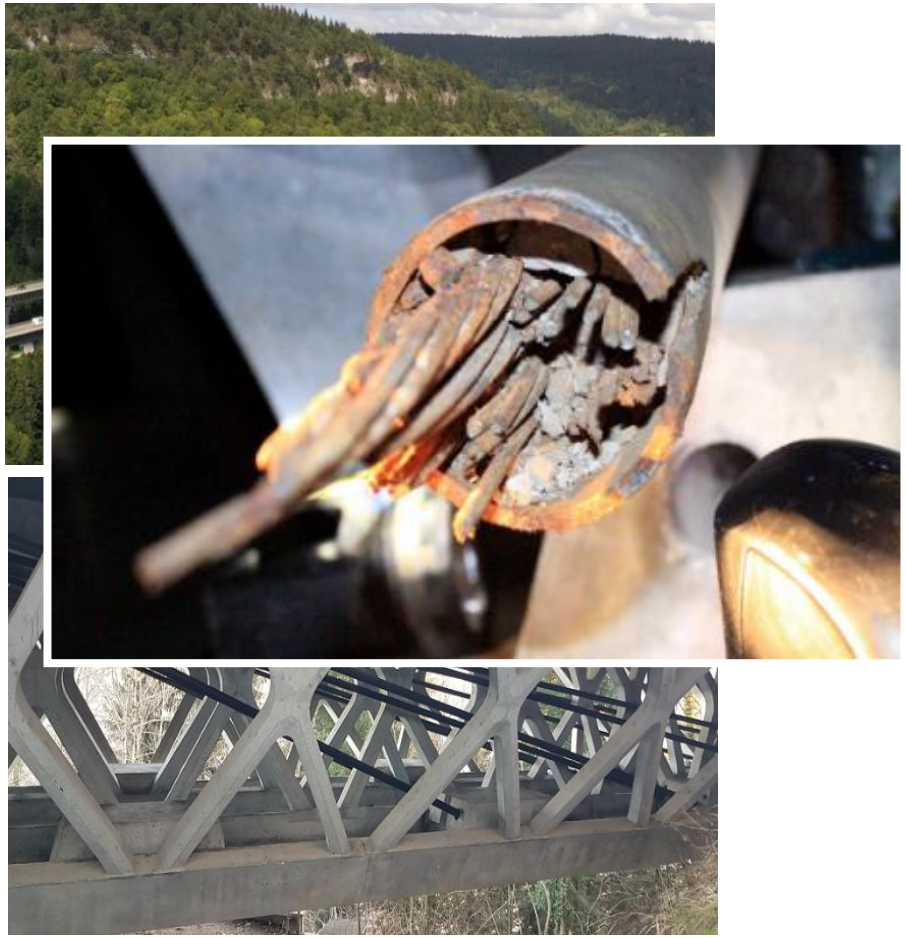
Recherche et expérimentation : tenter une approche par IA et fusion de données pour détecter plus rapidement l'apparition de la fissuration
Transfert vers les acteurs opérationnels via communications en conférence

Projets - Ponts Connectés - IcareOA



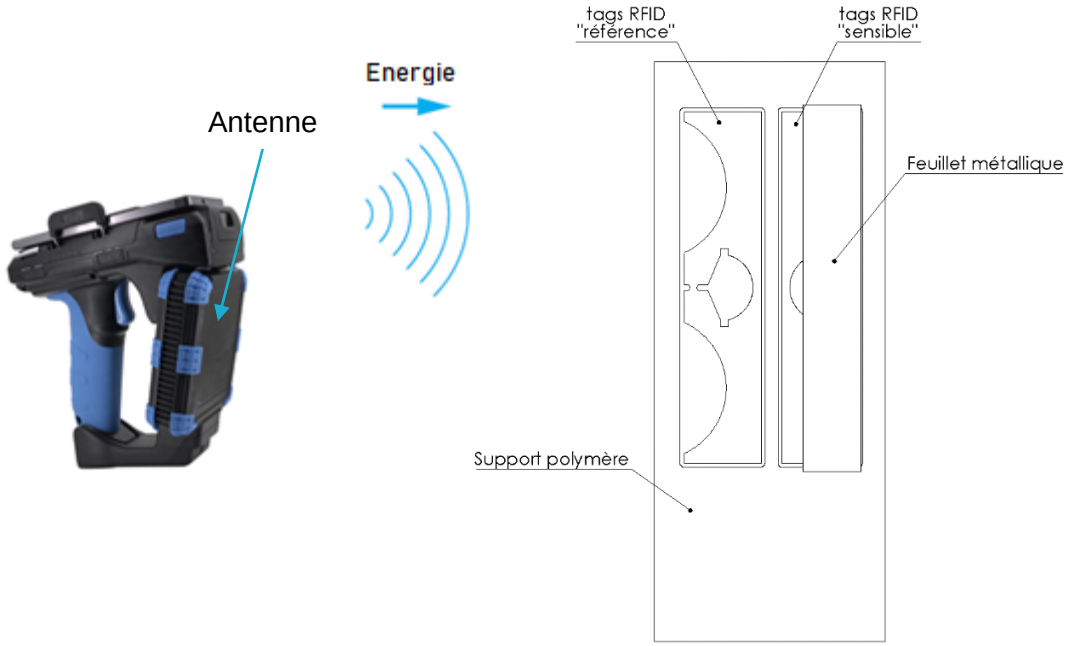


Projets - Ponts Connectés - IcareOA



Projets - Ponts Connectés - IcareOA

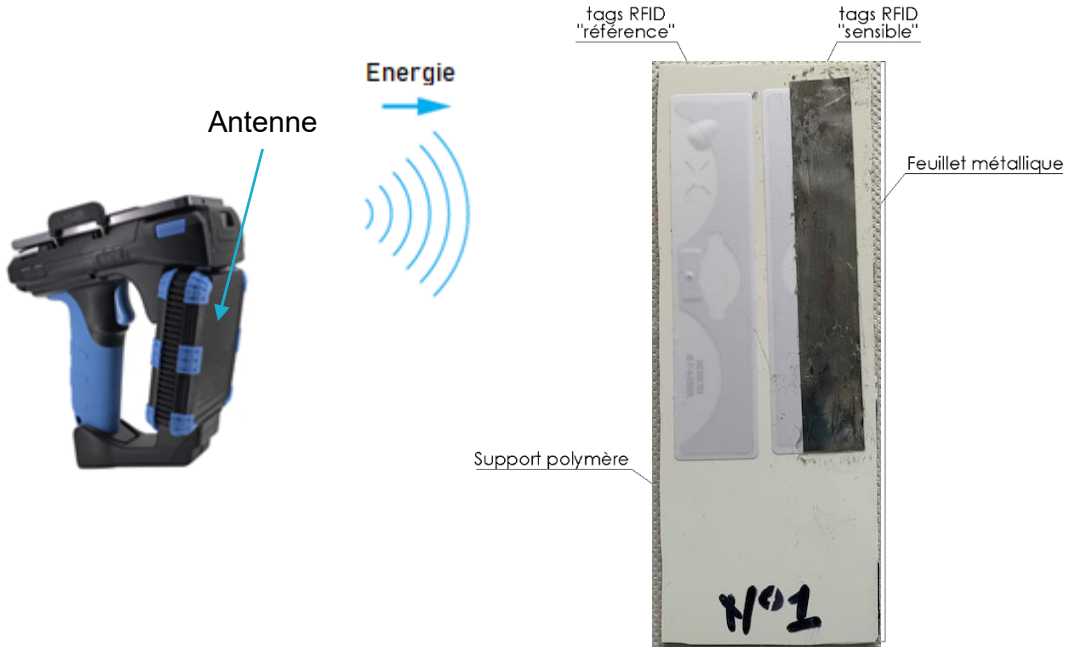




Recherche de solution de détection de corrosion en zone confinée

Projets - Ponts Connectés - IcareOA

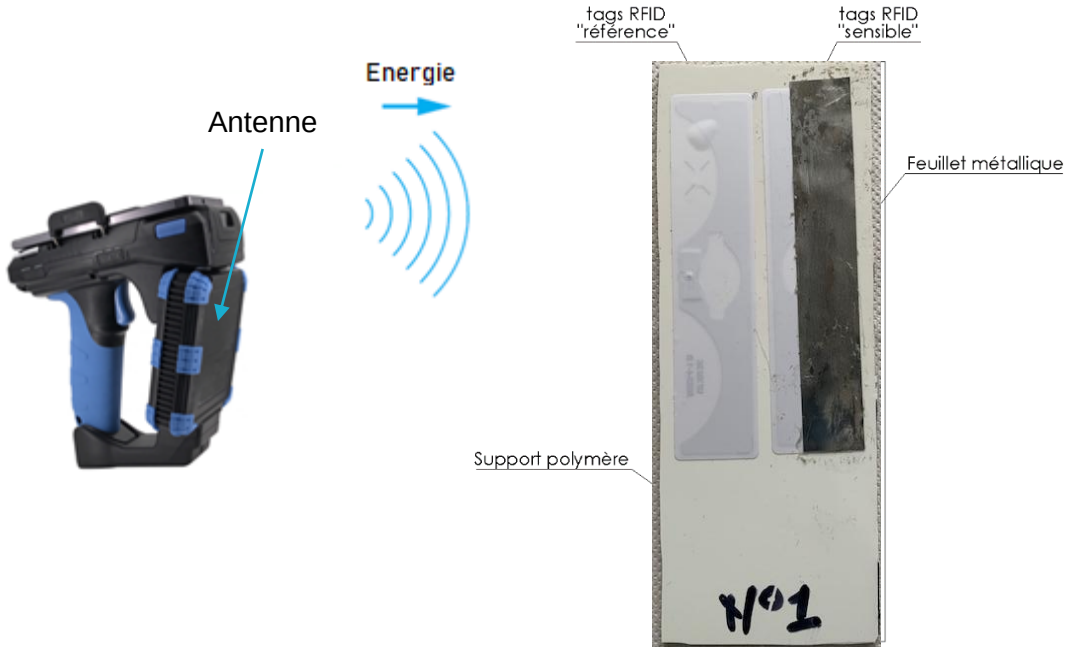




Recherche de solution de détection de corrosion en zone confinée
Développement de méthodes à partir d'une technologie émergente

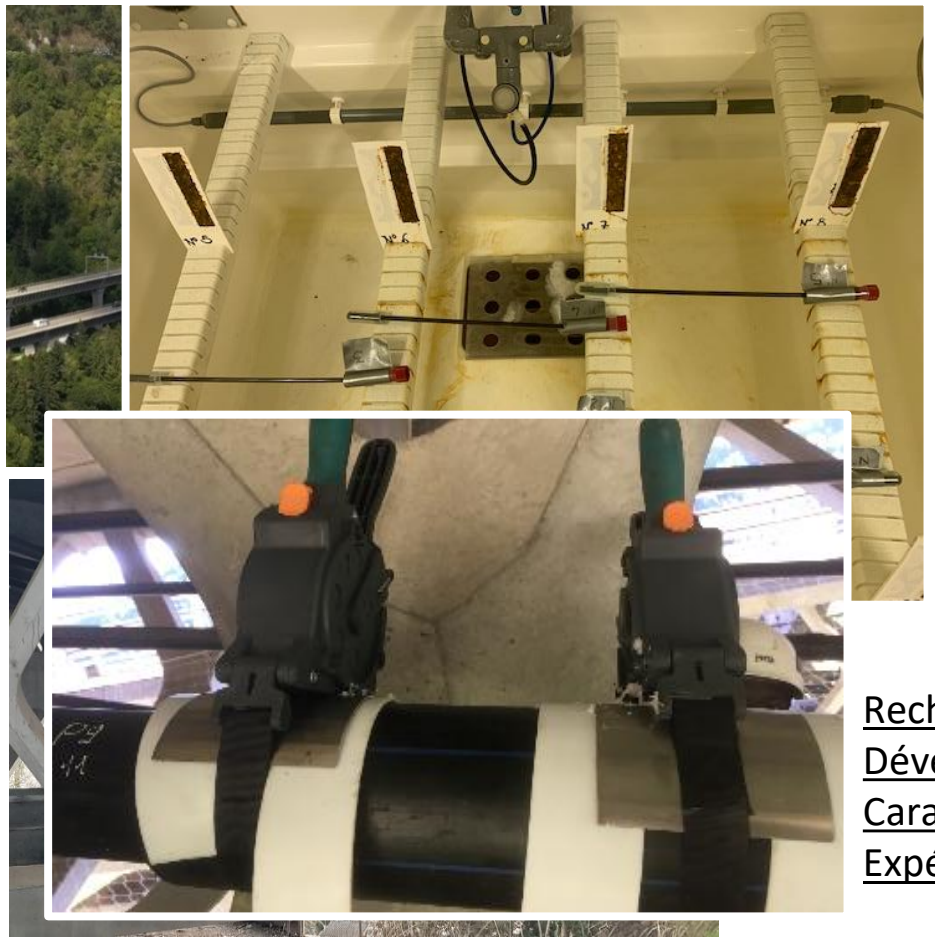
Projets - Ponts Connectés - IcareOA



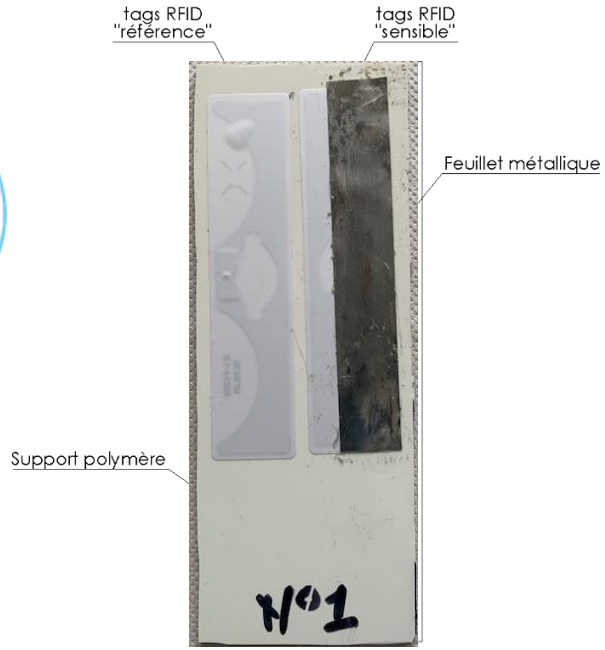


Recherche de solution de détection de corrosion en zone confinée
Développement de méthodes à partir d'une technologie émergente
Caractérisation des performances en laboratoire dans des conditions représentatives

Projets - Ponts Connectés - IcareOA

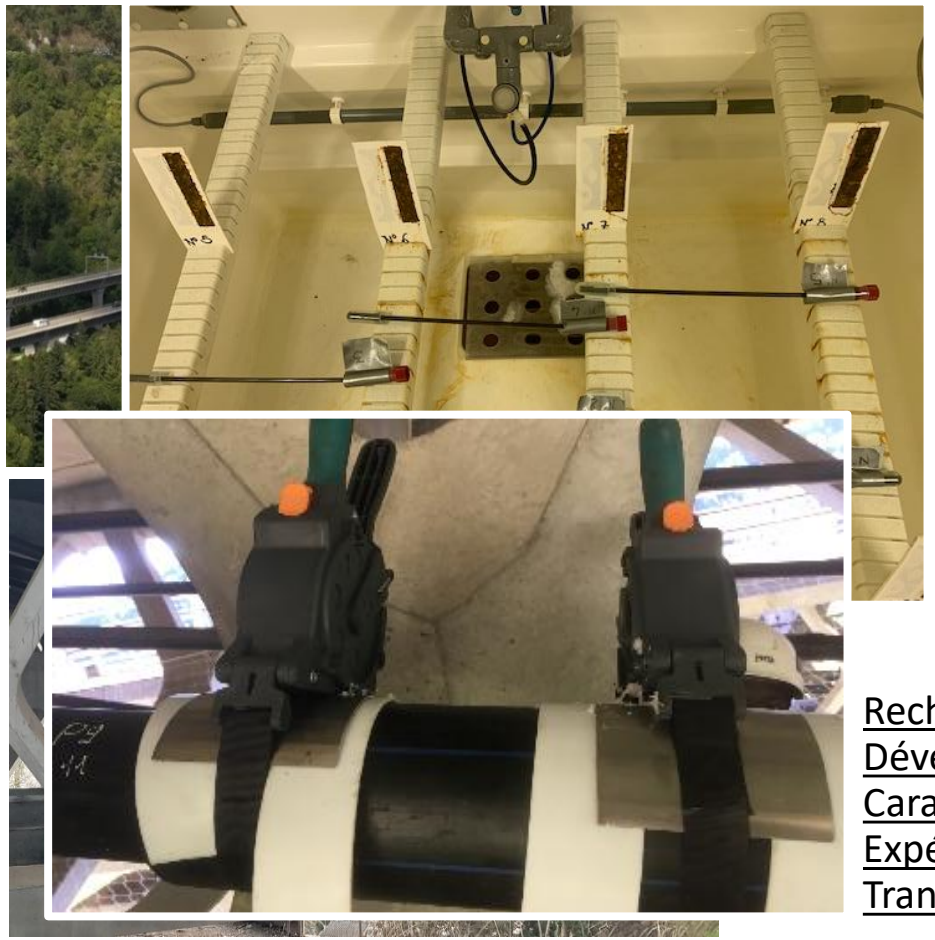




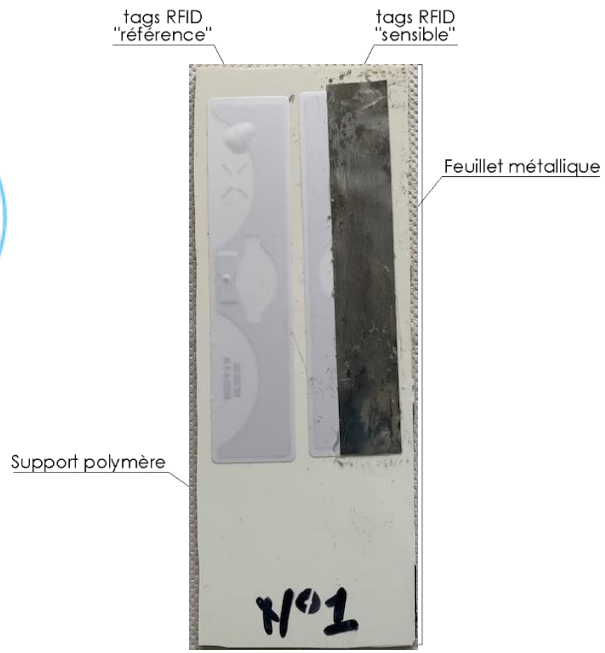


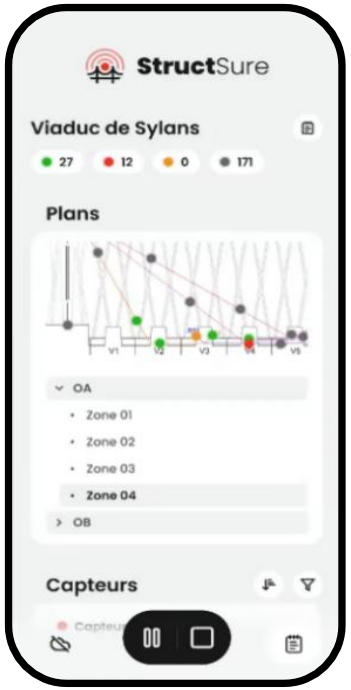
Recherche de solution de détection de corrosion en zone confinée
Développement de méthodes à partir d'une technologie émergente
Caractérisation des performances en laboratoire dans des conditions représentatives
Expérimentation sur site avec l'intégration d'une dizaine de capteurs;

Projets - Ponts Connectés - IcareOA









Recherche de solution de détection de corrosion en zone confinée
Développement de méthodes à partir d'une technologie émergente
Caractérisation des performances en laboratoire dans des conditions représentatives
Expérimentation sur site avec l'intégration d'une dizaine de capteurs;
Transfert vers les acteurs opérationnels grâce au développement d'une application Android

Le rôle du Cerema et de l'Université Gustave Eiffel

- **Cerema :**
  - Accompagnement des gestionnaires ;
  - Expertise et diagnostic ;
  - Définition de stratégies proportionnées ;
  - Retour d'expérience ;
  - Guides et référentiels.

- **Université Gustave Eiffel :**
  - Recherche ;
  - Développement de méthodes ;
  - Expérimentation ;
  - Caractérisation des performances ;
  - Transfert vers les acteurs opérationnels ;
  - Guide et référentiels.

Une expertise sans intérêt commercial direct dans le choix d'une technologie.

Le rôle du Cerema et de l'Université Gustave Eiffel

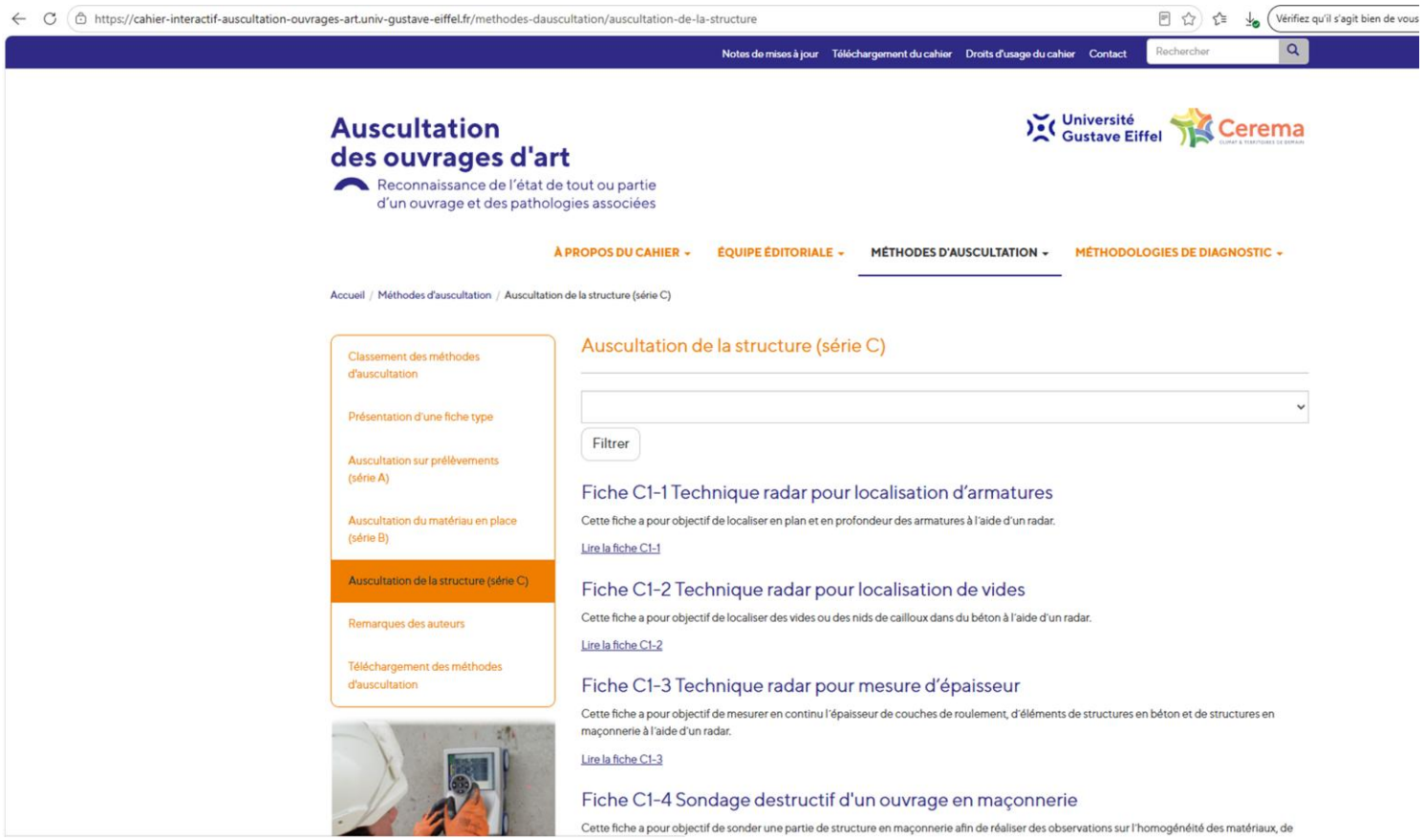
- **Cerema :**
  - Accompagnement des gestionnaires ;
  - Expertise et diagnostic ;
  - Définition de stratégies proportionnées ;
  - Retour d'expérience ;
  - Guides et référentiels.
- **Université Gustave Eiffel :**
  - Recherche ;
  - Développement de méthodes ;
  - Expérimentation ;
  - Caractérisation des performances ;
  - Transfert vers les acteurs opérationnels.

Une expertise sans intérêt commercial direct dans le choix d'une technologie.

- **Les cahiers interactifs Cerema-UGE**
  - Accès gratuit ;
  - Neutres technologiquement ;
  - Régulièrement enrichis ;
  - 2 entrées : méthodes d'auscultation et méthodologies de diagnostic.

https://cahier-interactif-auscultation-ouvrages-art.univ-gustave-eiffel.fr/

https://cahier-interactif-auscultation-ouvrages-art.univ-gustave-eiffel.fr/





MÉTHODES D'AUSCULTATION DE LA STRUCTURE
MESURES LOCALES DE FONCTIONNEMENT

Université Gustave Eiffel — Cerema

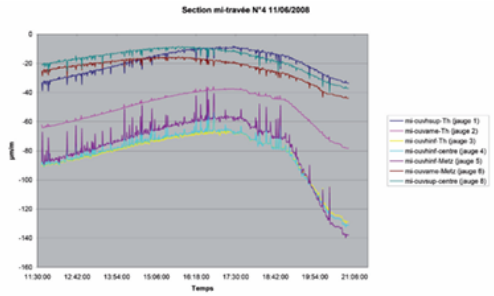
C3-5

MESURE DE DÉFORMATION PAR JAUGES

PRINCIPE ET DESCRIPTION SOMMAIRE	
OBJECTIF	Les extensomètres à fils résistants ou jauges de déformation (*strain gauge*) ont pour objectif de mesurer la déformation d'un élément d'ouvrage en la traduisant en variation de résistance électrique. La déformation étant définie comme le rapport de la variation de sa longueur divisée par sa longueur initiale.
PRINCIPE	Les jauges sont constituées par un fil plié en accordéon et sont généralement fabriquées à partir d'une mince feuille métallique (quelques µm d'épaisseur) et d'un isolant, que l'on traite comme un circuit imprimé (par lithographie ou par attaque à l'acide). La jauge de déformation (souvent improprement appelée jauge de contrainte) repose sur le principe de l'allongement ou du raccourcissement d'un fil résistif solidaire du support qui se déforme. Lorsque le champ de déformation est relativement uniforme et uniaxial, la jauge est placée suivant l'orientation principale de ce champ. Lorsque le champ de déformation est surfacique (sans orientation préférentielle), il est nécessaire de placer au moins trois jauges (rosettes) pour mesurer les composantes principales des déformations, ainsi que leur orientation. En agissant par traction ou compression sur le fil, celui-ci s'allonge ou se rétrécit. Cette variation de longueur modifie sa résistance électrique. On mesure alors cette variation de résistance entre l'état de repos et l'état sous contrainte. Le fil est agencé en spires de manière à ce que la déformation agisse en même temps sur plusieurs tronçons du fil pour amplifier la variation de résistance électrique. La résistance d'un conducteur de section S et de longueur l est égale à : $R = \frac{\rho l}{S}$ Une variation de longueur provoque une variation de résistance selon la formule essentielle de l'extensométrie : $\frac{\Delta R}{R} = k\,\varepsilon$ K est le facteur de jauge dont la valeur est voisine de 2. Jauge — Rosette — Pont de Wheatstone — Jauge pour béton Les jauges sont souvent collées et parfois soudées (sur métal). Il est nécessaire de connaître le module d'élasticité du matériau en déformation uniaxiale, et le coefficient de Poisson en déformation surfacique. Cette détermination est aisée pour le métal car le module est bien défini (200 000 à 210 000 MPa). Cela est beaucoup plus difficile pour le béton car le module varie entre 25 000 (béton bas de gamme) et 50 000 MPa (béton THP). Il est possible de répartir des jauges sur la hauteur d'une section pour évaluer sa courbure (Diagramme de Navier). Il existe une jauge dite « Pain de sucre » pour les inclusions dans le béton. Il existe des chaînettes de jauges pour mesurer les déformations dans des zones de concentration de contraintes. Le même principe des jauges peut être adapté pour détecter l'apparition d'une fissure et suivre sa propagation. L'adaptation consiste à utiliser la rupture progressive de fils lors de la propagation d'une fissure. Jauge de détection de fissure

Cahier interactif sur l'auscultation des ouvrages d'art — Page 1 — Octobre 2015

CARACTÈRE DESTRUCTIF DE LA MÉTHODE	Non
MATURITÉ	Méthode éprouvée depuis plusieurs décennies.
MATÉRIEL SPÉCIFIQUE EMPLOYÉ	Sur béton comportant des granulats de dimension maximale 20 à 25 mm, il est recommandé d'utiliser des jauges de longueur minimale 10 cm. Sur métal, on peut utiliser des jauges de longueur comprise entre quelques millimètres et un centimètre (2 mm pour le collage sur des fils de précontrainte). 
MODALITÉS D'APPLICATIONS	
DOMAINE D'APPLICATION	Le collage de jauges se fait d'une manière générale sur tout matériau relativement homogène (acier, béton, bois, composites, aluminium, etc.) avec des jauges adaptées au type de matériau. Dans le cas des ouvrages en béton, possibilité de collage sur les armatures passives et actives du béton. La détermination de contraintes est possible à condition de connaître le module de déformation du matériau et dans certains cas son coefficient de Poisson. Exemples d'application : – Comportement sous chargement / vérification en fatigue (structures métalliques et précontraintes) / suivi de structures ; – Détermination du diagramme des déformations ; – Détermination du module de déformation d'une éprouvette de béton ou de métal sous presse ; – Vérification du fonctionnement de sections critiques (sous charges contrôlées ou sous trafic) ; – Détection de fissures sur métal et sur béton, dans le cas des fissures de béton précontraint en association avec un capteur de déplacement (notion de couple Jauge/capteur) ; – Libération de contrainte sur métal et sur béton.

SUJÉTIONS PRATIQUES D'INTERVENTION	Une grande minutie est nécessaire à la préparation au collage. Le collage sur une structure en métal est plus simple. L'implantation de jauges sur les structures en béton est compliquée : préparation de la surface, (il ne faut pas de microfissure existante), rebouchage des pores, ponçage, etc. Le soudage doit être réalisé par du personnel spécialisé. Il existe plusieurs montages : ¼ pont, ½ pont, pont complet et il existe des câblages à 2 fils, 3 fils ou 4 fils, etc. Pour minimiser l'influence de la température, on peut utiliser une jauge de compensation thermique. Sur une structure en béton armé, il est nécessaire de coller les jauges sur armatures tendues exactement au droit des fissures pour pouvoir interpréter les mesures.
LIMITES D'UTILISATION	Gamme de déformations comprise entre 2 et 20%. La durée de vie en fatigue est comprise entre 10^5 à 10^8 cycles (difficulté de faire du suivi à long terme sur béton pour cause de dégradation du collage par l'humidité interne du béton). Sensible à la longueur des fils de liaison entre la jauge et le conditionneur suivant le type de montage, et à tout problème d'isolation électrique.
PRÉCISION ET/OU SENSIBILITÉ	De l'ordre du µm/m Dépend du type de jauges Très sensible à la température
PERSONNEL ET COMPÉTENCES	Un chargé d'investigation L'équipe d'intervention est constituée de personnel ayant reçu une formation sur l'instrumentation des ouvrages d'art et sur les techniques de collage des jauges.
CARACTÉRISTIQUES OPÉRATOIRES	
ACCÈS À 1 OU 2 FACES	Dépend du type d'ouvrage
COUPURES OU RESTRICTIONS DE CIRCULATION NÉCESSAIRES	Non
RENDEMENT ET/OU ÉCHANTILLONNAGE	Dépend de nombreux paramètres (état du support, type de jauge, durée du collage, nombre de jauges, etc.)
DÉLAIS DE DISPONIBILITÉ DES RÉSULTATS	Immédiat sur l'écran de l'ordinateur portable relié à la centrale d'acquisition, ou sur la lecture manuelle du pont de Wheastone.  Exemple d'une instrumentation avec jauges de déformation pour un suivi de mise en tension de câbles de précontrainte
PERTURBATIONS DU TRAFIC SUR LES MESURES	Les vibrations liées au trafic peuvent engendrer des difficultés pour le collage des jauges.

PERTURBATIONS DE L'ENVIRONNEMENT SUR LES MESURES	Lorsque la température extérieure est très faible, il est nécessaire de réchauffer la structure sur laquelle la jauge doit être collée ou d'isoler thermiquement la zone instrumentée.
RISQUES POUR LES UTILISATEURS OU LE PUBLIC	Précautions à prendre pour le collage des jauges lors de la manipulation de produits dangereux (solvants, colle, Fer à souder, etc.)
ENCOMBREMENT – POIDS	Dépend essentiellement du câblage et de la centrale. (Possibilité d'utiliser des modules de multiplexage simplifiant le câblage).
AVANTAGES – INCONVÉNIENTS	
AVANTAGES	Visualisation en temps réel avec un ordinateur portable Enregistrement de températures sur une période donnée avec une fréquence d'acquisition déterminée
INCONVÉNIENTS	Ces capteurs sont longs à mettre en œuvre (préparation et nettoyage de la surface instrumentée, collage de la jauge, soudage, protection de la jauge, etc.) Les jauges sur le béton permettent des mesures de déformation assez grandes dans les zones comprimées mais elles ont une capacité de déformation limitée dans les zones de béton tendu (maxi 100 à 200 µm/m) en raison des fissures qui s'y développent. La fiabilité des indications à long terme est faible (fluage et vieillissement du joint de colle, baisse de l'isolation électrique, etc.) La correction des effets dus aux variations de température est indispensable. La centrale d'acquisition nécessite d'être protégée pour des enregistrements de longue durée. Les jauges ne sont pas récupérables.
DISPONIBILITÉ – COÛT	
DISPONIBILITÉ	Courante
COÛT	Élevé (amortissement de la centrale et coût de la main d'oeuvre)
RÉFÉRENCES	
NORMES – MODES OPÉRATOIRES – ARTICLES	Chatelain J. (1969), L'extensométrie par jauges à fil résistant – Supplément au Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, 39, août, 111 pages. Avril J., Brule J.C. (1984) – Encyclopédie d'analyse des contraintes – Malakoff, Vishay Micromesures.

Université Gustave Eiffel

Tous les gestionnaires n'ont pas les mêmes besoins

- **Une collectivité peut avoir :**
  - Quelques ouvrages seulement ;
  - Pas de service OA ;
  - Peu de moyens humains ;
  - Un budget limité ;
  - Aucun spécialiste de l'instrumentation.

- **Avant d'installer un système, demander :**
  - Qui regarde les données ?
  - Qui vérifie qu'un capteur fonctionne encore ?
  - Qui analyse une évolution inhabituelle ?
  - Que fait-on lorsque le seuil est dépassé ?
  - Qui assure la maintenance ?
  - Quel coût sur toute la durée du suivi ?

Une instrumentation simple et exploitable vaut mieux qu'un système sophistiqué qui ne sera jamais utilisé.

Messages clés

1. **Un capteur mesure une grandeur physique, pas l'état de santé d'un ouvrage ;**
2. **La performance utile est celle de toute la chaîne de mesure en conditions réelles ;**
3. **Produire des données ne suffit pas : elles doivent être contrôlées, contextualisées et interprétées ;**
4. **Il n'existe pas de technologie universelle ;**
5. **Une instrumentation simple mais bien pensée peut être extrêmement utile**

La bonne instrumentation n'est pas celle qui produit le plus de données mais celle qui produit l'information nécessaire à la décision.

MERCI DE VOTRE ATTENTION

Des questions ?



Willy BOUCHET – Willy.Bouchet@cerema.fr
Yannick FALAISE – yannick.falaise@univ-eiffel.fr
Emilie LEPRETRE – emilie.lepretre@univ-eiffel.fr

Journée technique – Instrumentation des Ouvrages d'Art
7 octobre 2026 – INSA Rennes, Amphi GCU
Organisateurs : CTT – Cerema, en partenariat avec : IMGC et AFGC