

Projet d'instrumentation de la fondation d'une éolienne (Valorem) à Saint Hilaire de Chaléons

Louis-Marie Cottineau et Xavier Chapeleau
IFSTTAR – COSYS/SII

Yann Lecieux
Université de Nantes – Laboratoire GeM

27 juillet 2015

Contexte

- **Relation entre le Gis Lirgec et la société Valorem**

-> **En septembre 2012 : Proposition de recherche du LiRGeC – MAG2C (Mesures Essais Auscultation pour le Génie Civil et la Construction) Démonstrateur parc éolien La Chapelle / Erdre**

-> **En 2014 : relance du projet de démonstrateur parc éolien La Chapelle / Erdre par Valorem**

-> **En janvier 2015: nouvelle discussion avec VALOREM-VALEMO pour l'instrumentation d'une éolienne**

-> **En avril 2015: Matthieu Blandin (Valorem) demande au Lirgec d'adresser une demande officielle à VALOREM pour instrumenter une fondation d'une éolienne à Saint Hilaire de Chaléons (construction à l'automne 2015)**

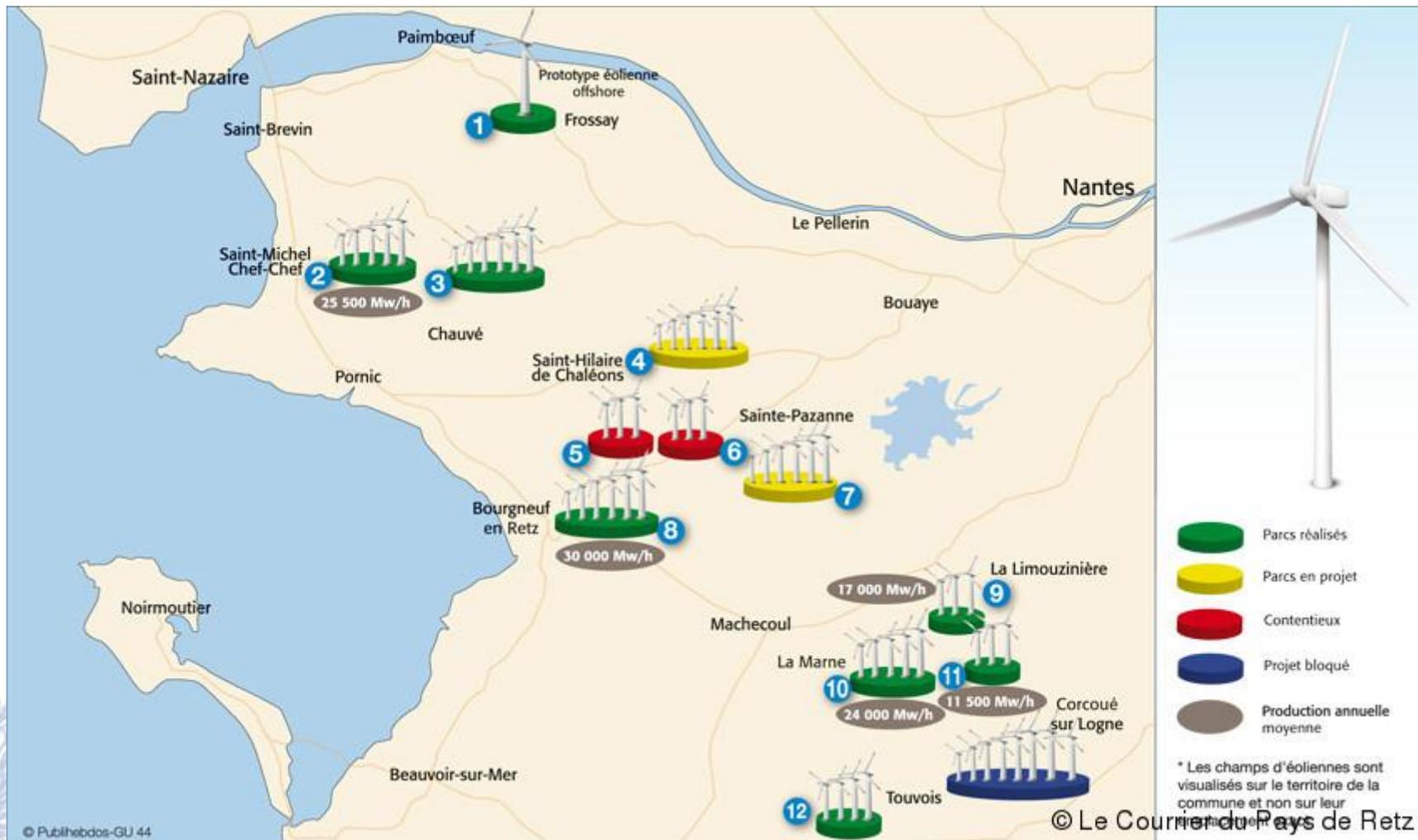
Rencontre à Thetis

+ visioconférences animées par Jean-Vivien Heck



Le projet du parc éolien à St Hilaire de Chaléons

- 6 éoliennes de 2 MW



-> Site de Hilaire de Chaléons: proche des organismes de recherche nantais

Le projet du parc éolien à St Hilaire de Chaléons

▪ Planning

-> **Fin aout:** terrassement de la 1^{ère} éolienne

-> **Mi-septembre :** terrassement de la 6^{ème} (et dernière) éolienne du parc et coulage du béton de propreté

-> **Du 18 au 24 septembre:** Ferrailage de l'assiette :
Intervention possible pour instrumenter l'assiette : 25 septembre

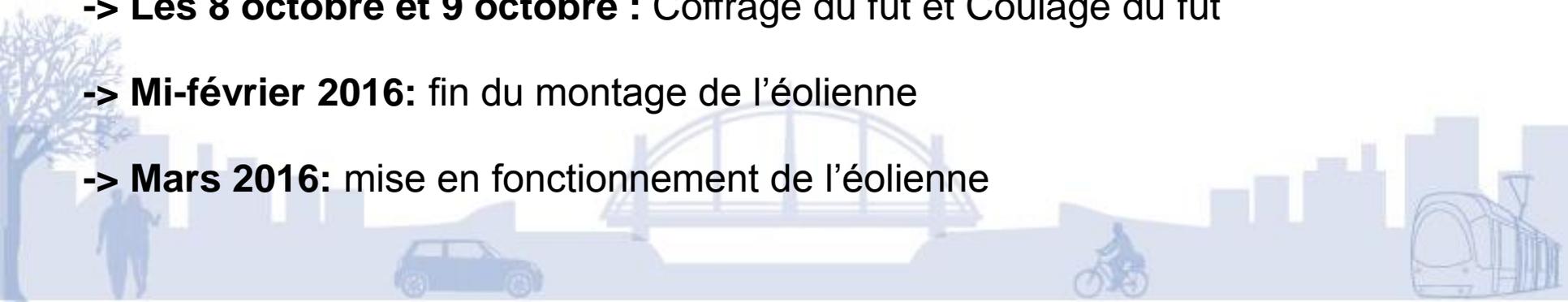
-> **Le 28 septembre:** Coulage de l'assiette

-> **Du 29 septembre au 1 octobre:** Ferrailage du fut
Intervention possible pour instrumenter le fut et raccordement avec l'assiette : du 2 au 7 octobre

-> **Les 8 octobre et 9 octobre :** Coffrage du fut et Coulage du fut

-> **Mi-février 2016:** fin du montage de l'éolienne

-> **Mars 2016:** mise en fonctionnement de l'éolienne



Impératifs:

A obtenir :

-> Validation de l'implantation de l'instrumentation par le bureau de contrôle de Valorem

-> Autorisation du turbinier



Problématiques identifiées par Valorem

Prolongation de la période d'exploitation d'un parc éolien:

Garantir des conditions de sécurité et de performances suffisantes des éoliennes

A – Monitoring des déformations et soulèvement de la fondation

- Besoin: mesures des variations des déformations radiales et tangentielles lors du fonctionnement de l'éolienne pour affiner la modélisation
- Besoin: détection, localisation et quantification (déplacement) du soulèvement lors de l'arrêt d'urgence

B – Détection et suivi du décollement de la virole

- Besoin: détection, localisation et quantification (ouverture) du décollement entre la virole et le béton



C – Monitoring des vibrations

- Besoin: - identification des fréquences propres
- détection et localisation d'anomalies (soulèvement, décollement, ...)



LirGec – Action MAG2C

- > Disposer d'instrumentations sur ouvrages réels
- > Mettre en place une base de données de mesures partagée
- > Mettre à disposition de Valorem les résultats de mesures

IFSTTAR

Laboratoires SII/I4S

-> Instrumentation et monitoring de structures

Multi-physique: méthodes vibratoires, thermiques, optiques (capteur à fibre optique) et imagerie
Systèmes de mesure temps réel, accès distants, réseaux de capteurs et informatique embarquée, sans fil, ...

Université de Nantes

Laboratoire GeM (équipe optique)

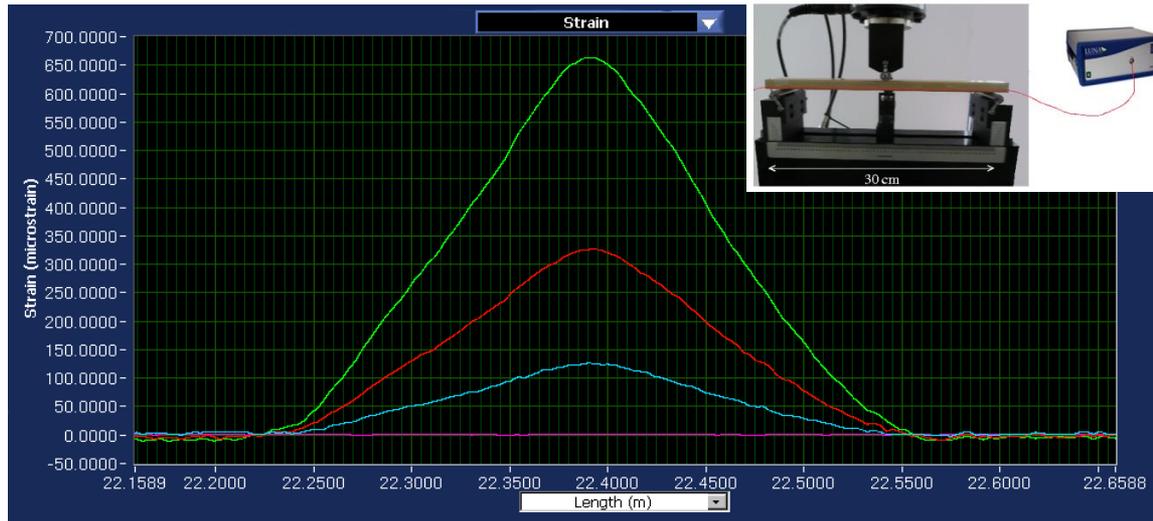
-> Capteur à fibre optique

Mécanique et optique

- **Expérimenter en condition réel les outils et méthodes,**
- **Qualifier les appareils en condition réelle sur le long terme,**
- **Appliquer et valider différents algorithmes de traitements des données, et différents outils de surveillance et de détection automatique**
- **Disposer d'un « benchmark » accessible**



1. Evaluation d'une technique de mesure répartie par fibre optique (technologie Rayleigh) pour la détection précoce et la localisation des fissures dans la fondation



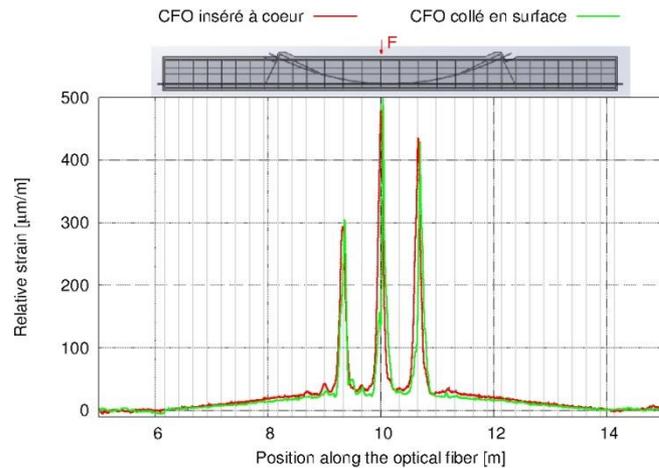
Exemple de mesure répartie: profils de déformation en flexion 3 points obtenues pour 3 forces de chargement

Caractéristiques (technologie Rayleigh):

- résolution spatiale : 1cm
- longueur maximale de fibre optique qu'il est possible de mesurer : 70m
- gamme de mesure de déformation : $\pm 5000 \mu\text{m/m}$
- temps de mesure : quelques secondes

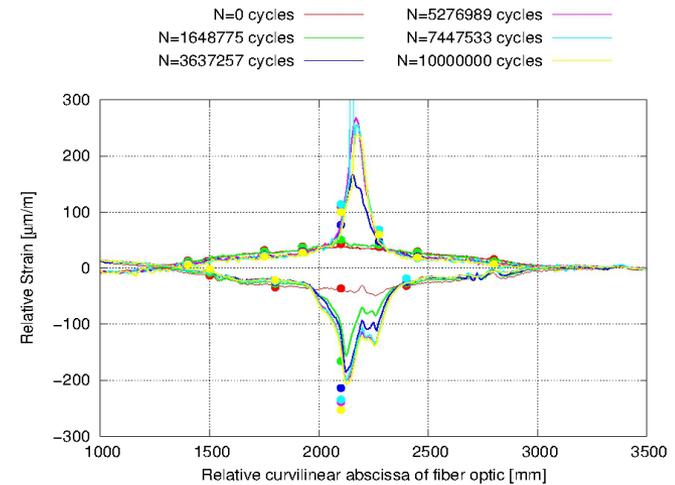
Détection précoce et la localisation de fissures: essais en labo et sur site

Ouvrage: poutre précontrainte



VIPP sur la Varèze (A7)

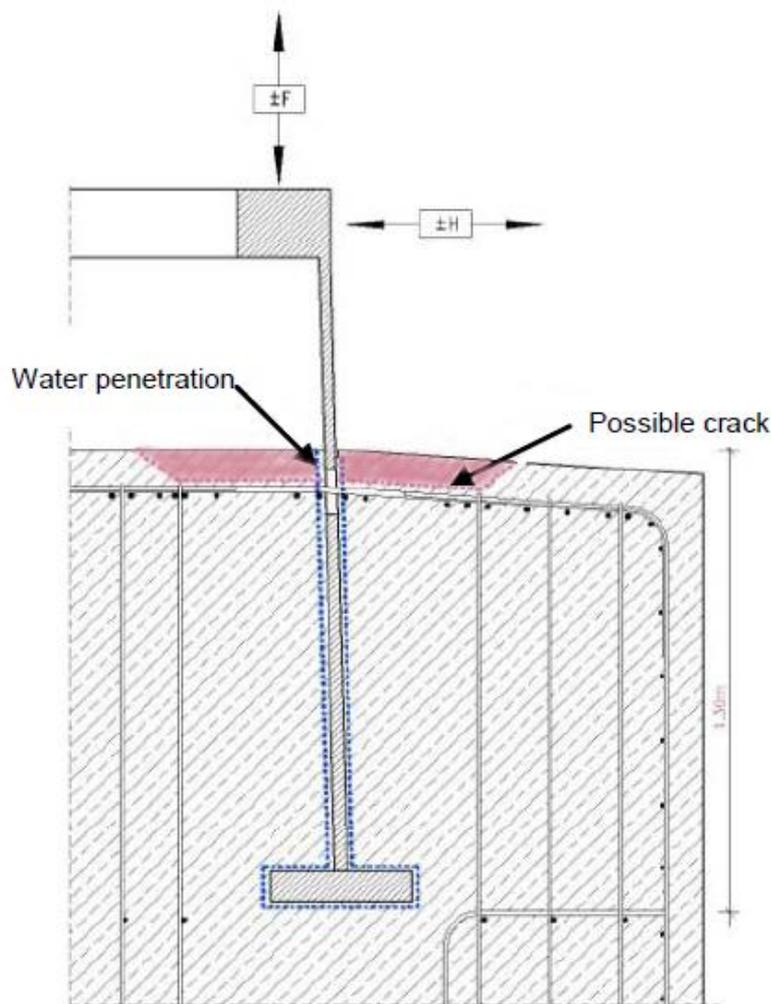
Infrastructure: voie ferroviaire sans ballast (sur dalles béton)



Voie NBT (1km) entre Gisors et Serqueux

Projet de recherche de l'IFSTTAR

Détection précoce du décollement de la virole par les fibres optiques « continues » (mesure répartie Rayleigh)



Enjeux:

- Expérimenter les fibres optiques continues pour la détection du décollement
- > Mise en œuvre en environnement réel
- > Définir une méthodologie de mesures
- Valider cet outil de détection et de surveillance

Détection du décollement de la virole

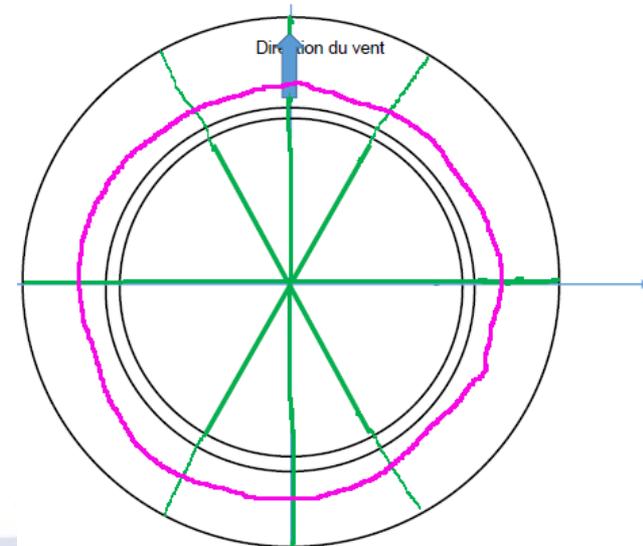
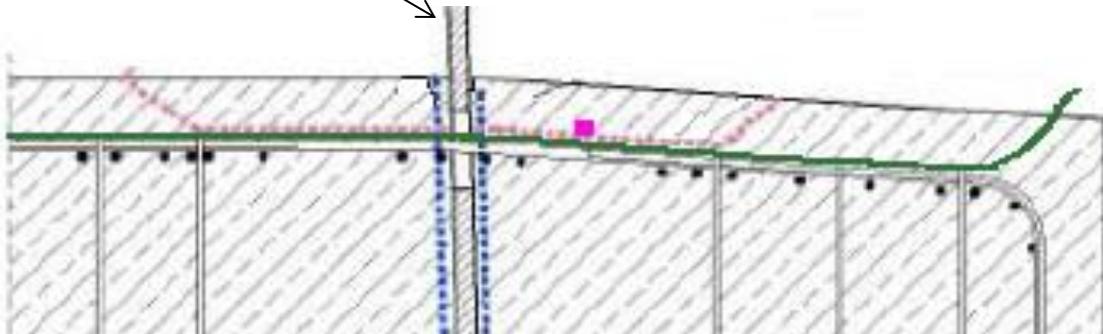
Positionnement des fibres optiques « continues »:

- 3 fibres optiques orientées dans la direction principale du vent
- 1 fibre optique dans la direction transverse à la direction principale du vent (fibre optique témoin)

-> Fixation sur les armatures de renforcement « radiales » qui passent au travers de la virole



Virole



- 2. Couplage des méthodes vibratoires avec des techniques de mesures déformations dans la fondation et le sol pour la détection d'anomalies (décollement virole, soulèvement ...) lors d'évènements anormaux (coup de vent, arrêt d'urgence de l'éolienne ...)**

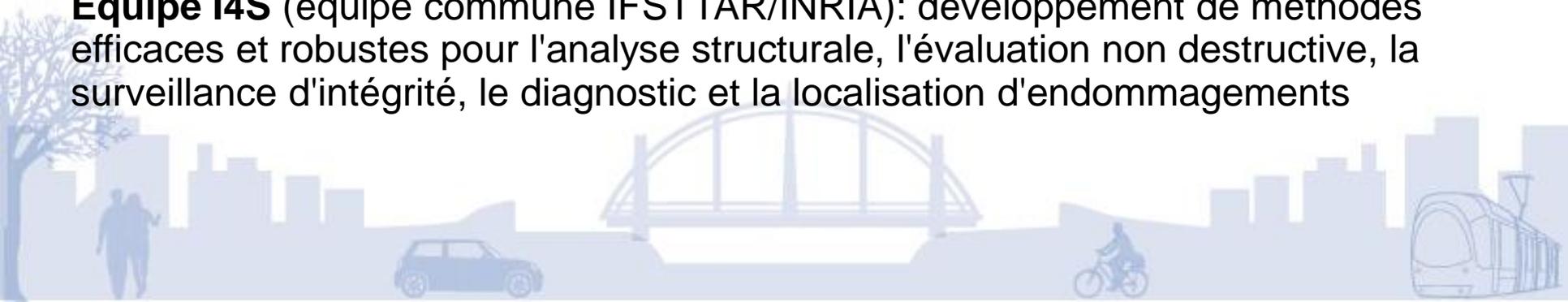
Méthode vibratoire: information globale sur la structure

+

Méthode optique de mesure de déformation: information locale

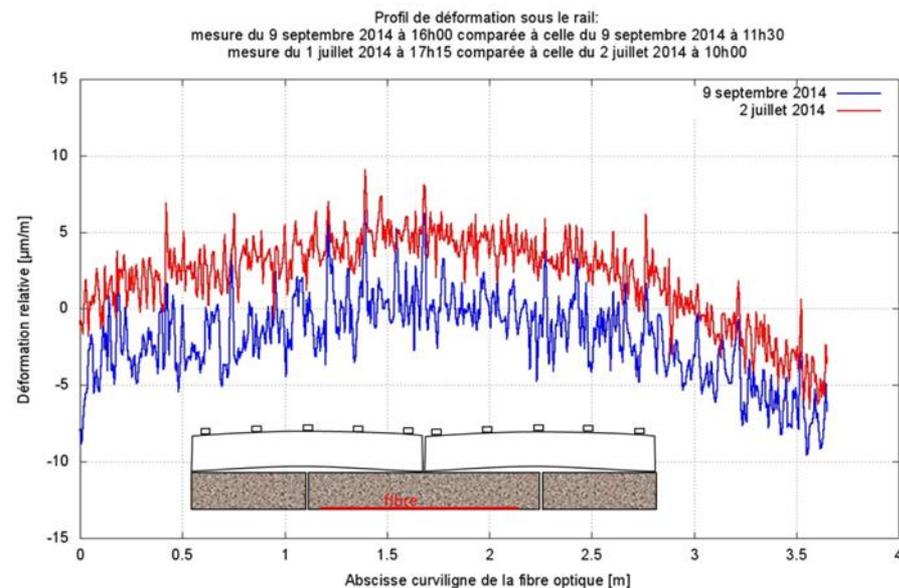
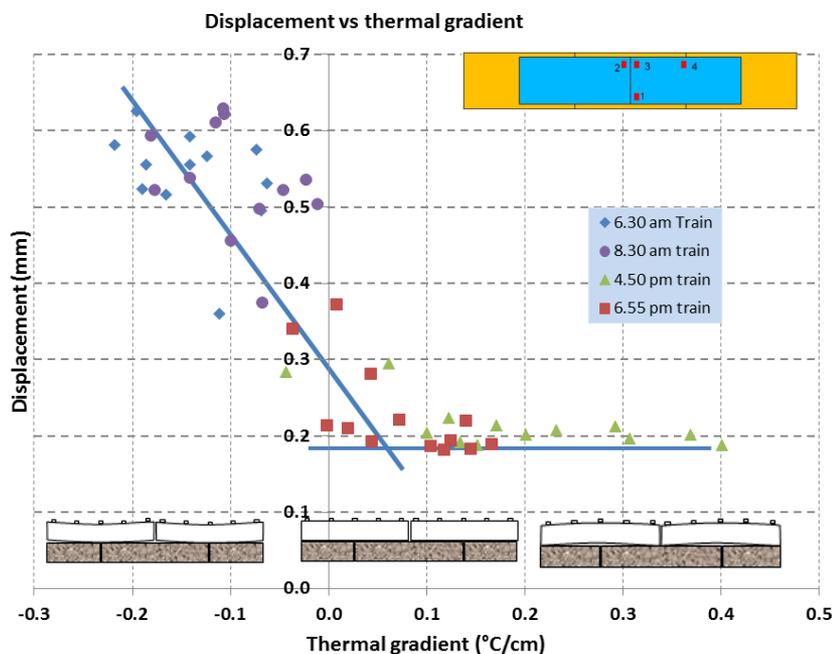
Complémentarité des techniques de mesures pour une surveillance plus efficace (détection et localisation d'anomalies)

Equipe I4S (équipe commune IFSTTAR/INRIA): développement de méthodes efficaces et robustes pour l'analyse structurale, l'évaluation non destructive, la surveillance d'intégrité, le diagnostic et la localisation d'endommagements



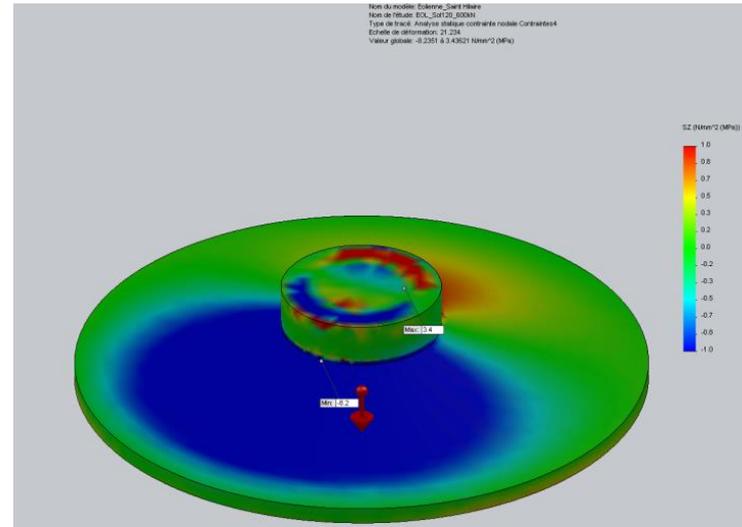
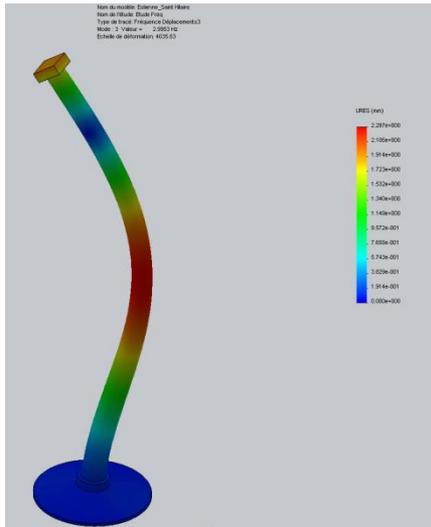
Couplage des méthodes vibratoires avec les mesures de déformations

Exemple: étude du comportement dynamique des dalles en béton de la voie ferroviaire sans ballast



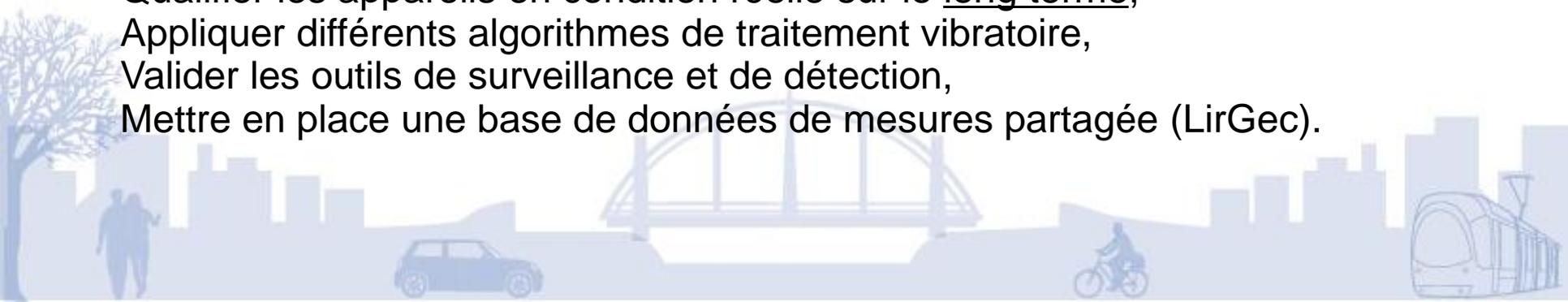
La courbure des dalles varie quotidiennement avec les gradients thermiques

Couplage des méthodes vibratoires avec les mesures déformations



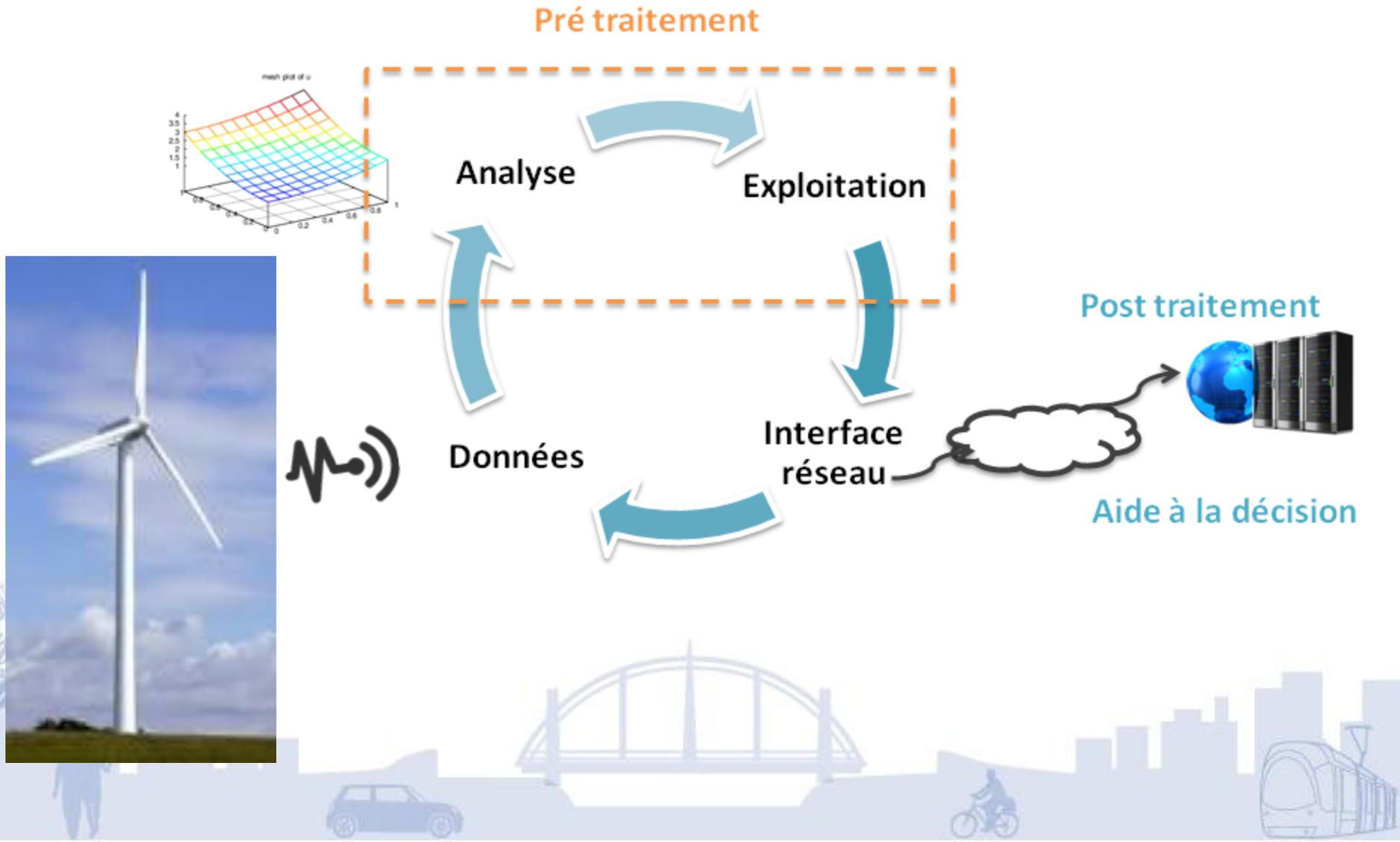
Enjeux

- Expérimenter en environnement réel les outils et méthodes,
- Qualifier les appareils en condition réelle sur le long terme,
- Appliquer différents algorithmes de traitement vibratoire,
- Valider les outils de surveillance et de détection,
- Mettre en place une base de données de mesures partagée (LirGec).



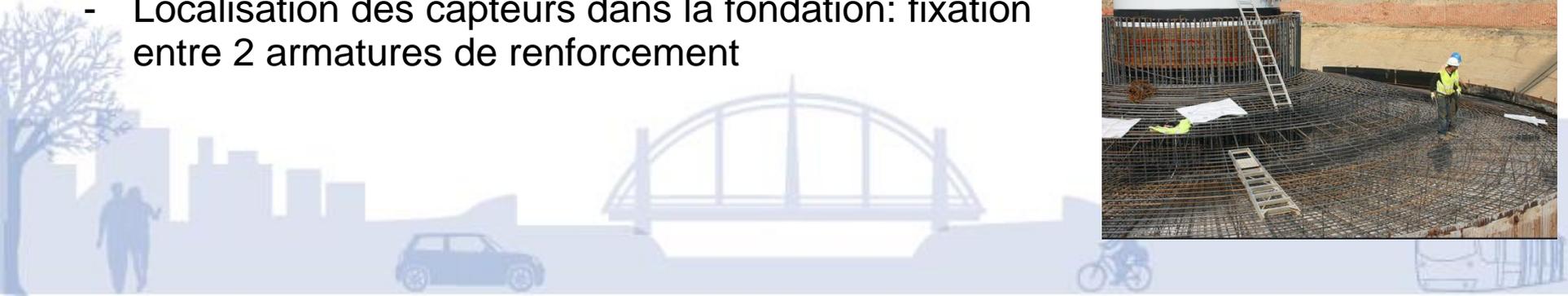
Projet de recherche de l'IFSTTAR

Monitoring en continu des vibrations et des déformations de la fondation



Proposition : monitoring par des extensomètres à fibre optique

- Technologie : réseau de Bragg
- Composant robuste et fiable
- Un capteur = 1 mesure de déformation du béton dans une direction
- Caractéristiques:
 - Base de mesure: 10cm
 - Sensibilité: $1\mu\text{m}/\text{m}$
 - Précision: $5\text{-}10\mu\text{m}/\text{m}$
- Mesures dynamiques (de quelques Hz à plusieurs kHz)
- Localisation des capteurs dans la fondation: fixation entre 2 armatures de renforcement



Simulation numérique par éléments finis

CTE WIND

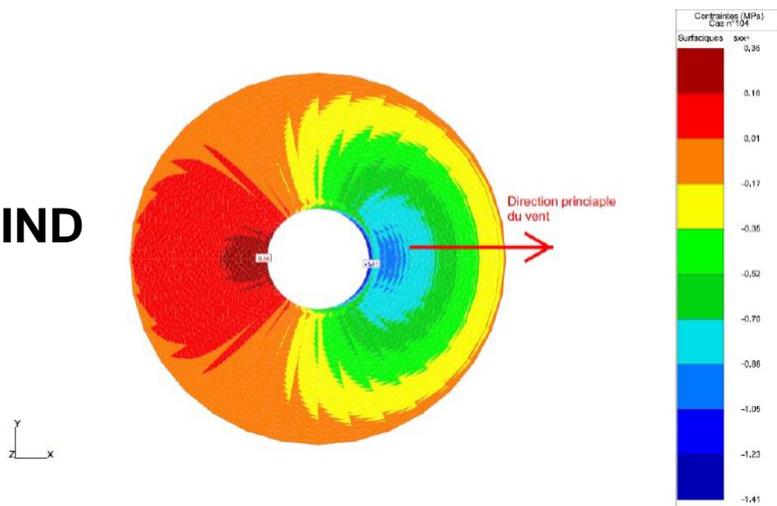


Figure 1 : Région iso valeur des contraintes tangentielles sous les sollicitations des charges en opération

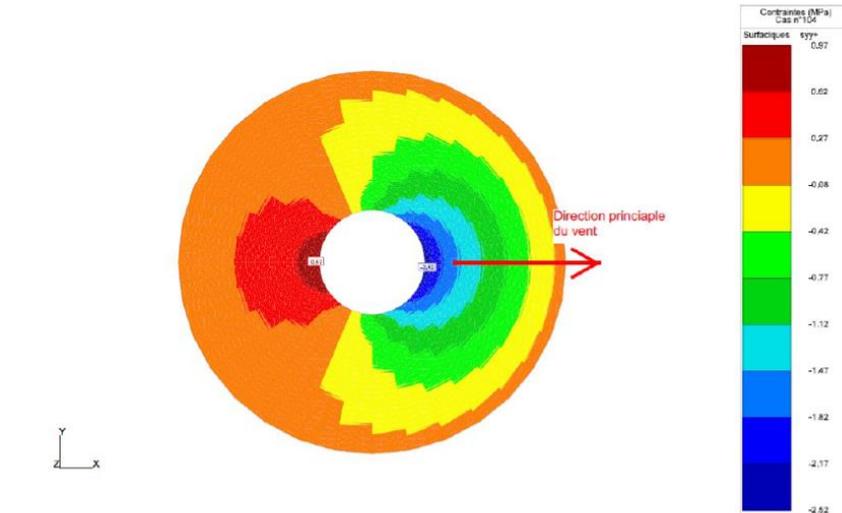
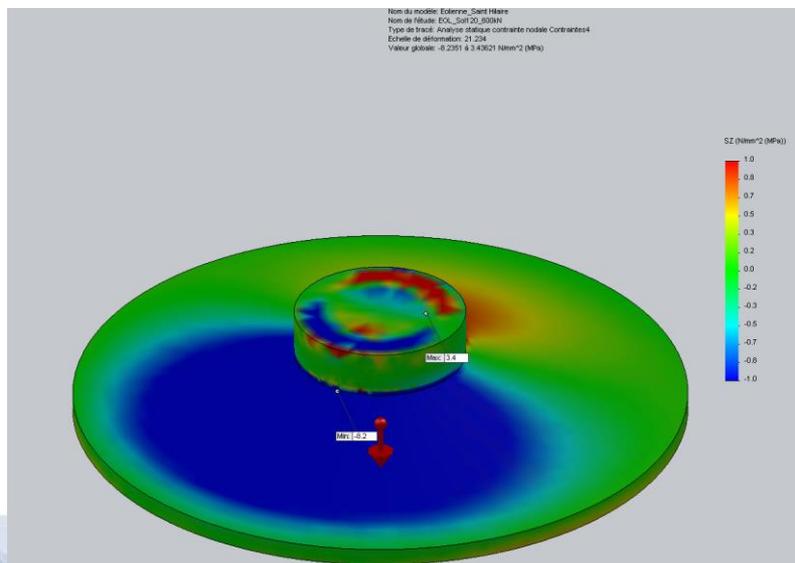
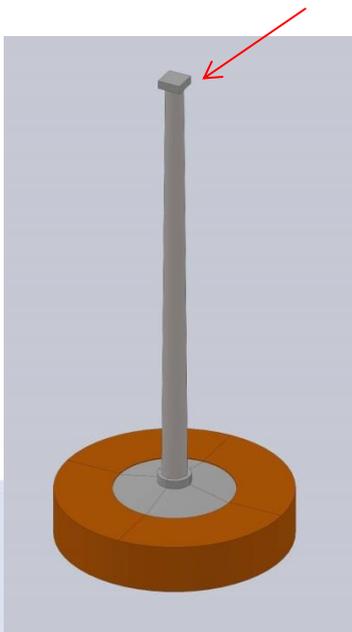


Figure 2 : Région iso valeur des contraintes radiale sous les sollicitations des charges en opération

IFSTTAR

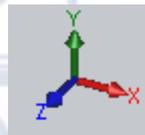
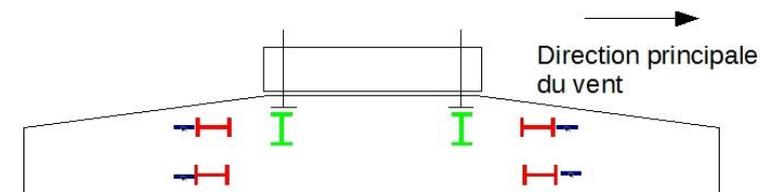
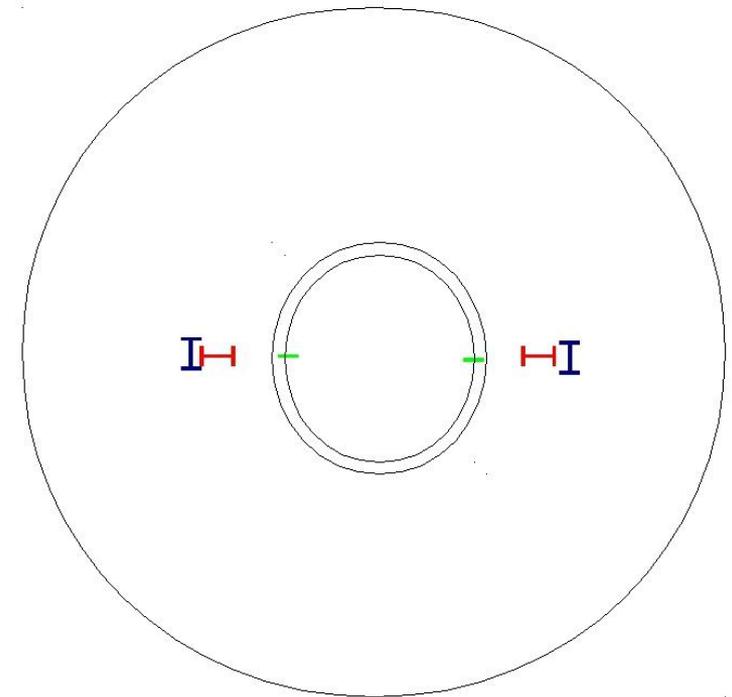
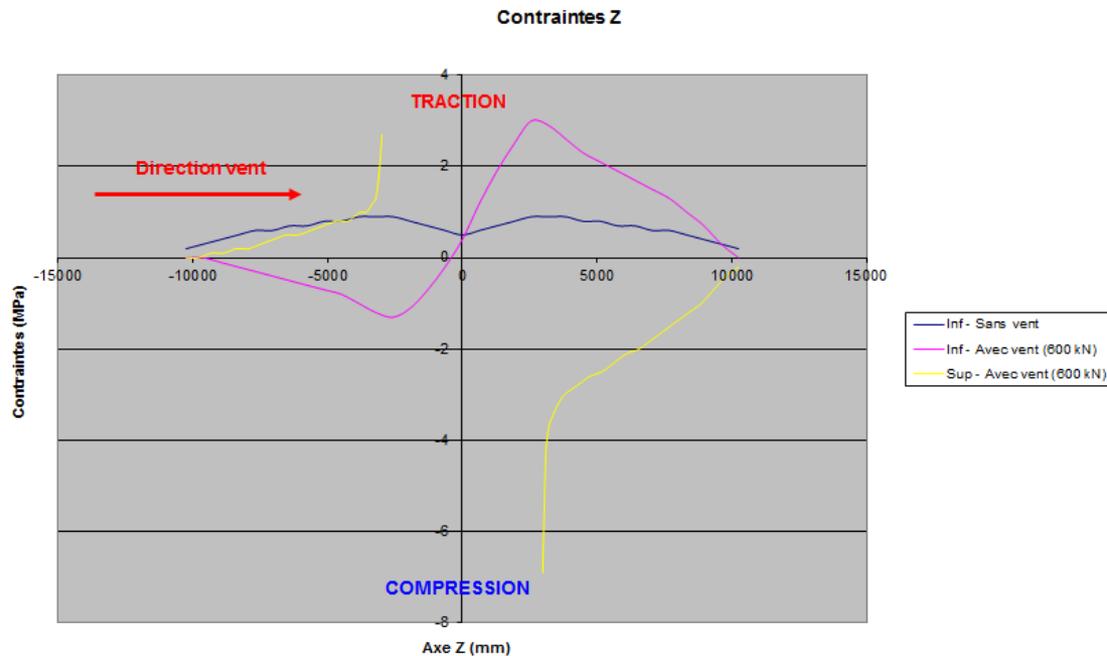


Sol : 120MPa
 Béton : 30GPa
 Masse en tête : 60T
 Effort en tête: 600kN

Localisation des extensomètres pour le monitoring de la fondation

Dans l'assiette:

- > 4 doublets d'extensomètres (1 extenso : direction X + 1 extenso direction Z)
- > 2 extensomètres verticaux (direction Y)

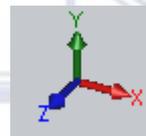
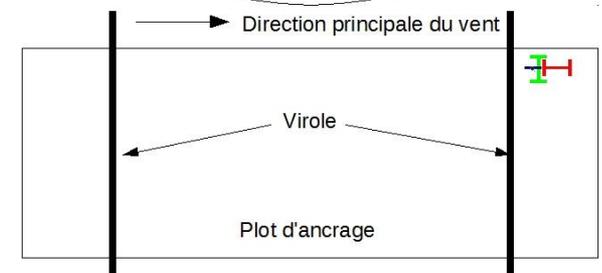
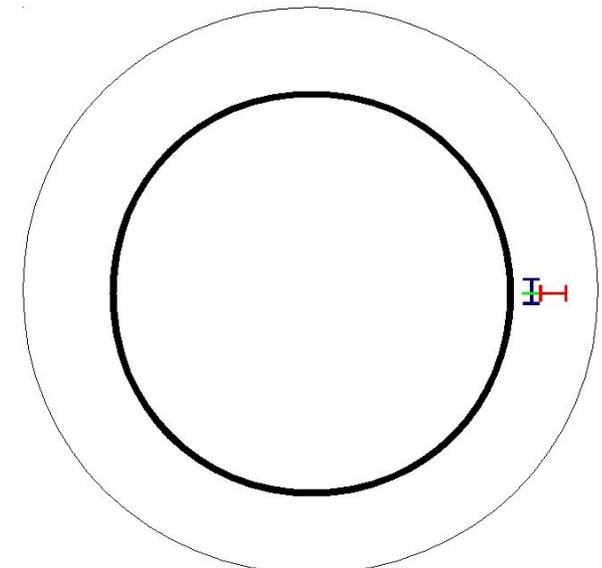
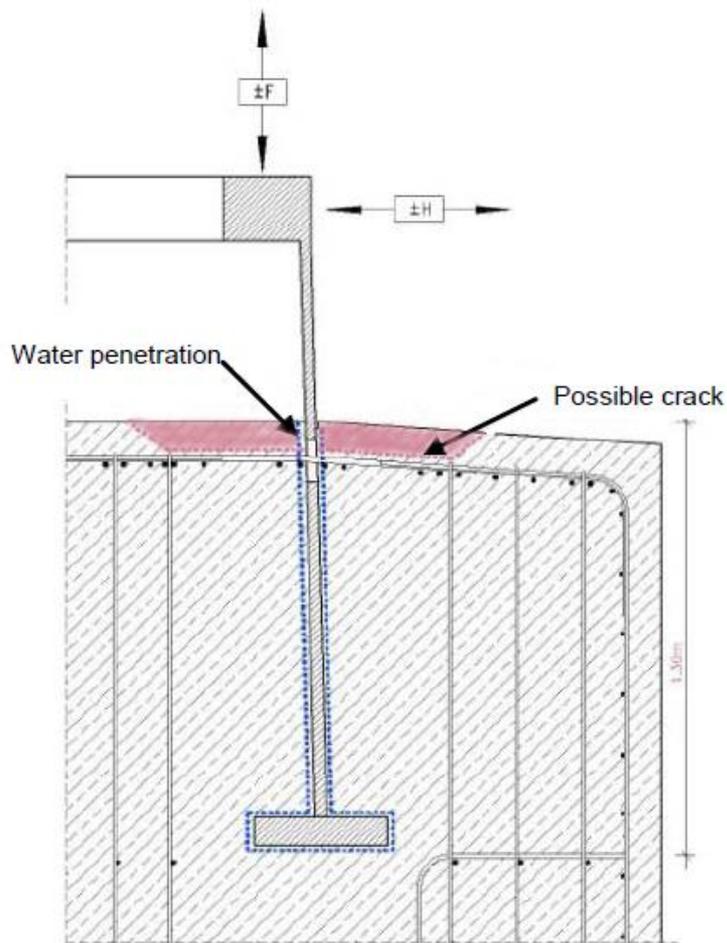


Localisation des extensomètres pour le monitoring de la fondation

Dans le plot d'ancrage:

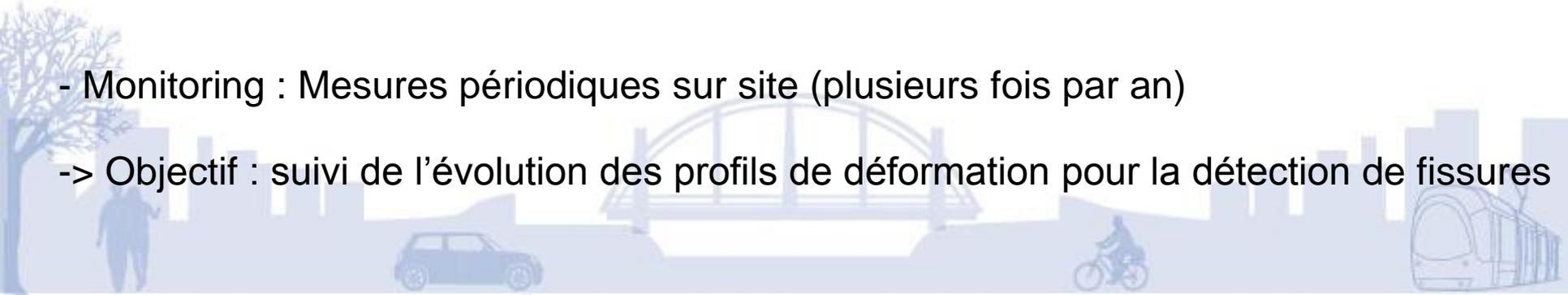
-> 1 triplet d'extensomètres

(1 extenso : direction X + 1 extenso : direction Y + 1 extenso direction Z)



Proposition : monitoring par des fibres optiques « continues »

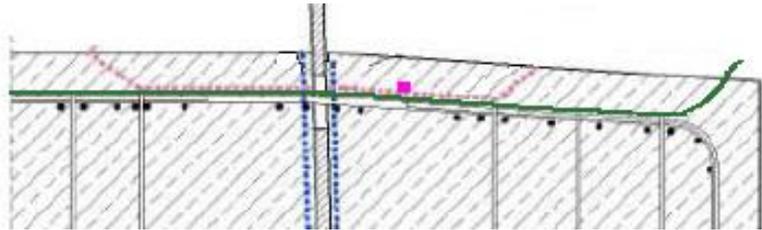
- Capteur: fibre optique (câble optique: diamètre 2mm)
Interrogateur: technologie Rayleigh
- Mesures de profils de déformation (mesures relatives)
Résolution spatiale: 1cm
Longueur maximale de fibre optique depuis l'entrée de l'interrogateur: 70m
- Fixation des câbles optiques le long des armatures de renforcement
- Mesure statique: quelques secondes pour faire une mesure
- Sensible aux variations de température (compensation difficile)
- Monitoring : Mesures périodiques sur site (plusieurs fois par an)
- > Objectif : suivi de l'évolution des profils de déformation pour la détection de fissures



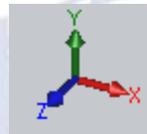
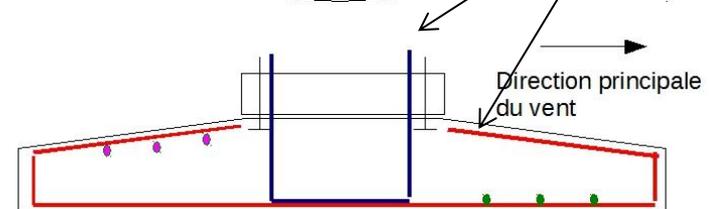
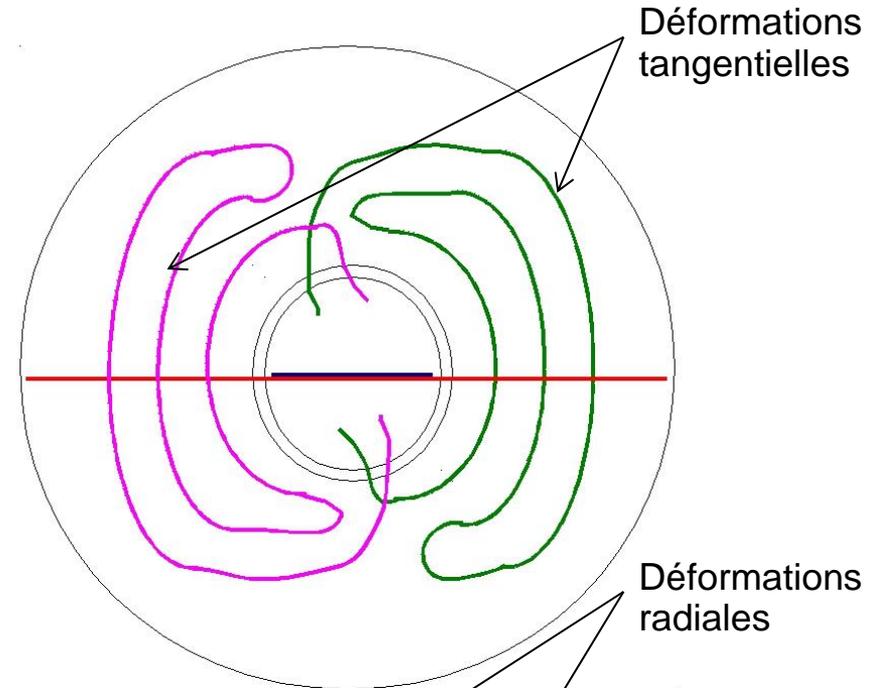
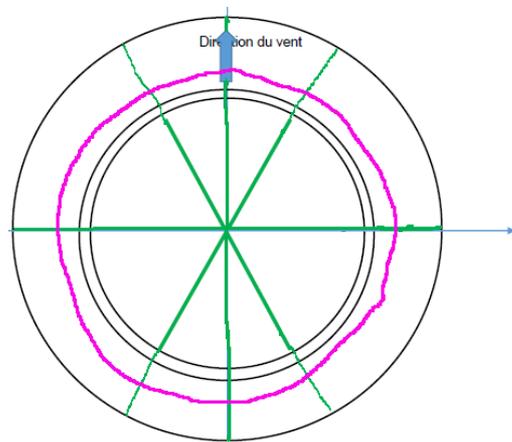
Monitoring des vibrations et déformations

Positionnement des fibres optiques « continues » :

Dans le plot d'ancrage



Dans l'assiette



Proposition : Test et validation d'un capteur innovant

- Capteur multiaxes « sentinelle »

3 capteurs de mesure de déformation (Bragg)

1 capteur de mesure de température (Bragg)

- Capteur innovant: conçu, développé et produit par le GeM
(Brevet 2014 avec un financement SATT)

- Enjeux:

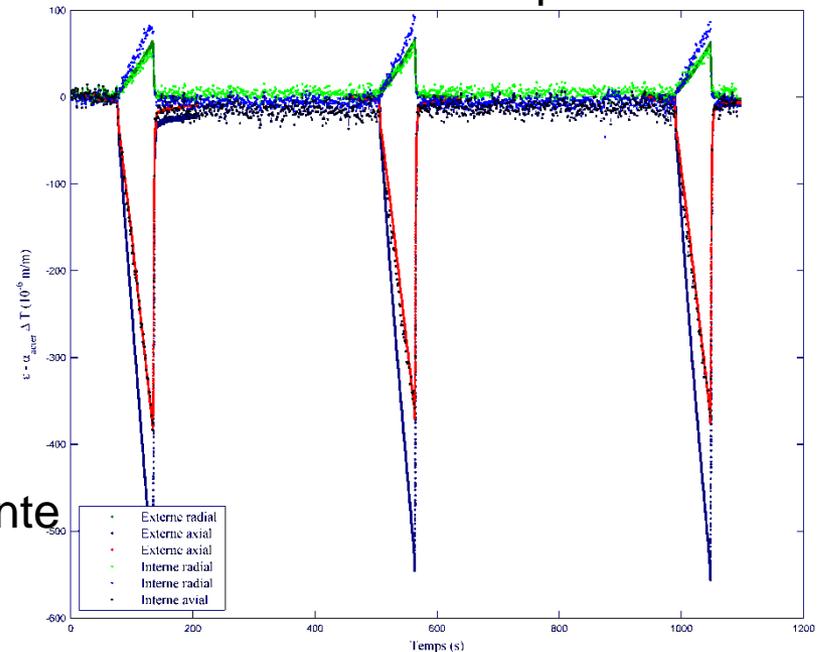
1- mise en œuvre en environnement réel

2- test et validation in-situ par comparaison avec des extensomètres

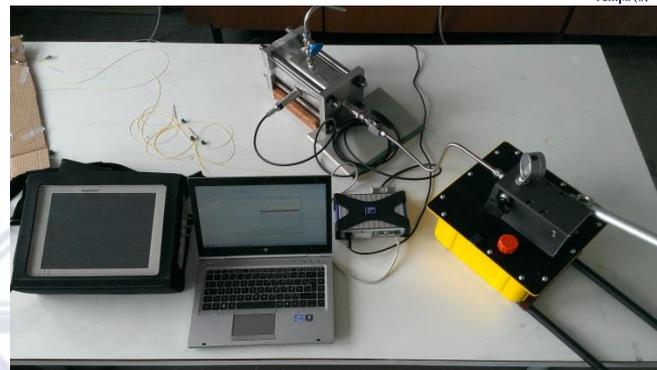
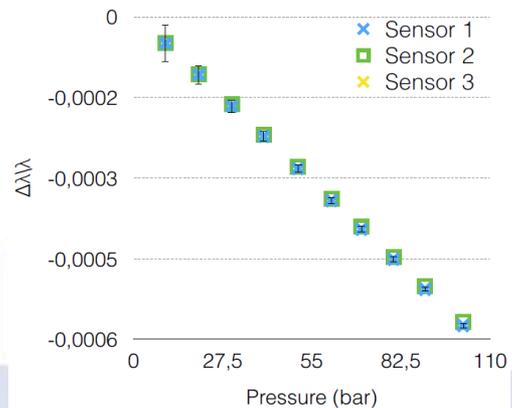


Travaux de validation déjà effectués : tests en laboratoire

- Version acier (béton) : suivi de retrait d'un béton et test de compression



- Version Plexiglass (sol) : test en enceinte pressurisée

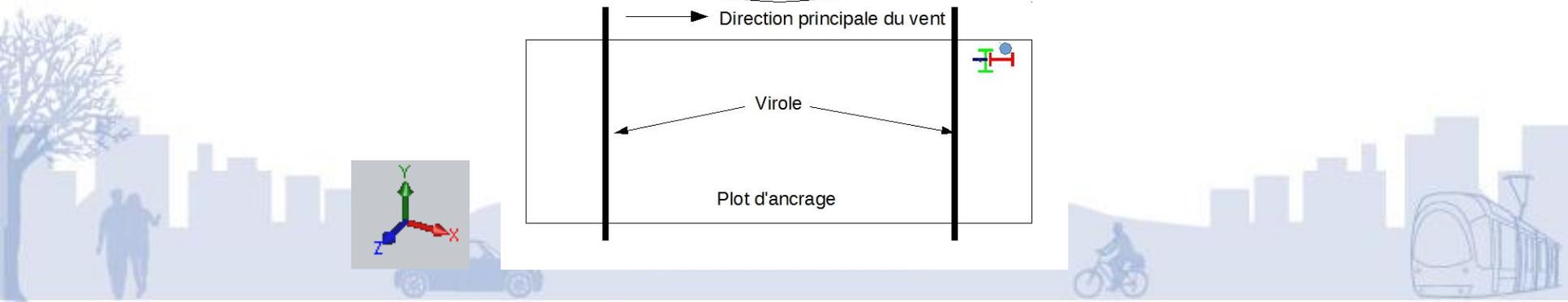
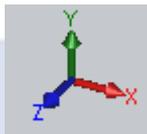
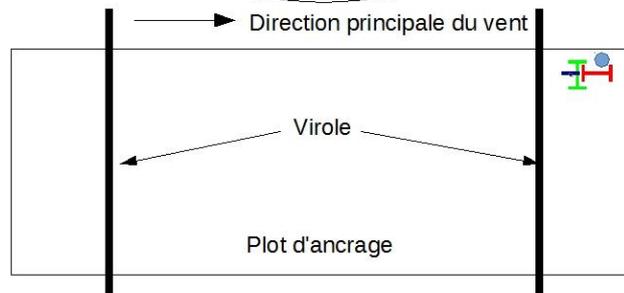
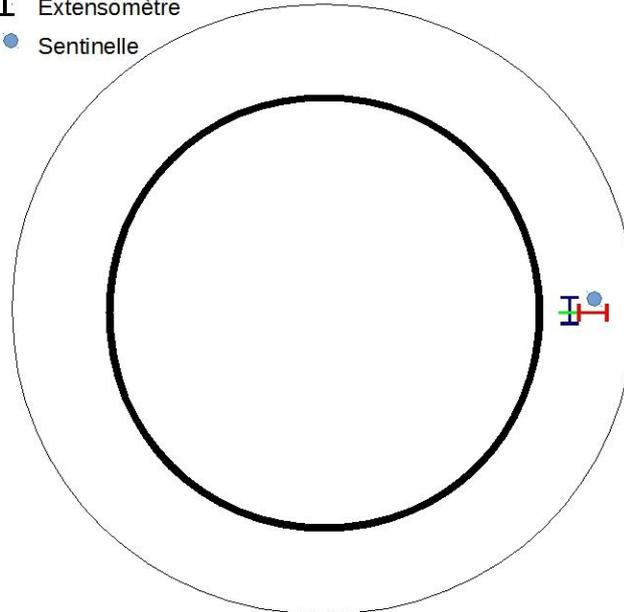
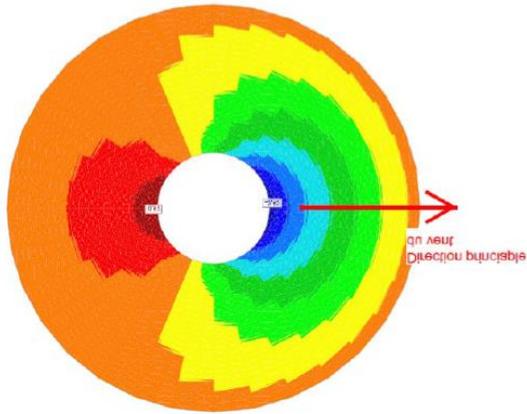


Monitoring des déformations

Localisation du capteur sentinelle destiné au béton

Dans le plot d'ancrage au voisinage du triplet d'extensomètres (zone la plus sollicitée de la fondation)

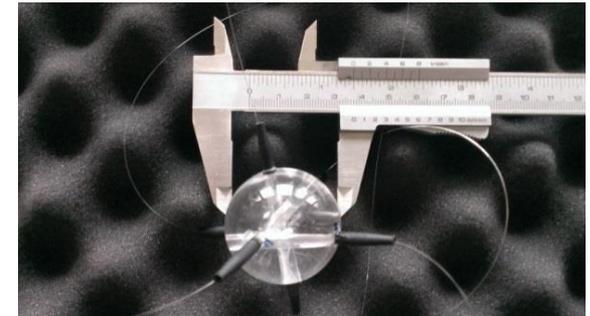
┃ Extensomètre
 ● Sentinelle



Monitoring des déformations dans le sol

Proposition: monitoring des déformations dans le sol + détection du soulèvement de la fondation

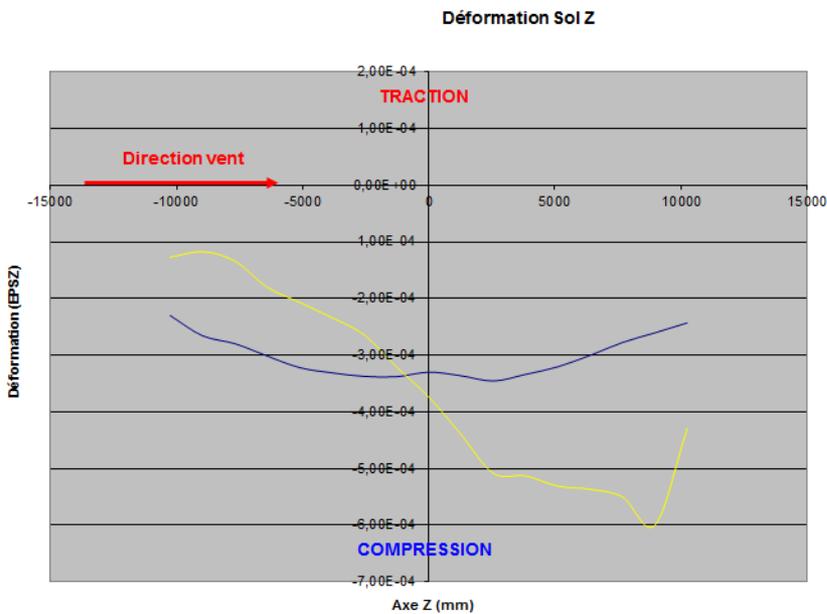
- Capteurs: jauge TML KM-100B (jauge électrique)
Caractéristiques :
 - Compensé en température
 - Faible module élastique
 - IP 68
- Capteur « sentinelle » (version Plexiglas)
 - Faible module élastique
 - Mesure dynamique avec les Braggs
 - Mesure sur 3 axes



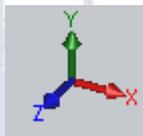
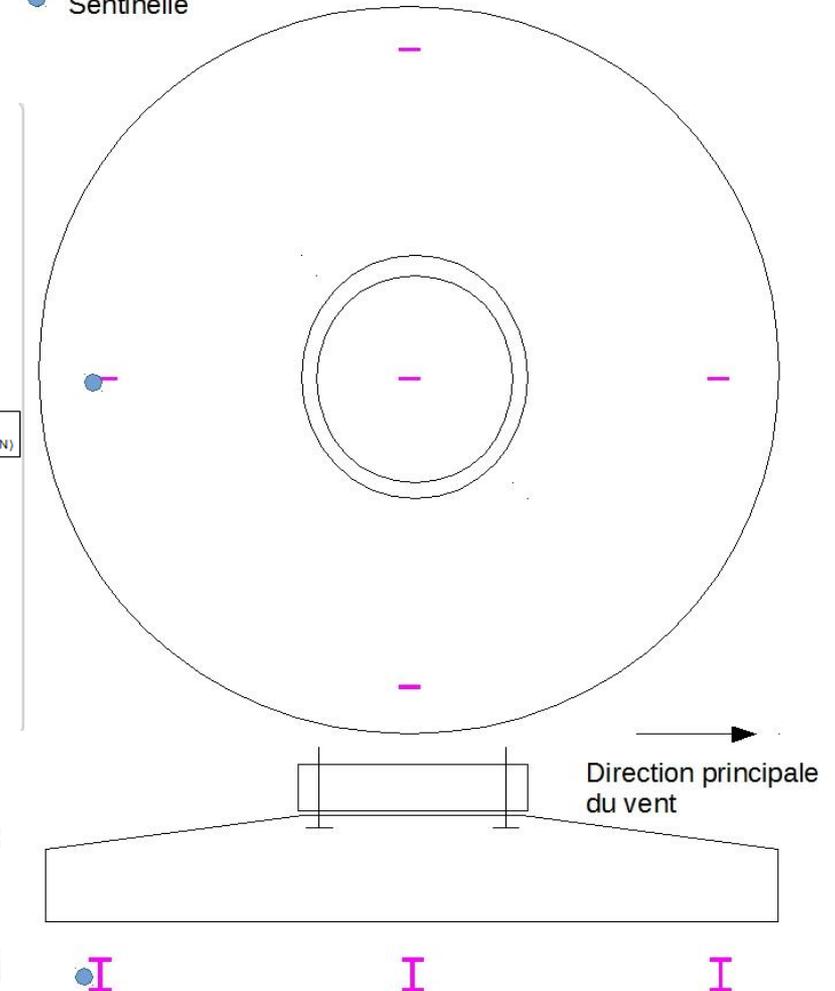
- Soulèvement de la fondation: notamment lors d'un arrêt d'urgence ou lors de gros coups de vent

Monitoring des déformations dans le sol

Localisation des jauges TML KM-100B et du capteur sentinelle



I Jauge TML
● Sentinelle



Monitoring des vibrations

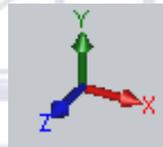
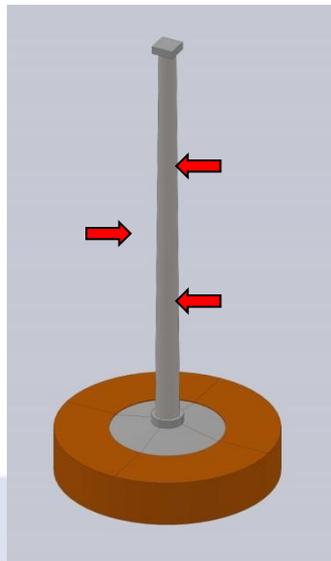
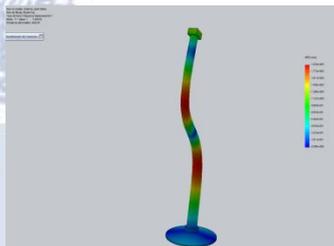
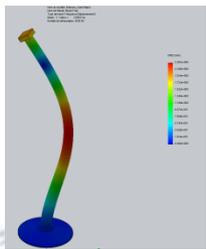
Proposition : Instrumentation par des accéléromètres

- Capteurs capacitifs très faible bruit ($\leq 10\mu g$)
- Mesures dynamiques
- Périodicité des mesures: mesures en continu
- Localisation des capteurs



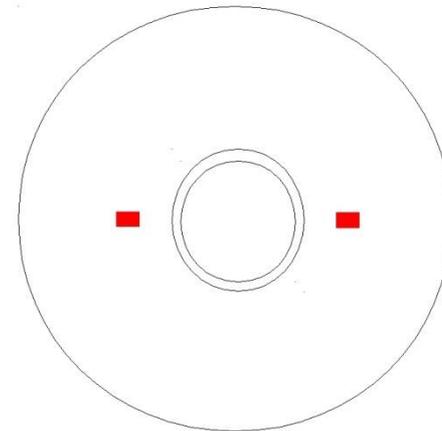
Sur le mat

3 sections à instrumenter avec 2 accéléromètres (direction X et Z) par section



Dans la fondation

2 accéléromètres (1D, direction verticale)



Budget (provisoire)

Matériel	Qt	PU	Total
Fibre optique "continue"	300	4	1200
Extensomètre optique non compensé en température	4	500	2000
Extensomètre optique compensé en température	7	800	5600
Extensomètre optique non compensé en température	2	500	1000
Réseaux de Bragg	10	100	1000
Composant acier d'un capteur "sentinelle"	1	2200	2200
Centrale d'acquisition pour les extensomètres et les capteurs "sentinelles"	1	20000	20000
Jauge TML KM-100B	5	300	1500
Module d'acquisition pour les jauges	1	1500	1500
Thermocouples	10	50	500
Module d'acquisition pour les thermocouples	1	1000	1000
Accéléromètres	8	800	6400
Module d'acquisition pour les accéléromètres	1	1500	1500
Système de collecte et d'envoi des données sur un web serveur	1	1500	1500
Modem	1	250	250
Abonnement 3G			
Connecteurs optiques	10	20	200
Gaine annelée (ICTA)	4	30	120
Gaine "inox annelée 4mm "	350	5	1750
Armoire	1	500	500
		TOTAL	49720

Merci de votre attention

