

**Institut français
des sciences et technologies
des transports, de l'aménagement
et des réseaux**

Méthodes CND sans contact dans le génie civil :

**Méthodes ultrasonores,
électromagnétiques et thermiques**

Odile Abraham, Xavier Dérobert, Jean Dumoulin

prenom.nom@ifsttar.fr



IFSTTAR

Journée Technique CND sans contact PRECEND & AG PRECEND – jeudi 16 mai 2013

Plan

- **Les objectifs du cnd dans le génie civil**
- **Les méthodes CND sans contact du génie civil**
- **Exemples méthodes US**
- **Exemples méthodes EM**
- **Exemples méthodes IR**
- **Conclusions & perspectives**



les objectifs du cnd dans le génie civil



Inspection visuelle

Zones à ausculter grandes

Bas coût

Accès complexe

Fabrication in situ

...



@ MACOA, LCPC



Estimation de la durée de vie résiduelle

Adaptation à un nouvelle usage

Accroissement de la sécurité

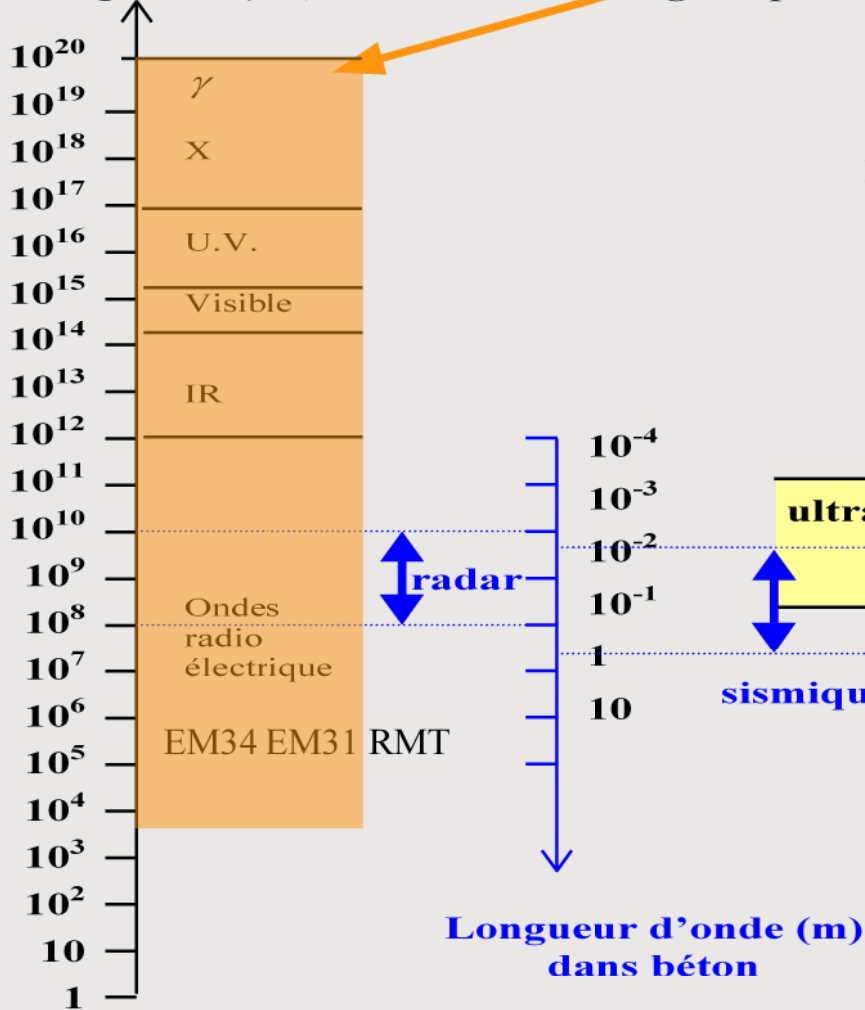
...



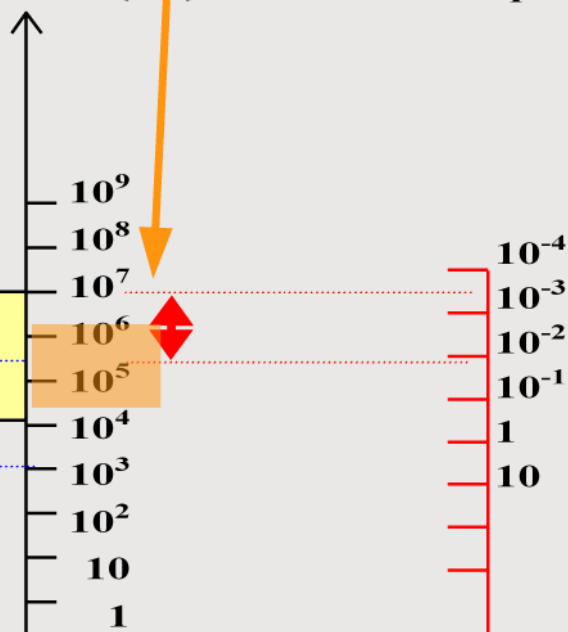
+ bois, composites, etc.

Les méthodes CND sans contact du génie civil

Fréquence (Hz) – ondes électromagnétiques



Fréquence (Hz) – ondes mécaniques



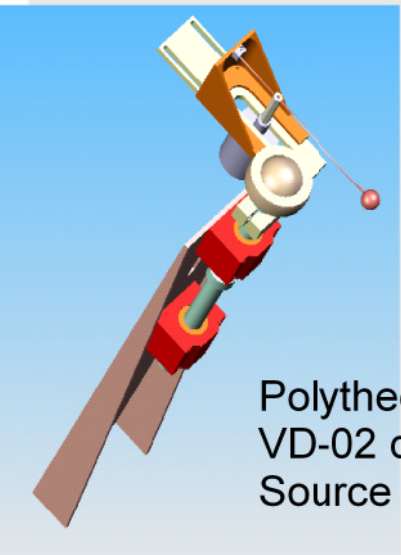
THz (em)
Géophysique :
gravimétrie
magnétisme

Exemples méthodes US (interferomètre laser)

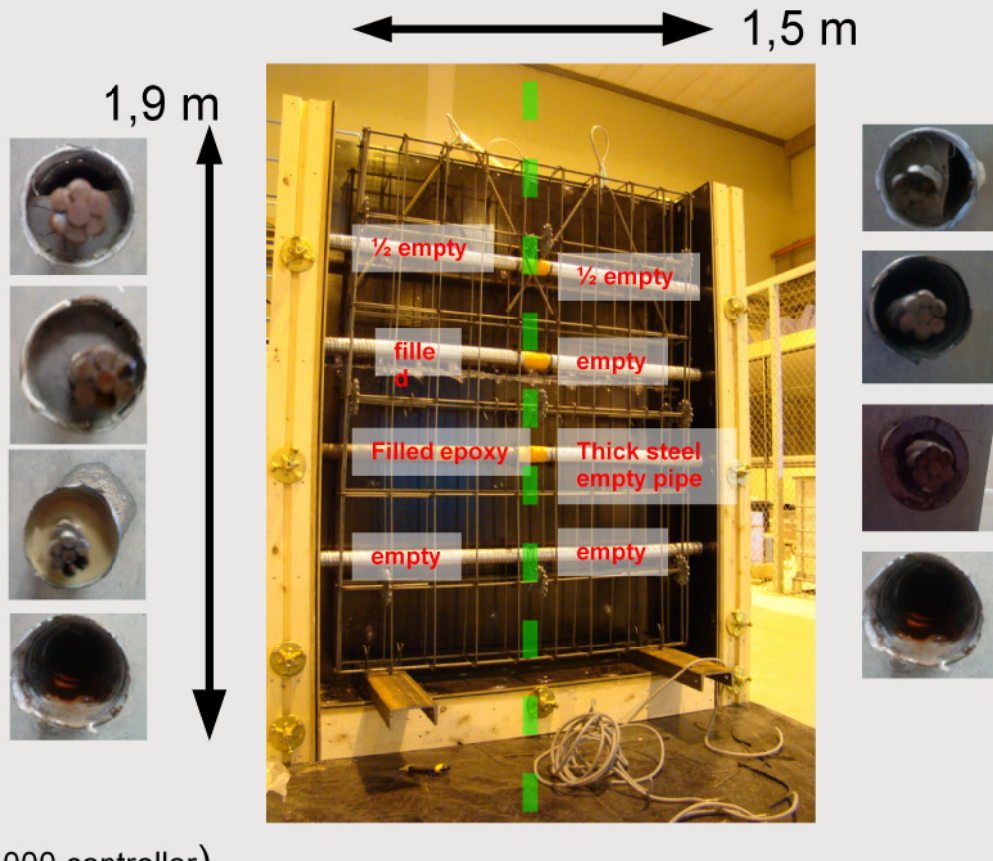
- Détection de défauts
 - Impact echo (béton) : onde de Lamb (ZGV)
 - Détection de vide dans les gaines de précontrainte
- Caractérisation des matériaux
 - Ondes de surface (béton)
 - Vitesse de phase en fonction de la teneur en eau et de la porosité



Détection de défaut / US - Impact echo



Polytec PI (OFV-505 sensor + OFV-5000 controller)
VD-02 démodulateur (5 mm.s⁻¹.V⁻¹ bandwidth 0 → 250 kHz)
Source : bille en acier balls 6 mm ->12 mm



Détection de défaut / US - Impact echo

Projet ANR ACTENA

Béton précontraint

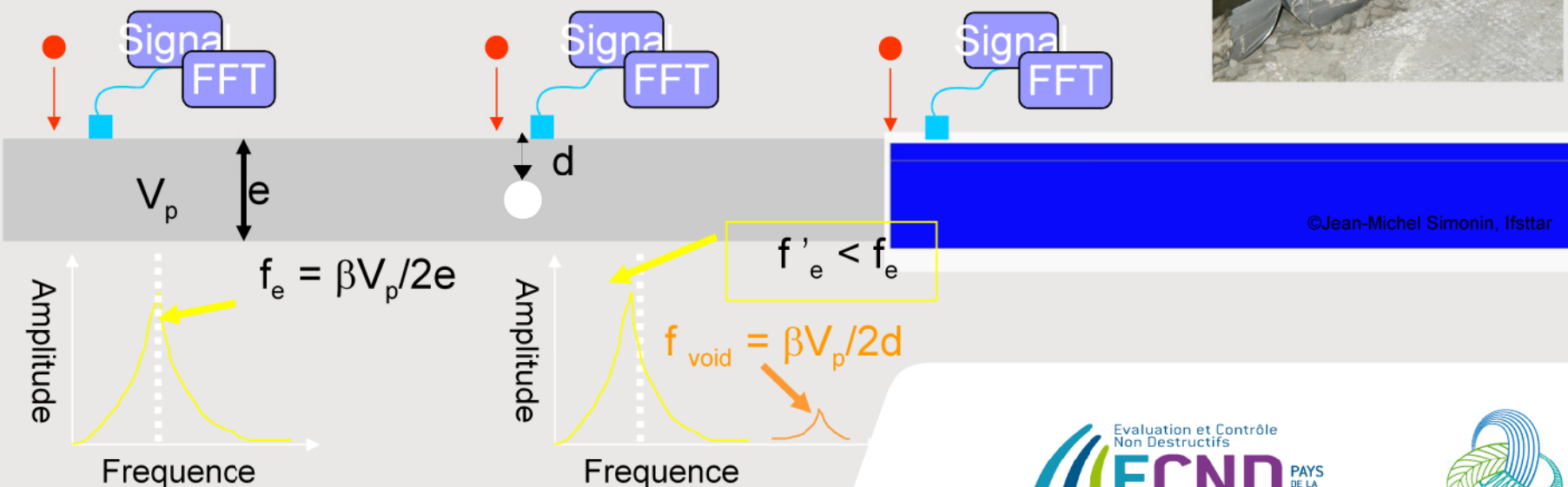


- En présence d'un vide

- Décalage de la fréquence de l'épaisseur (f_e)

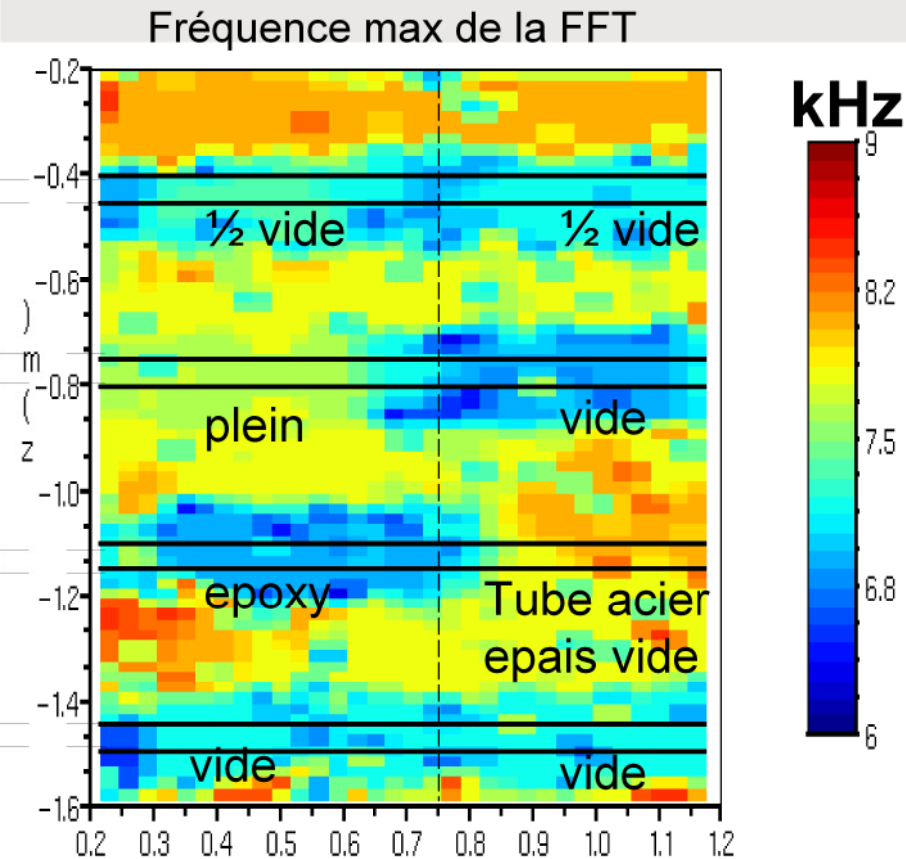
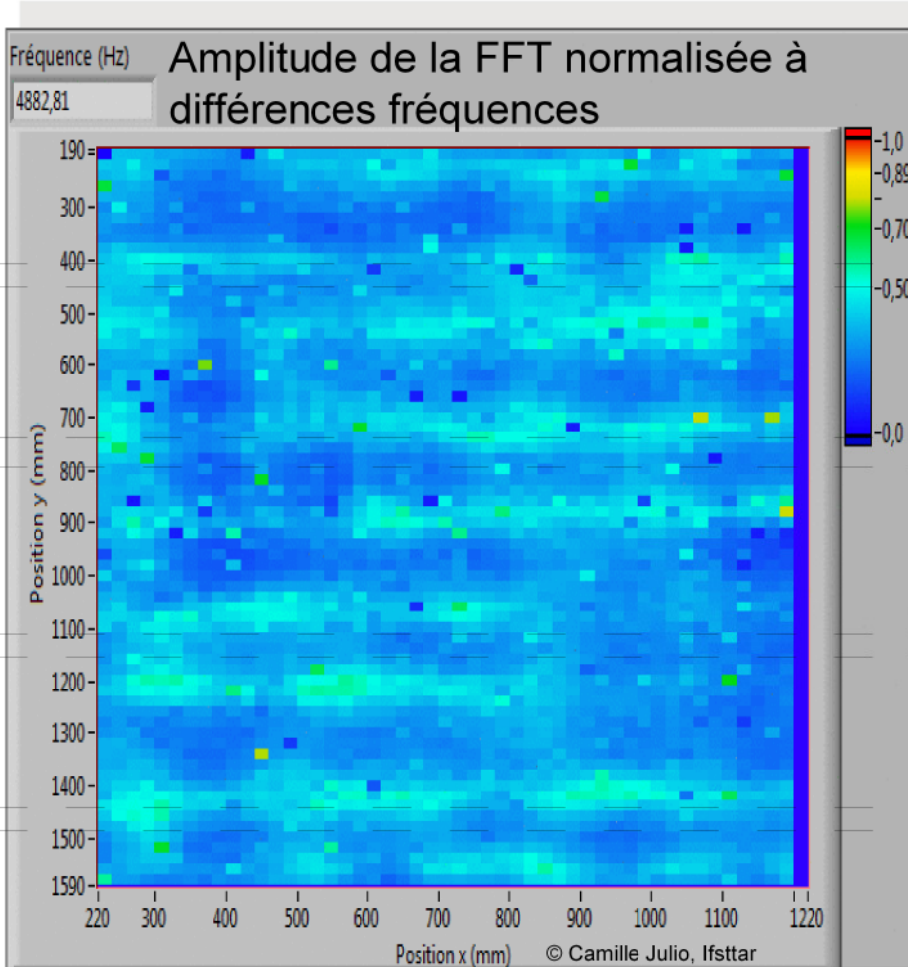
- $f_e \rightarrow f'_e$

- $f_{\text{void}} = \beta V_p / 2d$

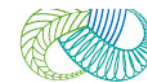


Détection de défaut / US - Impact echo

C- SCAN



Abraham O., Popovics J.S., Impact-echo techniques for evaluation of concrete structures, in Non-destructive evaluation of reinforced concrete structures, Vol.2, Woodhead Publishing Limited, CRC Press N10267, ISBN 978-1-84569-950-4, 2010, pp466-489.



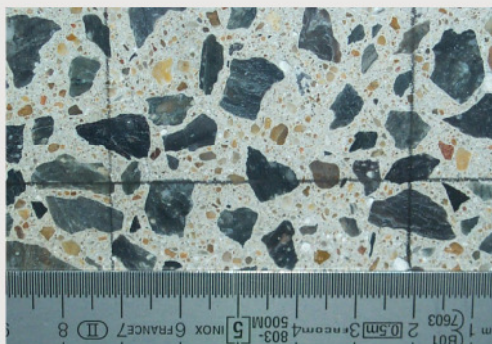
Caractérisation des matériaux / US - Ondes de surface



Paramètres de contrôle
mesurés :

Rc (Mpa)
E (Gpa)
 ρ (kg/m³)
porosité (%)

Étude paramétrique
Taux de saturation(%)
[Cl-]
Profondeur de
carbonatation



Projet ANR SENSO 

Evaluation et Contrôle
Non Destructifs
 ECND PAYS
DE LA
LOIRE



Journée CND sans contact PRECEND – 16 mai 2013

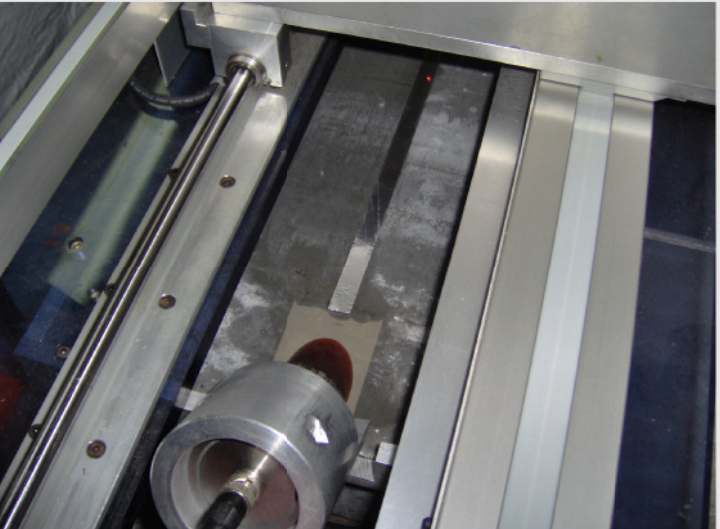
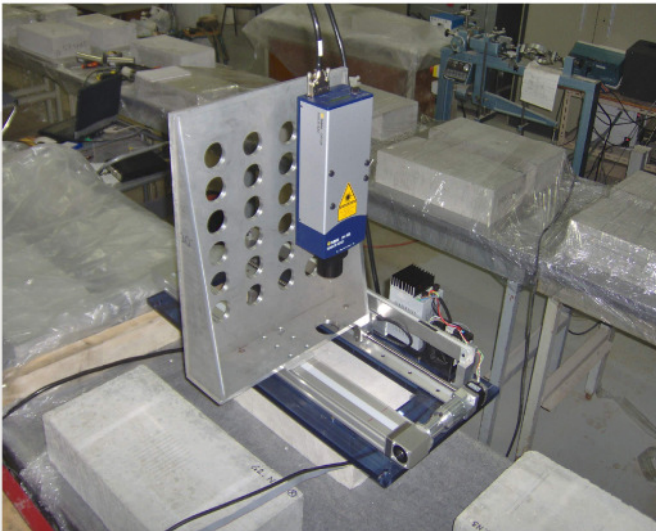
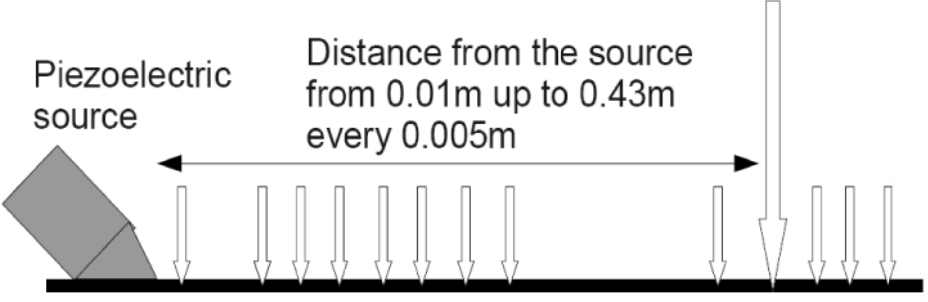
Caractérisation des matériaux /

US - Ondes de surface

Laser interferometer receiver

Piezoelectric source

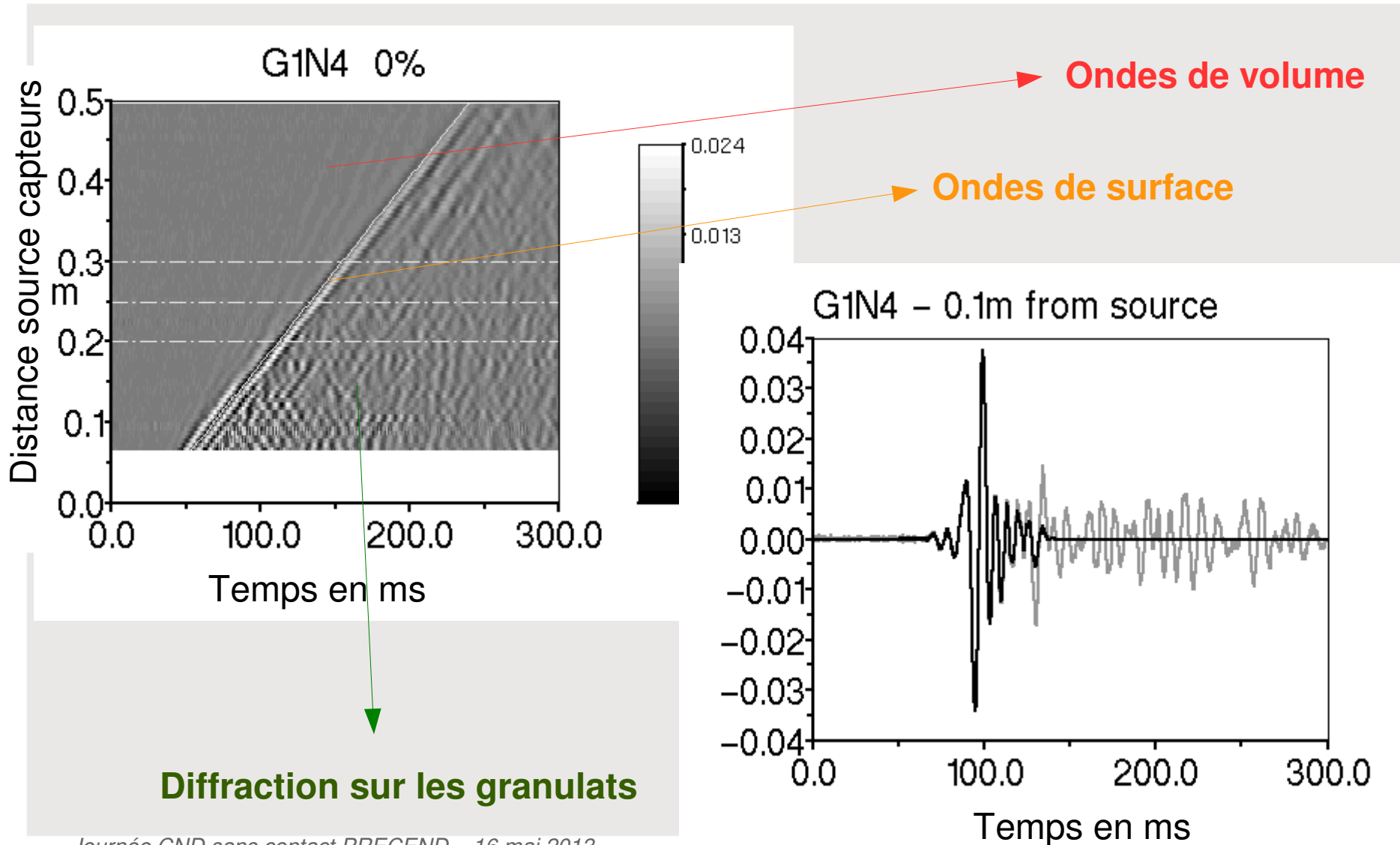
Distance from the source from 0.01m up to 0.43m every 0.005m



1 sismogramme ~ 8'

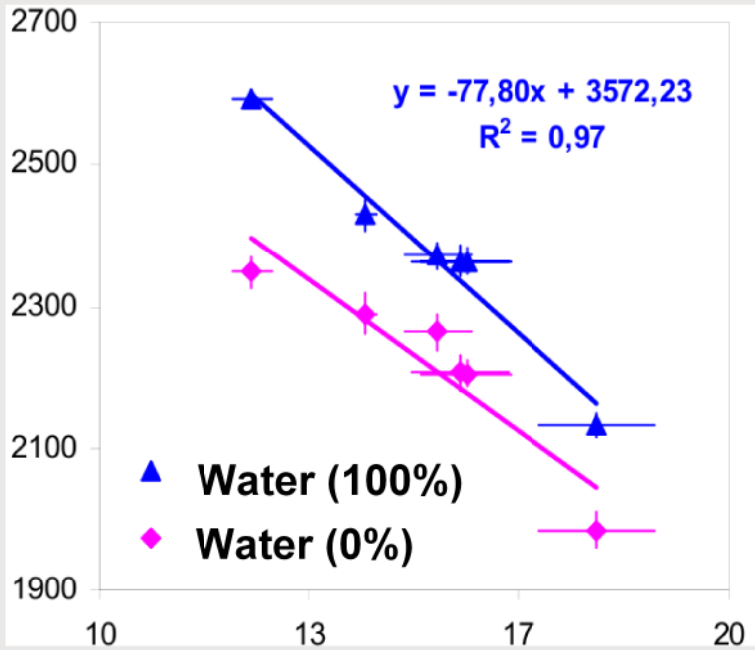


Caractérisation des matériaux / US - Ondes de surface



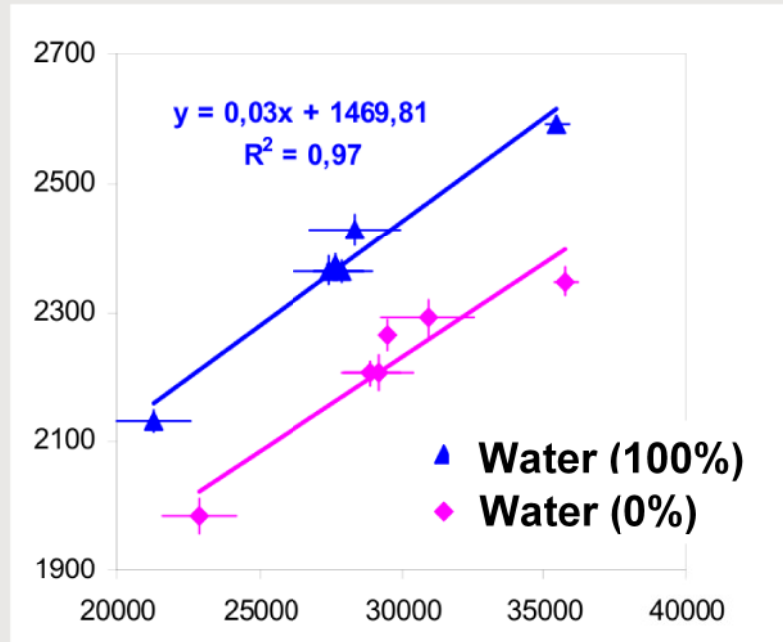
Caractérisation des matériaux / US - Ondes de surface

Vitesse de phase (m/s) pour $\lambda=0.03\text{m}$



Porosité (%)

Vitesse de phase (m/s) pour $\lambda=0.03\text{m}$



E (MPa)

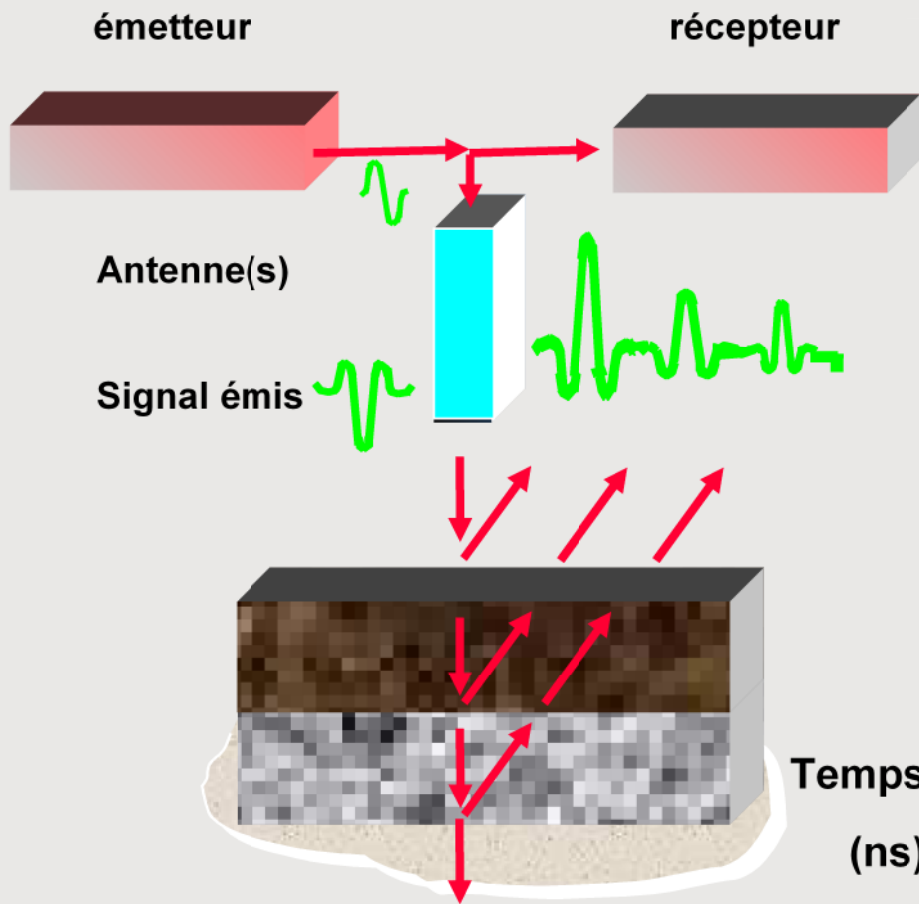
Abraham O., Piwakowski B., Villain G., Durand O., Non-contact, automated surface wave measurements for the mechanical characterisation of concrete, JCBM , 37, pp904-915, 2012.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.03.015>



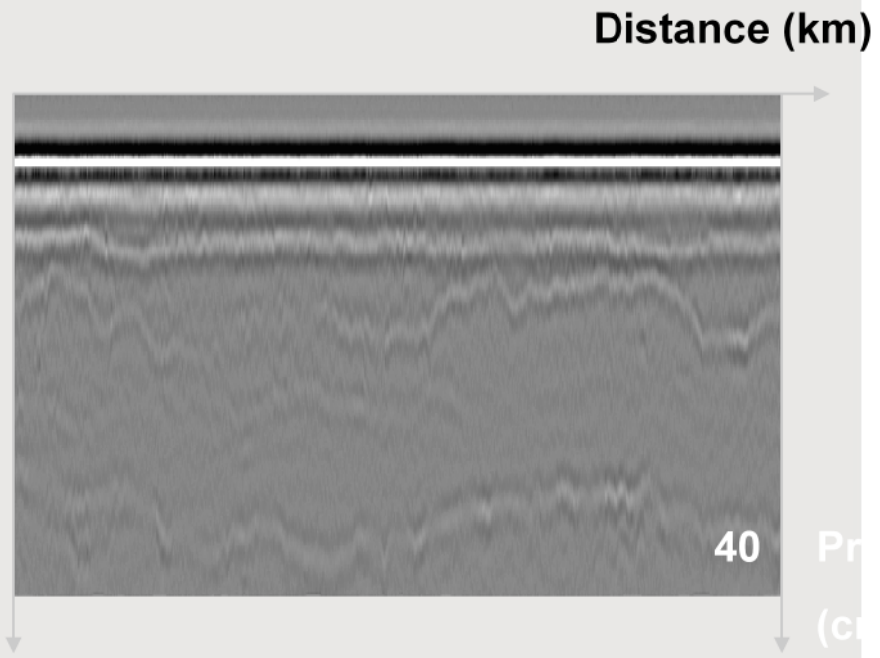
Exemple méthodes EM : techn. Radar



Principe Radar

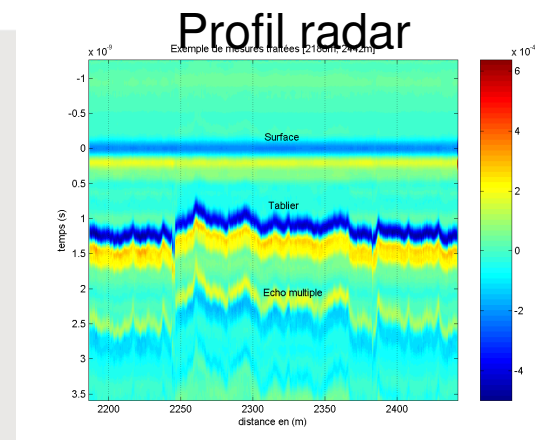


- Systèmes impulsionnels
- Systèmes à sauts de fréquence

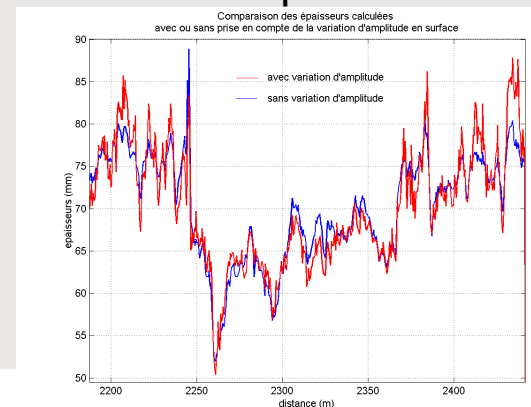


Etalonnage nécessaire => Epaisseurs !!

Matériels / Mesures



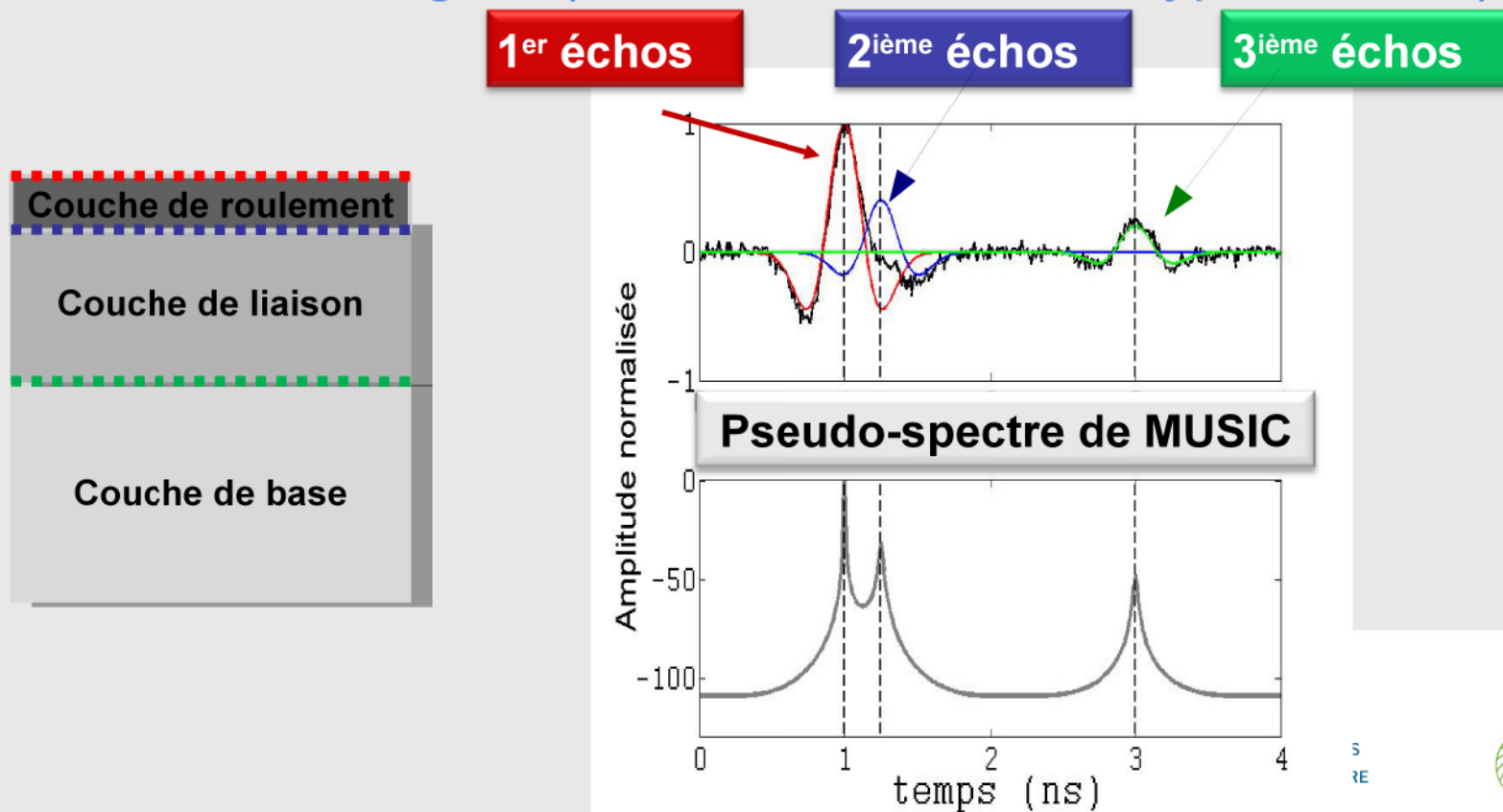
Profil d'épaisseur



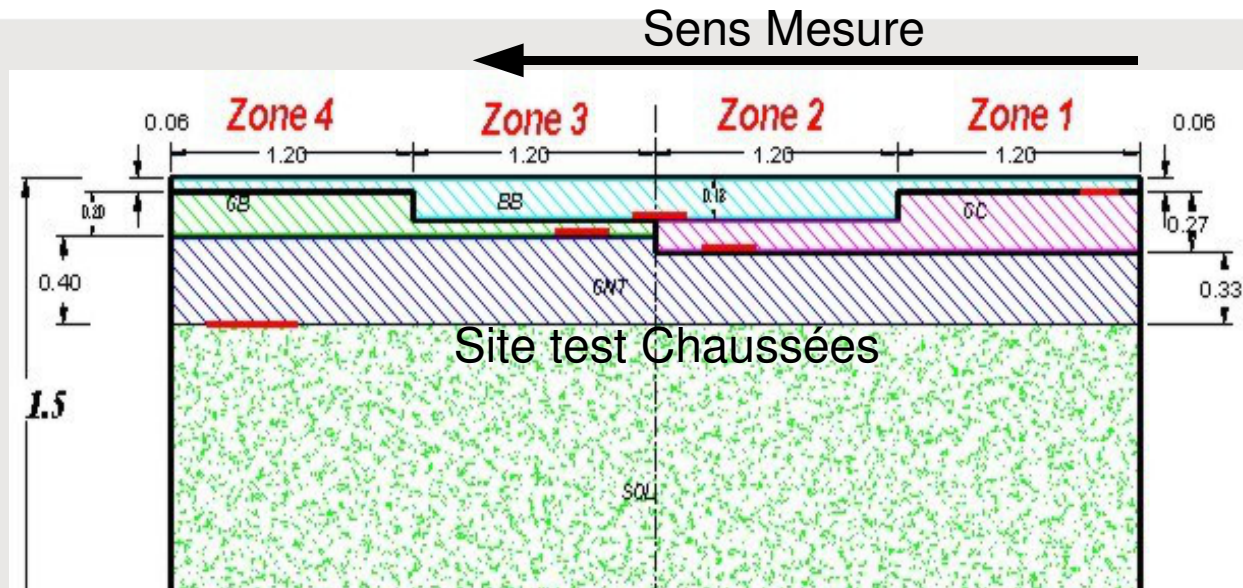
Traitement du signal

◆ Objectif : Épaisseurs de couches minces

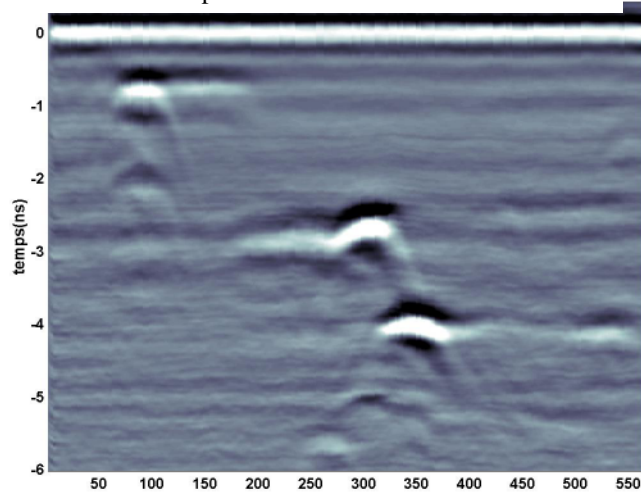
- Ondes radar (THF – diapo suivante)
- Traitement signal (hautes résolutions – type MUSIC)



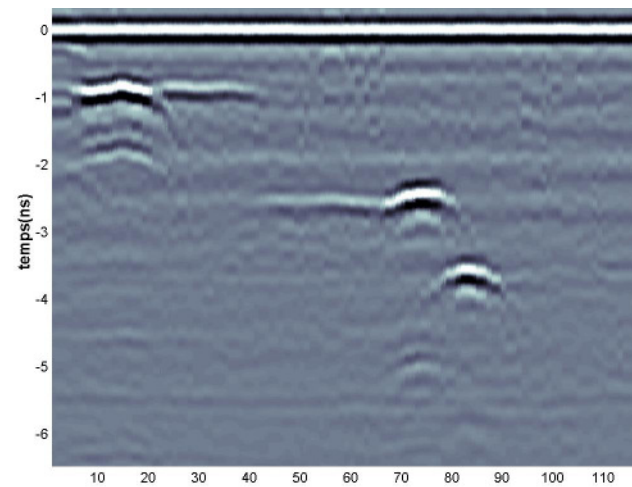
Radars à sauts de fréquence (THF)



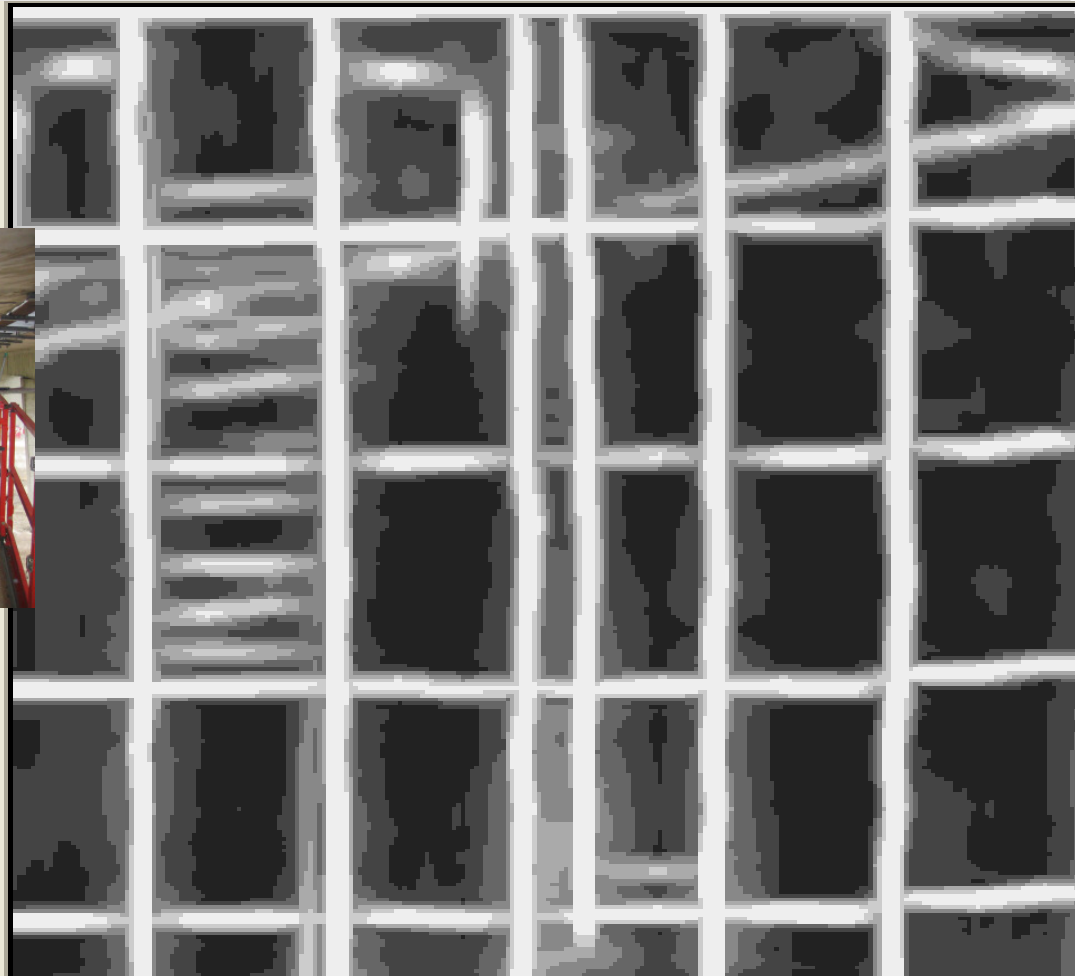
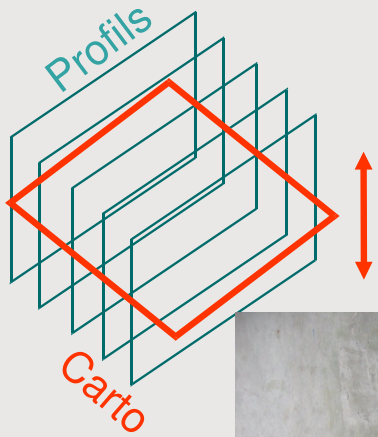
Impulse radar – 2 GHz



Step-Freq radar – 3 GHz



Cartographie radar



Méthodes EM :

Caractérisation de matériaux



Ex. de plan d'expérience (ANR SENSO)

Objectif : Couplage/complémentarité des méthodes ND

- 9 mélanges (E/C variables)
- 5 états hydriques différents
- 9 techniques de mesures ND
- Plusieurs centaines de mesures...



Mesures ND en laboratoire



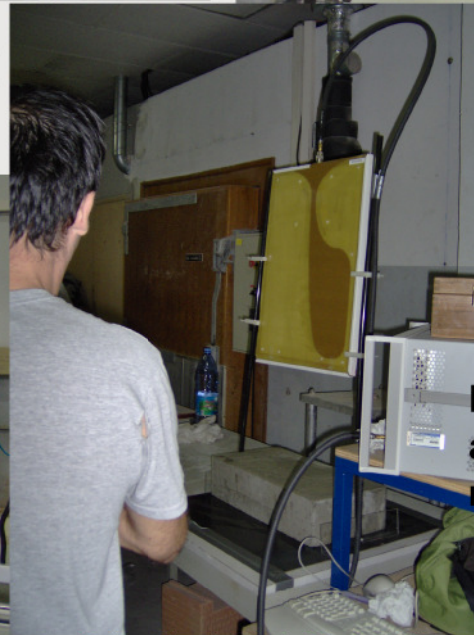
**Radar – antennes 1,5 GHz
bistatiques**



**Sonde rectangulaire
mesure de ϵ [4-7 GHz]**



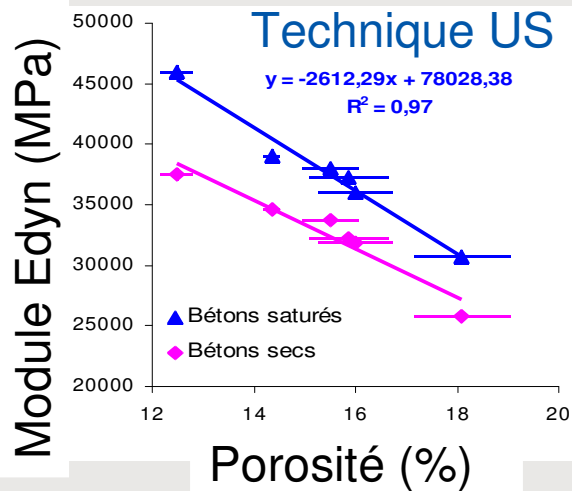
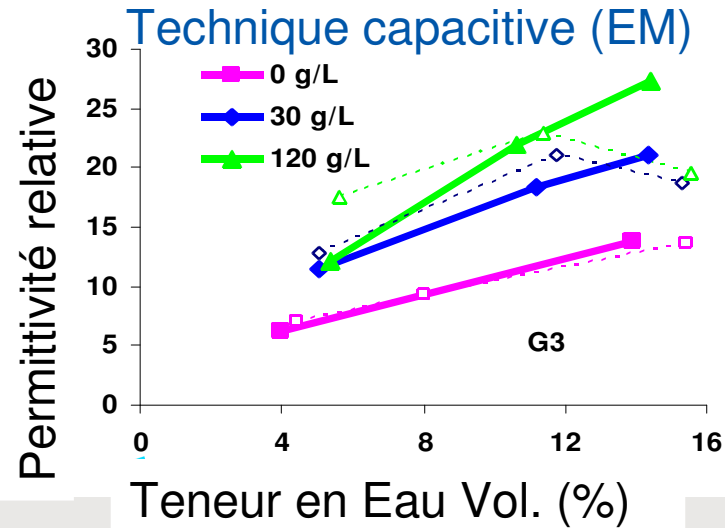
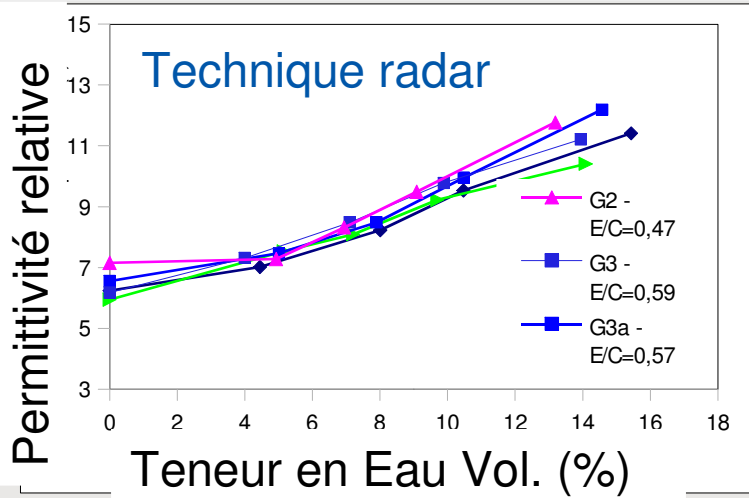
**Sonde
capacitive**



**Radar –
antenne 2 GHz
monostatique**



Exemples de mesures ND



Régressions (linéaires) :

$$\text{Mes (capacitive)} = a \text{ Poro} + b \text{ Sr} + c$$

$$\text{Mes (radar)} = a' \text{ Poro} + b' \text{ Sr} + c'$$

$$\text{Mes (US)} = a'' \text{ Poro} + b'' \text{ Sr} + c''$$



Démarche quantitative

Mesures ND sur
un mélange « inconnu » +

Régressions (linéaires) :

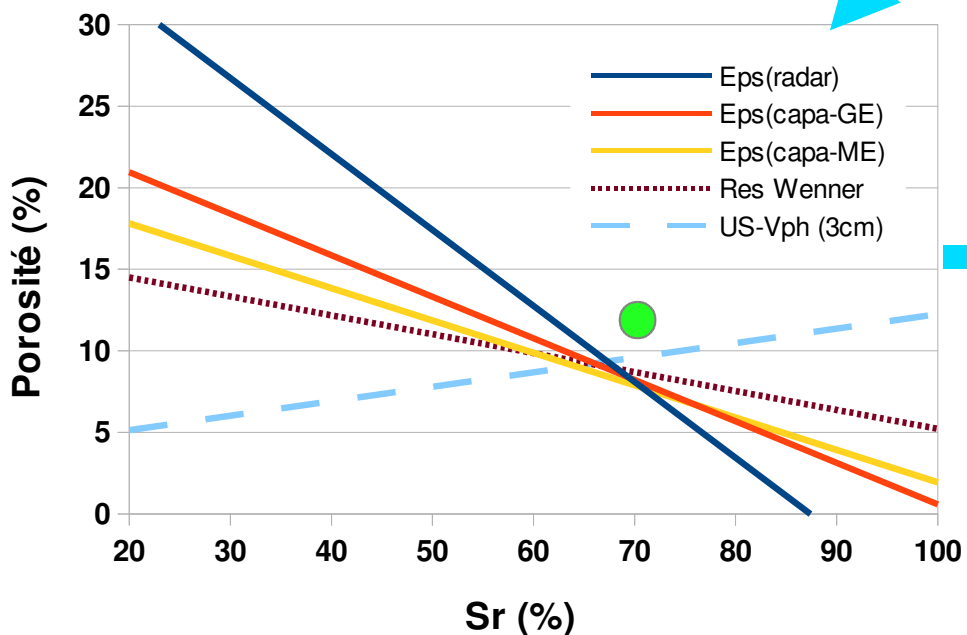
$$\text{Mes (capacitive)} = a \text{ Poro} + b \text{ Sr} + c$$

$$\text{Mes (radar)} = a' \text{ Poro} + b' \text{ Sr} + c'$$

$$\text{Mes (US)} = a'' \text{ Poro} + b'' \text{ Sr} + c''$$

Couplage / Fusion de données :

- Hyp : Homogénéité du matériau
- Hyp : Parmi les mélanges testés
-



Exemple méthodes Thermiques

Thermographie infrarouge « passive » et /ou active



Exemple méthodes IR

– Détection de défauts

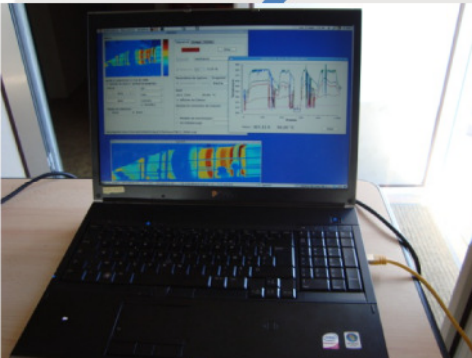
- Contrôle de structures de Génie Civil renforcées par collage de composites : Thermographie infrarouge active
 - Détection et caractérisation de zones avec manque de colle

– Caractérisation des matériaux

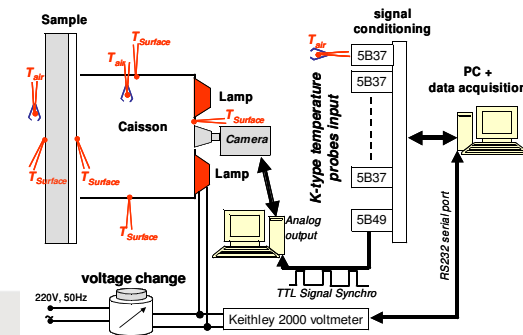
- Surveillance thermique long terme de Structures de Génie Civil en environnement naturel et sous trafic : Système de mesure avec caméra infrarouge synchronisée avec la mesure de différents paramètres environnementaux et correction temps réel des mesures
 - Identification de la conductivité thermique équivalente



Vue schématique des différents usages d'un système de Thermographie Infrarouge

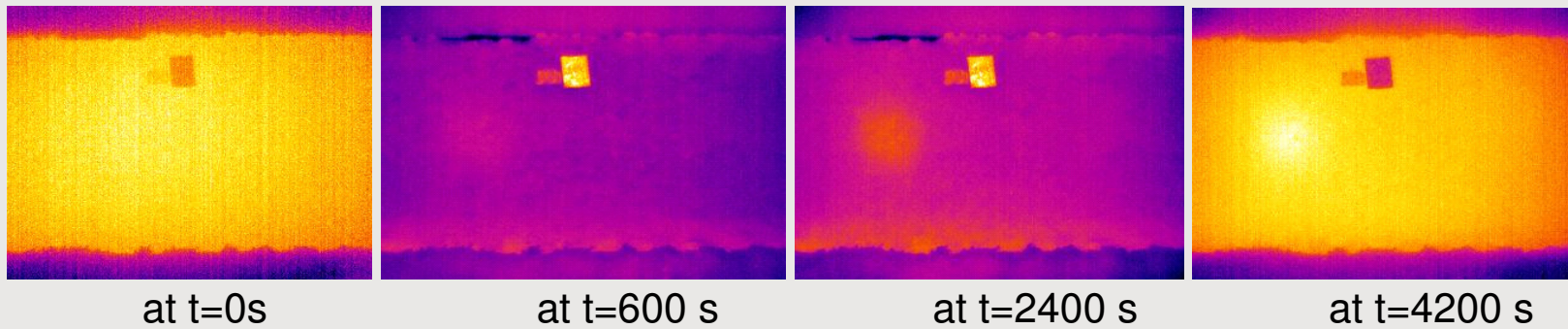


Active IRT

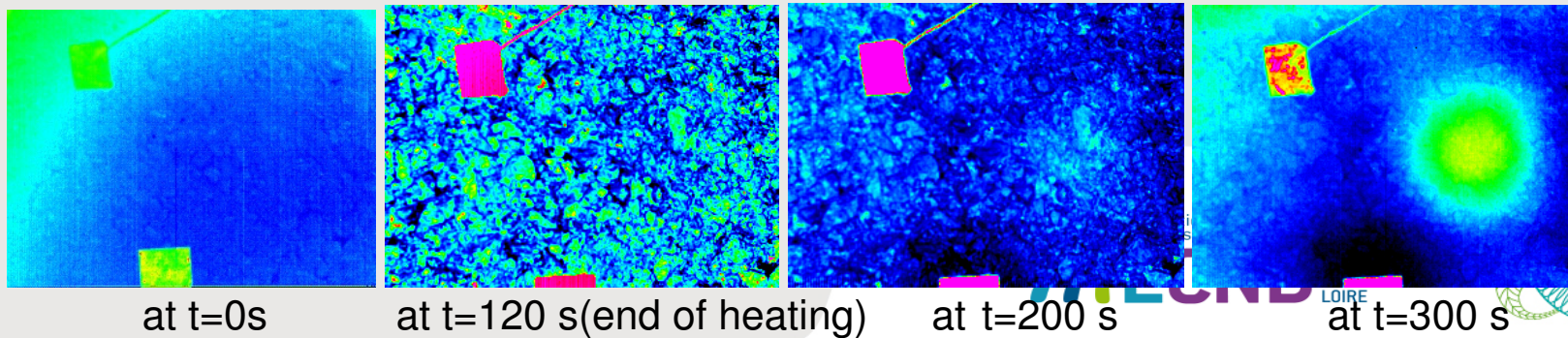


- Thermal excitation is required to generate transient heat transfer in the surveyed structure

FLIR® S65 images - heating duration 1 hour at 220 W.m⁻² - Two defects samples in wood



CEDIP® Jade III images – heating duration 1 minute at 2620 W.m⁻² - Square defect in wood

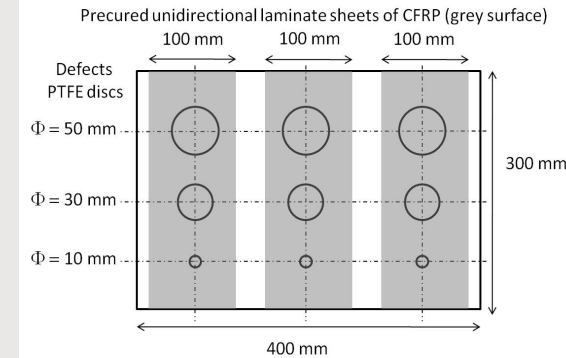
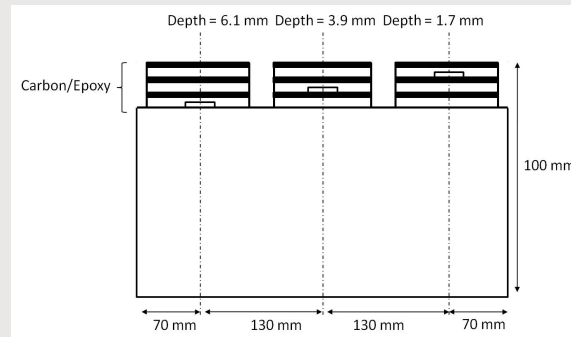


Pulse Phase Thermography (PPT)

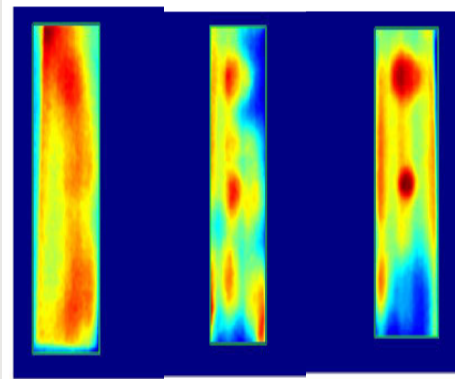
Manufactured sample



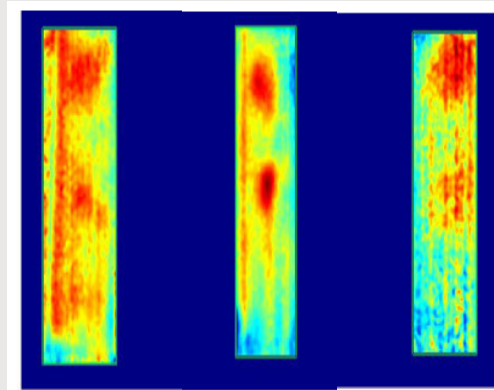
Schemes of sample main Characteristics



Magnitude map



Phase map



Fourier transform is applied to temporal evolution of each pixel of the thermal image

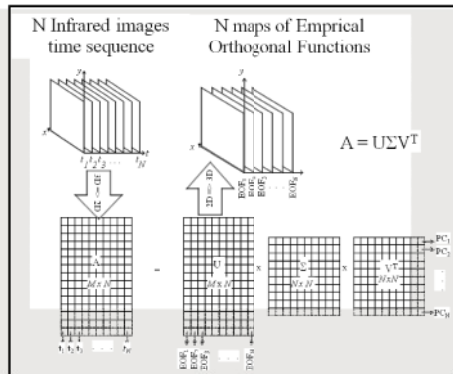
$$F_n = \Delta t \sum_{k=0}^{N-1} T(k\Delta t) \exp(-j2\pi nk/N) = Re_n + Im_n$$

Then magnitude (A_n) and phase (Φ_n) maps are calculated and analysed

$$A_n = \sqrt{Re_n^2 + Im_n^2} \quad \text{and} \quad \Phi_n = \tan^{-1} \left(\frac{Im_n}{Re_n} \right)$$

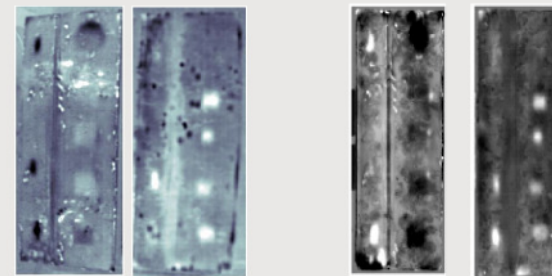
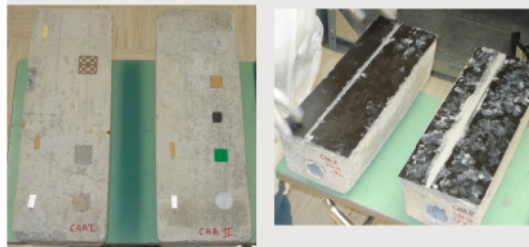
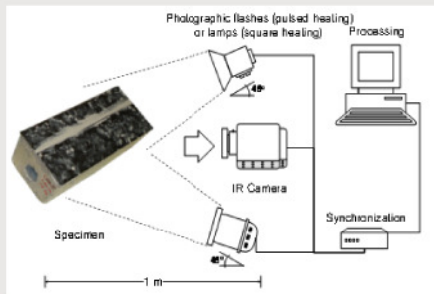


Principal Component Thermography (PCT)



Columns of **U** correspond to the EOFs associated to spatial variations
 Σ Diagonal matrix representing the singular values of matrix **A**
 Rows of **V^T** correspond to the PCs associated to time t
A Rearranged matrix of size $M \times N$

Laboratory Experiments



Pulsed

Square pulse

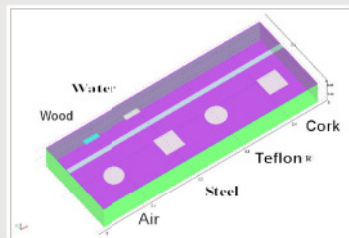
EOF maps



Pulsed

Square pulse

Thermal Modelling



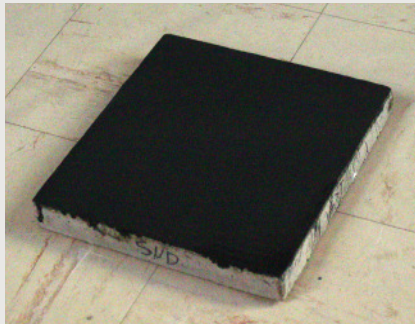
Polynomial Interpolation (Thermographic Signal Reconstruction: TSR)

Decomposition of thermal signals using polynomial interpolation allows a reduction of the whole thermal images sequence to few coefficient maps.

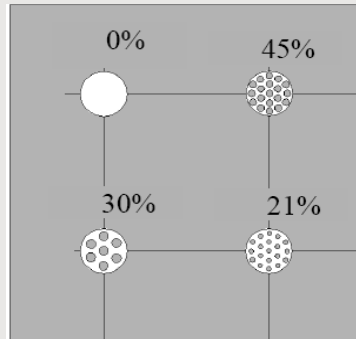
$$\ln[T(t)] = \sum_{i=0}^{i=n} a_i [\ln(t)]^i$$

Number of coefficient maps depends on the polynomial order used.

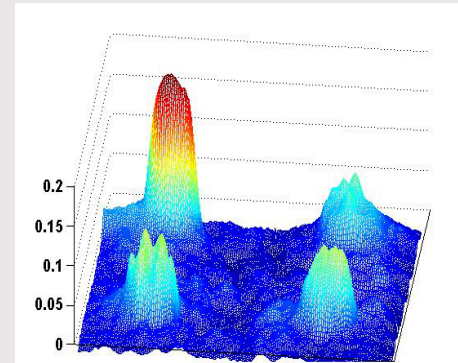
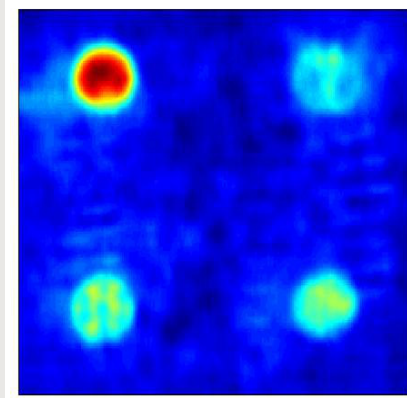
Manufactured sample



Defect's Scheme



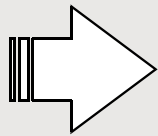
Polynomial coefficient map



Quelques modèles directs

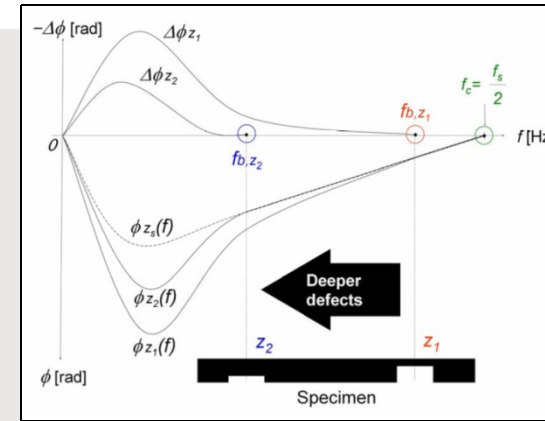
- **Fréquence aveugle fb** (Ibarra-Castanedo et al.)

Contraste de phase $\Delta\Phi = \Phi_{def} - \Phi_{sound}$



$$z_{def} = C_1 \sqrt{\frac{a}{\pi f_b}}$$

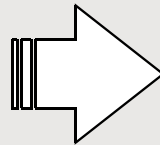
- **Créneau d'excitation thermique de durée τ** (Dumoulin et al.)
Représentation schématique



$$\begin{cases} \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} = \frac{1}{a} \frac{\partial \theta}{\partial t} \text{ avec } \theta(z, t) = T(z, t) - T_0 \\ \text{Condition initiale :} \\ t \leq 0 : \theta(z, t) = 0 \\ \text{Condition aux limites :} \\ t > 0 \text{ et } z = 0 : -k \frac{\partial \theta}{\partial z} = \varphi_0(t) \end{cases}$$

Direct model

$$\varphi_0(t) = q_0 \text{ si } t \leq \tau \text{ et } \varphi_0(t) = 0 \text{ si } t > \tau$$



$$\begin{cases} \text{si } t < \tau : \theta(0, t) = \frac{2q_0 \sqrt{t}}{b\sqrt{\pi}} \\ \text{si } t \geq \tau : \theta(0, t) = \frac{2q_0}{b\sqrt{\pi}} (\sqrt{t} - \sqrt{t - \tau}) \end{cases}$$

Estimation de la profondeur en utilisant l'approche par effusivité min

$$z_{def} = \sqrt{a} \sqrt{t_{min}} (b_{n,min})^{0.95} \text{ (Balageas et al.) avec}$$

$$b_n = \frac{b}{b_{material}}$$

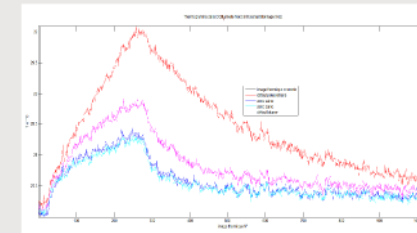
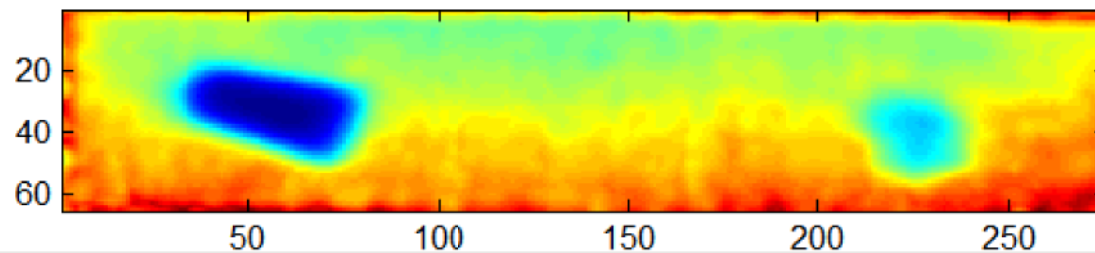


Exemple de résultats

- ◆ DCIII_t0 lamelle Nord carte des minima d'effusivité thermique

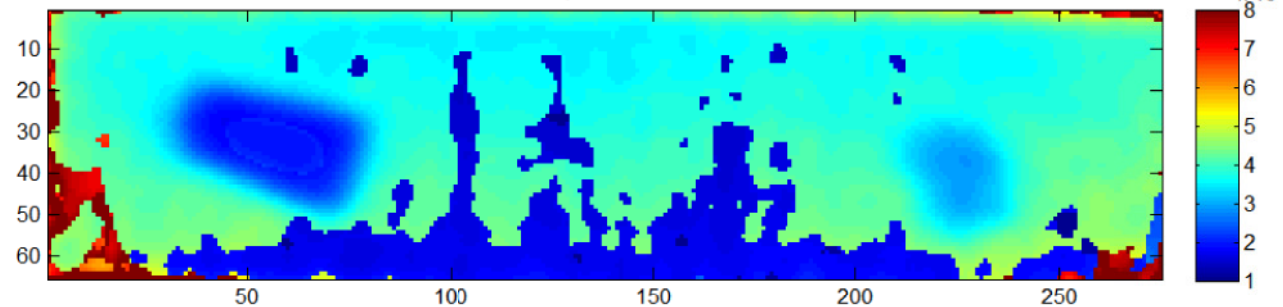


Carte des minima d'effusivité



- ◆ DCIII_t0 lamelle Nord carte des profondeurs avec modèle créneau et effusivité min

Carte des profondeurs en m



Durée créneau environ 60s

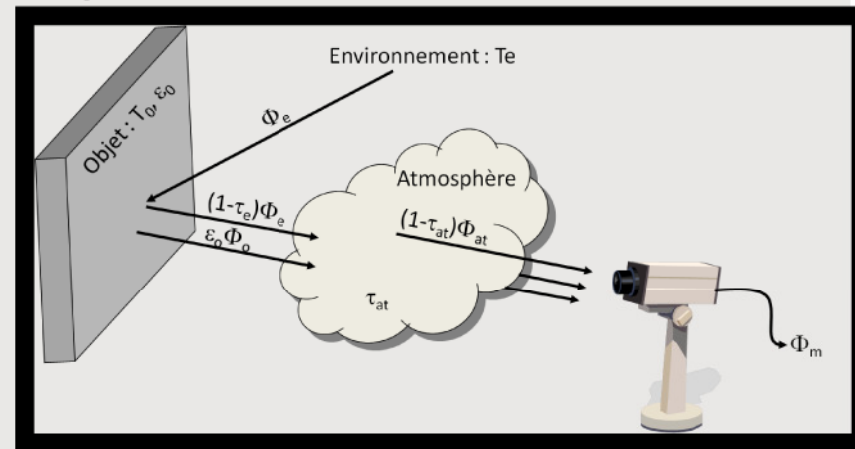
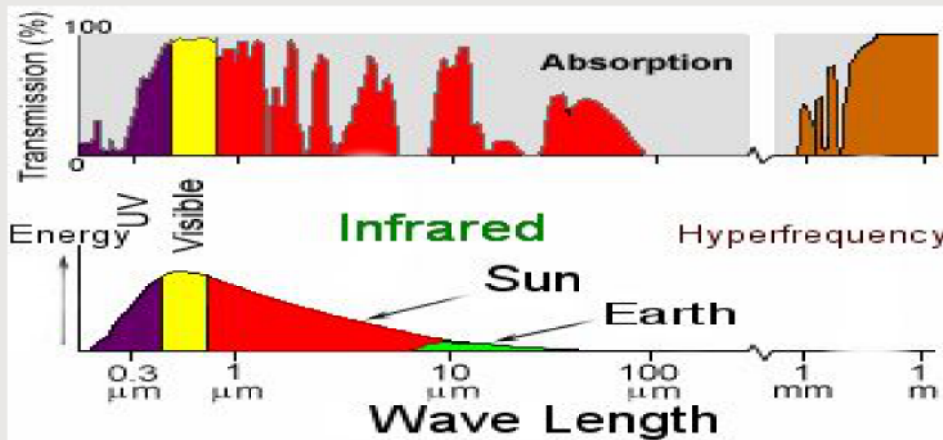
CND DE LA LOIRE



Thermographie Infrarouge en surveillance thermique long terme

Rappels

- Bande spectrale Ondes Longues (LWIR 7-14 μm) bien adaptée au monitoring de la température apparente de surface des infrastructures
- Utilisation du potentiel offert par les cartes graphiques des PC
- Système bas coût si l'on utilise des capteurs non refroidis

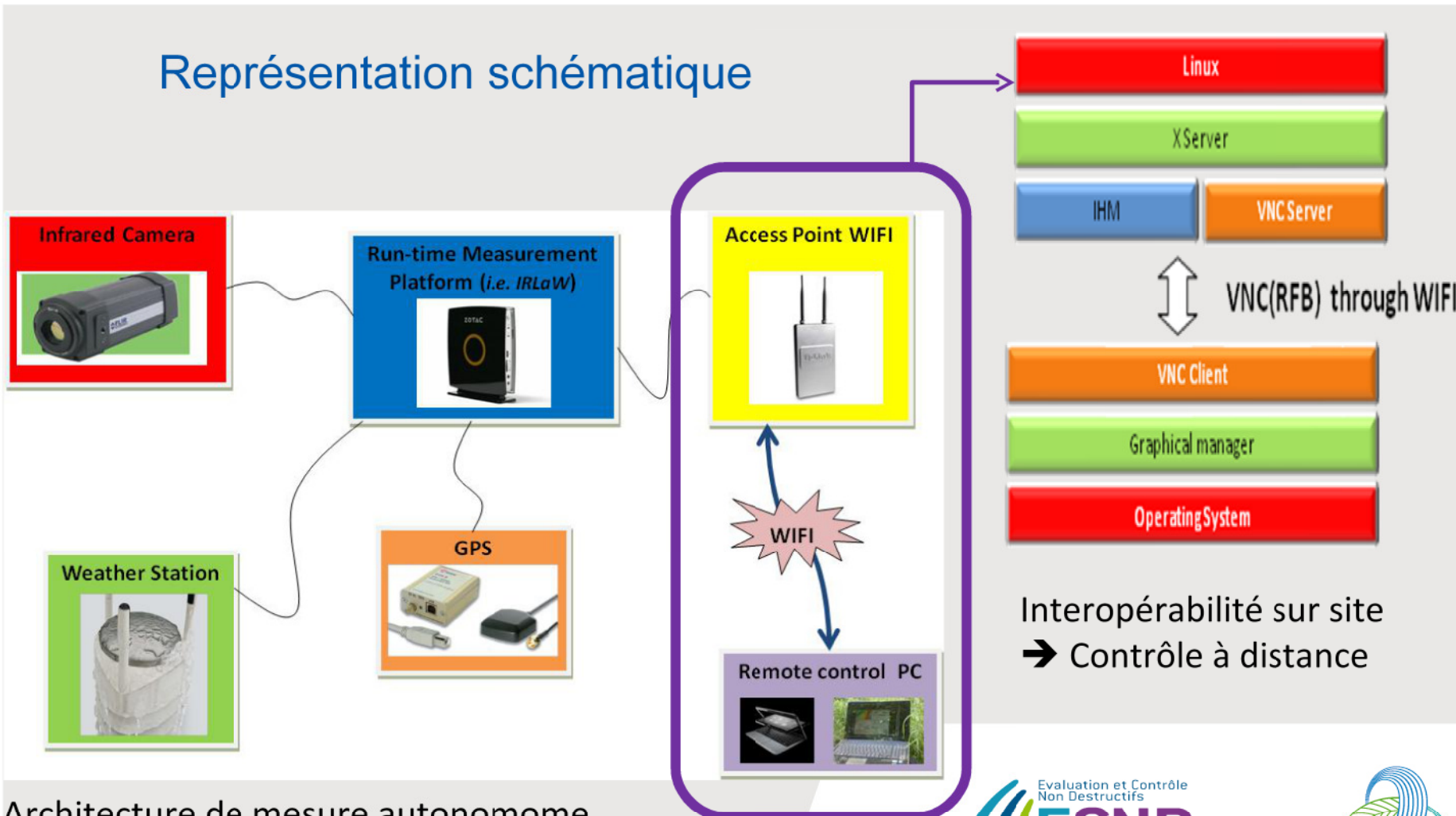


Expression du bilan radiatif simplifié au niveau du détecteur de la caméra

$$\Phi_m = \tau_{atm} \epsilon_0 \Phi_0 + \tau_{atm} (1 - \epsilon_0) \Phi_e + (1 - \tau_{atm}) \Phi_{atm}$$

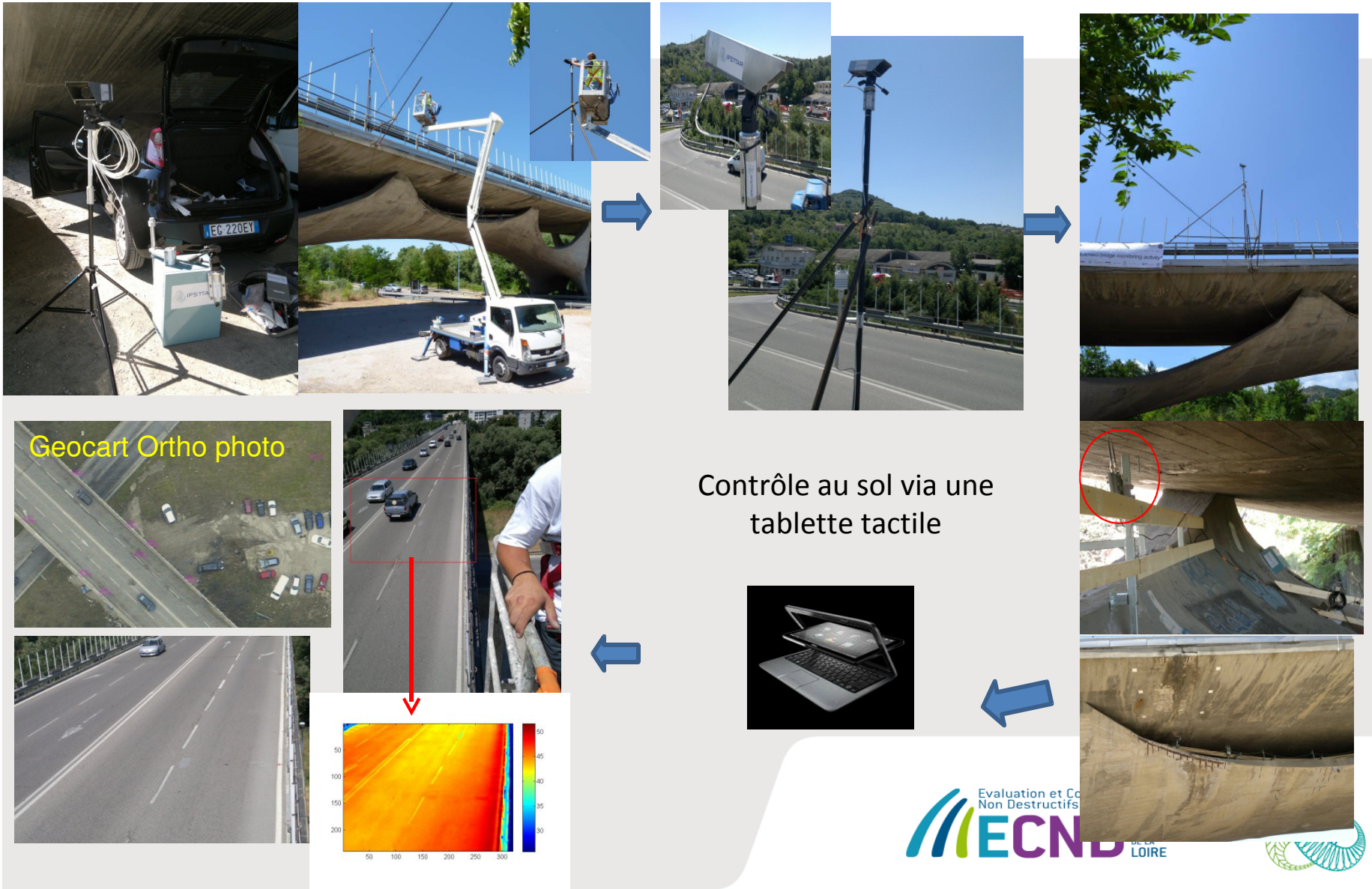
Système de mesure par ThIR développé

Représentation schématique



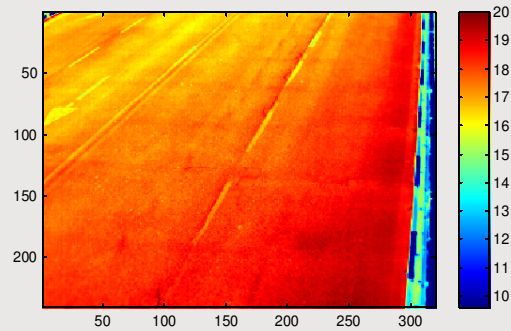
Architecture de mesure autonome

Mise en œuvre du dispositif de mesure sur site

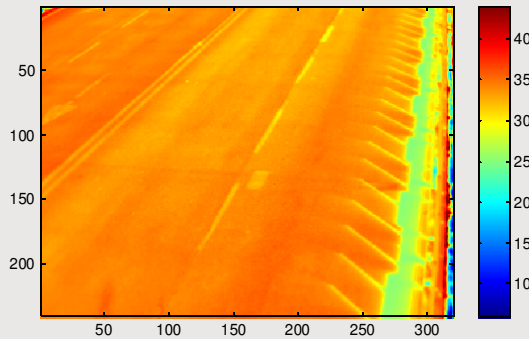


Illustrations : Images thermiques à différents instants du cycle jour-nuit

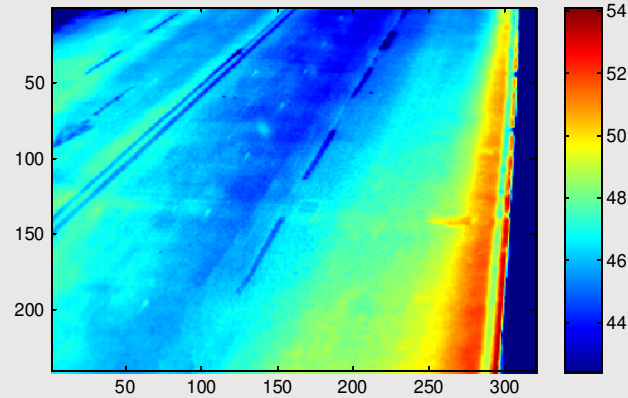
Distribution spatiale des températures de surface au niveau du tablier du pont



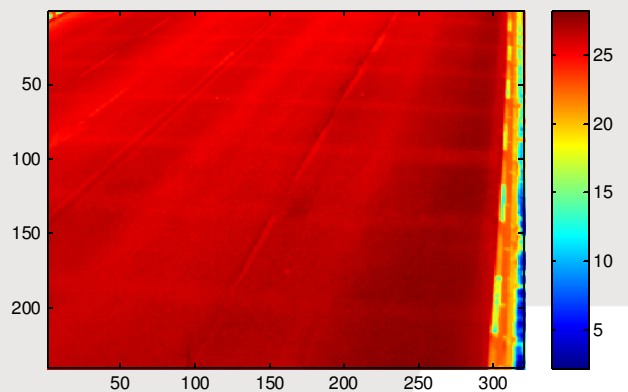
Fin de relaxation thermique



Pendant chargement thermique

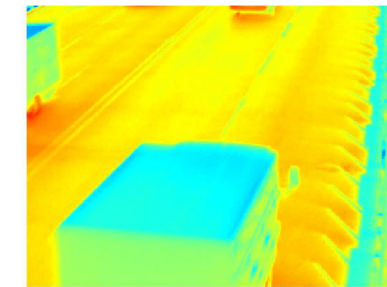
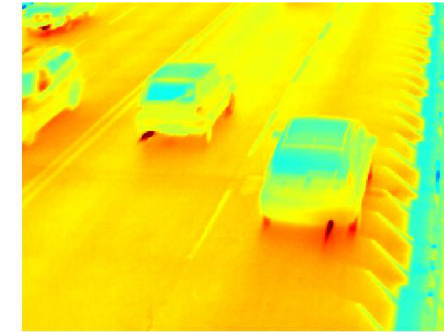


Fin de montée en température (solicitation thermique naturelle)



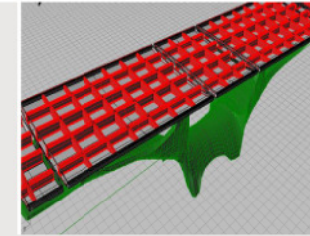
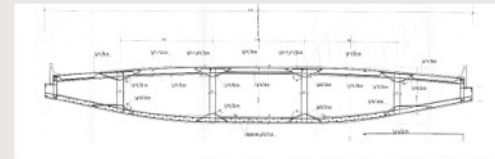
Pendant la relaxation thermique

Images IR à 5Hz

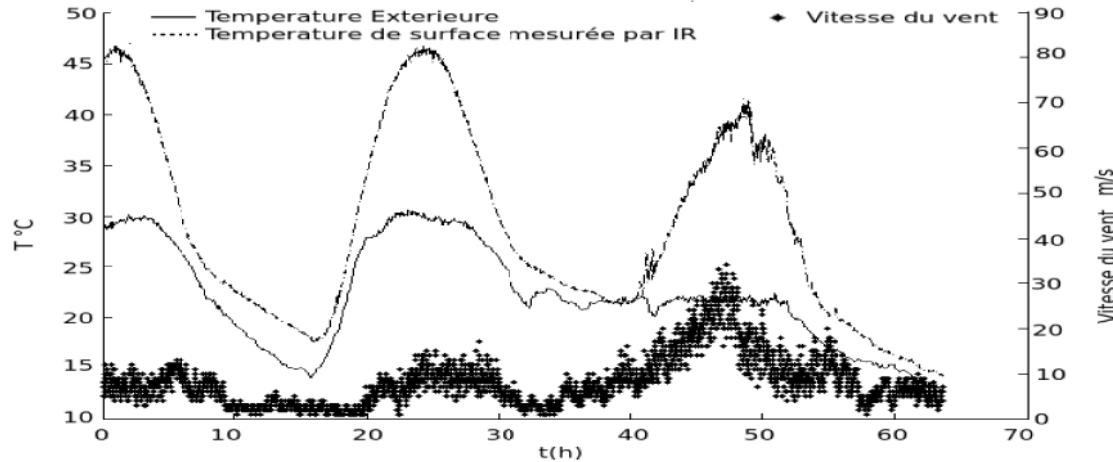


Analyse des mesures et détection de la structure interne du tablier

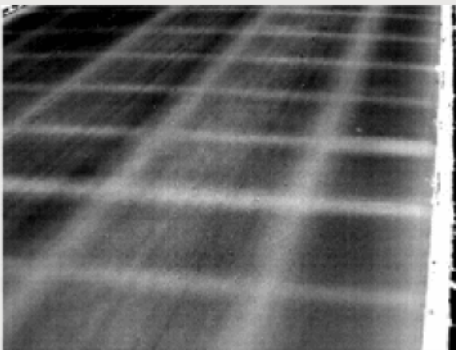
Le tablier est revêtu par 13 cm de Béton Bitumineux



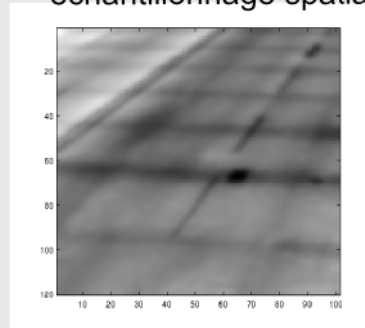
Carte des conductivités thermiques équivalentes : premiers résultats



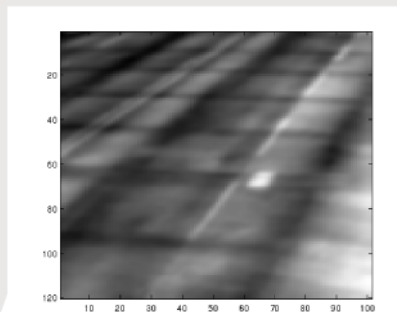
SVD - EOF



FFT – amplitude
avec sous échantillonnage spatial



FFT – phase
avec sous échantillonnage spatial



Conclusions

- **Sans contact, plein champ** → **grand rendement, bas coût, plein champ**
- **Contraintes de mise en œuvre dans le Génie Civil**
 - accessibilité réduite (une face, grande hauteur, etc.)
 - conditions environnementales (T °C, HR, ...)
 - coût
 - auscultation sous trafic
- **Multiples techniques :**
 - ondes mécaniques (propriétés mécaniques...)
 - ondes électromagnétiques (teneur en eau, ions, propriétés thermiques...)
 - Couplage de méthodes



Perspectives

- **Les futures avancées (CND sans contact)**
 - Réseau de détecteurs
 - Couplage satellitaire/aéroporté + mesures locales,
 - Capteurs intégrés, sans fils, intelligents, mesures géo-référencées ...
 - Robotisation, automatisation
 - Fusion de données
- **Les manifestations internationales à venir sur Nantes**
 - IWAGPR 2013 (www.iwagpr2013.ifsttar.fr)
 - EWSHM 2014 (www.ewshm2014.com)



Contacts (liste non exhaustive) ...

Sols naturels et remaniés (Digues...)

Géophysique, densité et eau dans les sols

sergio.lopes@ifsttar.fr

Chaussées

Déflexion, Traitement automatisé radar

jean-michel.simonin@ifsttar.fr

Béton armé et précontraint

Auscultation par méthodes électromagnétiques

xavier.derobert@ifsttar.fr

Auscultation par méthodes infra-rouges

jean.dumoulin@ifsttar.fr

Corrosion, fatigue des câbles et armatures

laurent.gaillet@ifsttar.fr

Auscultation par ondes mécaniques

odile.abraham@ifsttar.fr

Modélisation ondes guidées (couches, câbles)

laurent.laguerre@ifsttar.fr

SHM, réseau de capteurs sans fil

vincent.le-cam@ifsttar.fr

Auscultation ND et durabilité du béton BA, BP

geraldine.villain@ifsttar.fr



Merci pour votre attention

Ifsttar

14-20 Bld. Newton

Cité Descartes

Champs sur Marne

77447 Marne-la-Vallée Cedex 2

France

Tél. +33 (0)1 81 66 80 00

www.ifsttar.fr

prenom.nom@ifsttar.fr

Ifsttar

CS4

Route de Bouaye

44344 Bouguenais Cedex

France

