



Auscultation par thermographie infrarouge des ouvrages routiers

Jean Dumoulin (LCPC)

Mario Marchetti (LRPC Nancy)

Frédéric Taillade (LCPC)

Chantal de la Roche (LCPC)

Christophe Aubagnac (LRPC Autun)

- ◆ Besoin de méthodes à grand rendement pour l'auscultation des ouvrages
 - Évaluation de l'intégrité des chapes d'étanchéité sur ouvrages d'art en service (par méthodes non-destructives) au cœur des priorités du SETRA et des gestionnaires
 - Contrôle du collage lors d'un renforcement par composites sur des éléments d'ouvrages en béton
 - Évaluation de l'état des chaussées avant apparition des désordres en surface afin de réduire les coûts pour le gestionnaire et l'utilisateur
 - Suivi de l'exécution de chantier utilisant des techniques d'enrobé à chaud
- ◆ Contribution au suivi d'essais destructifs réalisés en laboratoire sur des matériaux de chaussées : ornièreur, machine de fatigue en flexion, machine de fatigue en cisaillement, machine de test d'arrachement (Triboroute)

Travaux conduits

- ◆ Simulations numériques couplées à des essais en laboratoire ou sur des sites tests comportant des défauts connus
- ◆ Etude par ThIR active ou passive avec différentes caméras :
 - Caméras CEDIP® en Bande II (MWIR)
 - Caméras FLIR® en Bande III (LWIR)
- ◆ Essais sur sites réels
- ◆ L'approche par ThIR active ou passive est complémentaire d'autres approches : Radar, Impact Echo ...
- ◆ Collaborations :
 - LAMTI – Université d'Artois : Domaine d'application Ouvrages d'Art
 - CERTES – Université Paris XII : Domaine d'application Chaussées
 - PolyTech'Nantes : Domaine du traitement du signal et de l'image

Position du Problème : Domaine des Ouvrages d'Art

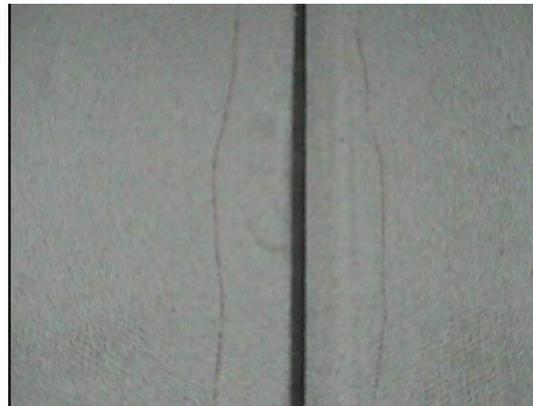


relief trop important sur le renformis béton bitumineux

Vue d'un chantier



décollement du feuilard de bitume

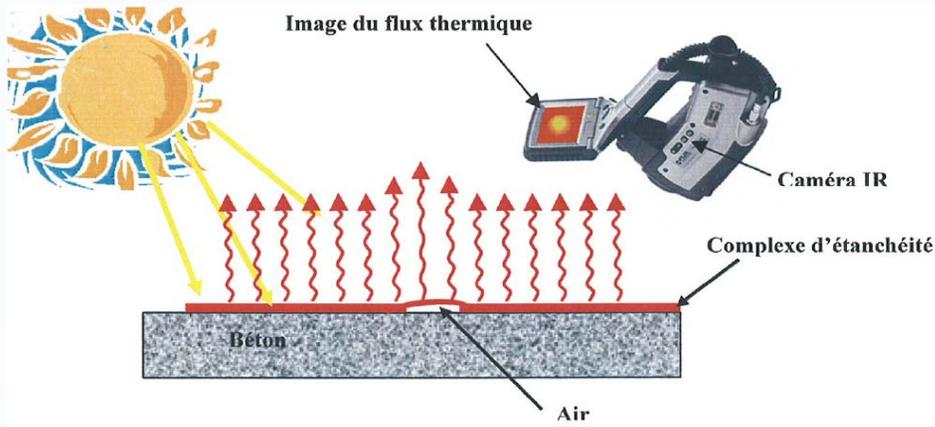


non chevauchement de feuilards contigus

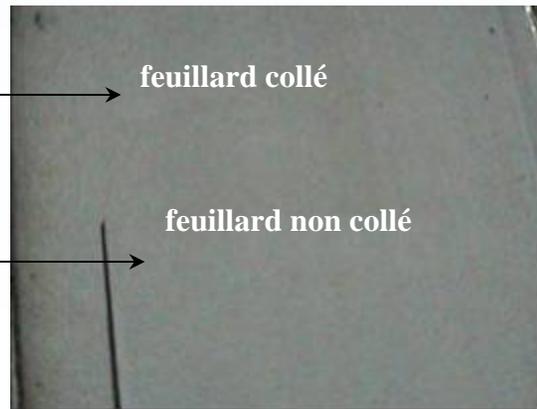
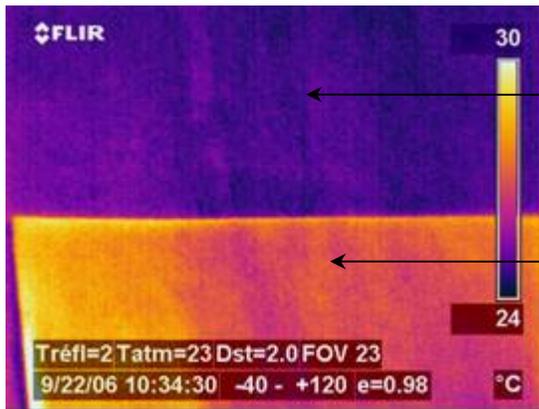


décollement en bord de feuilard

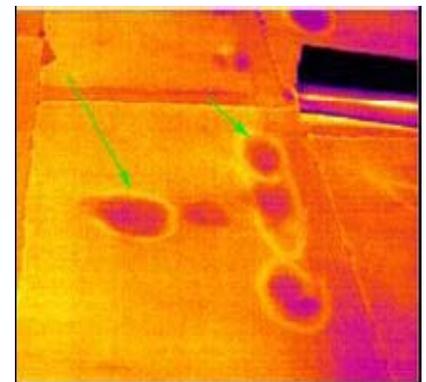
Défauts en bord de feuilard et au niveau de la structure support



Mesures en conditions naturelles

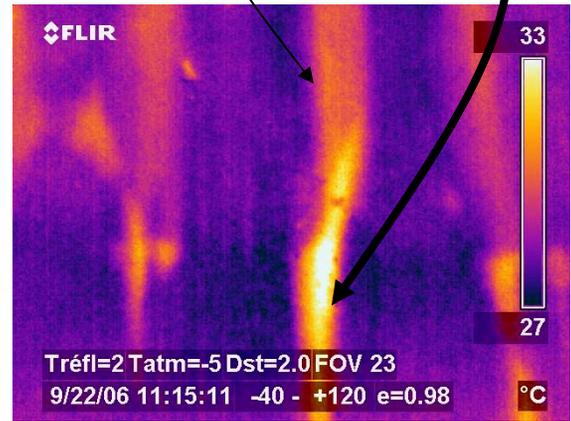
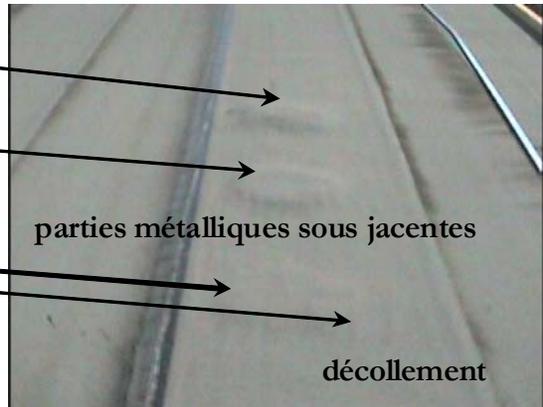
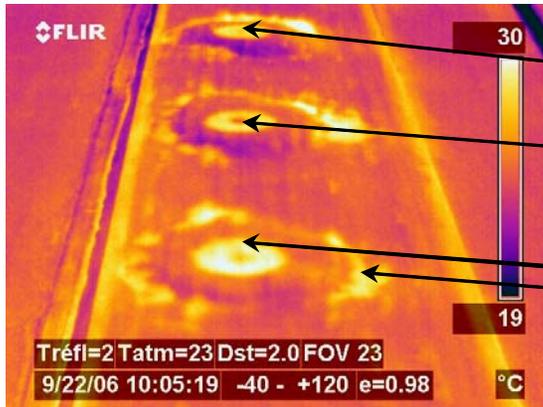
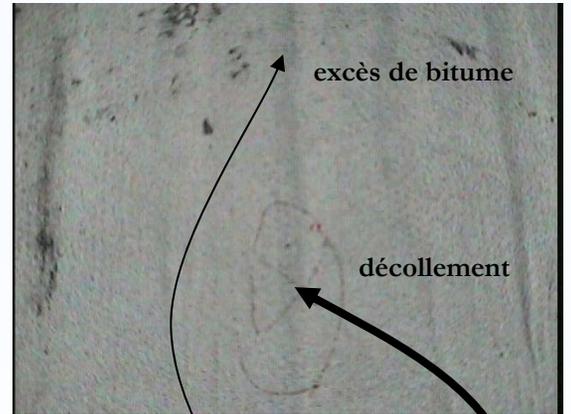
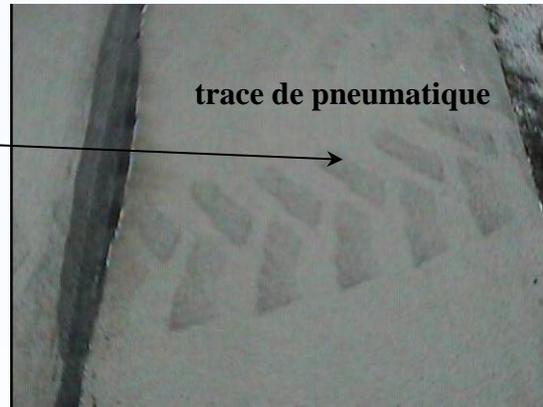
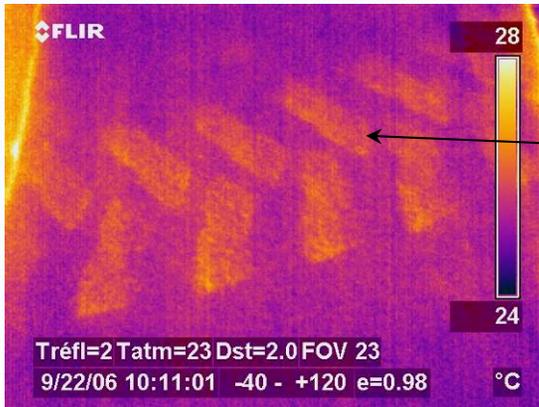


feuillard de bitume sain, et autre posé et non collé



Illustrations sur
Ouvrage Réel

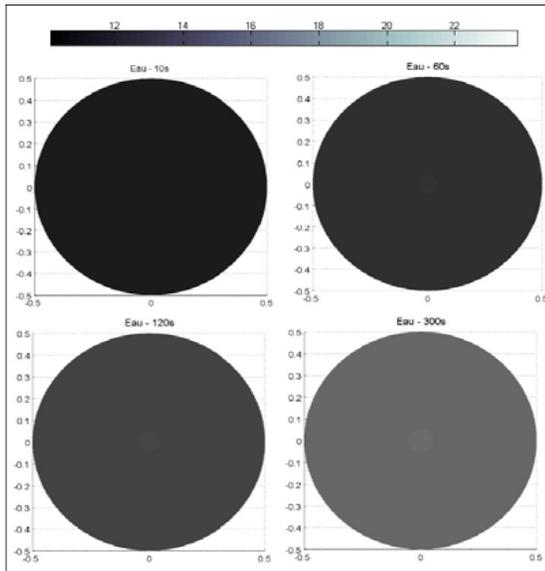
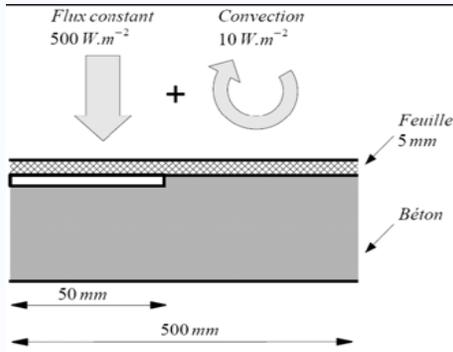
Exemples sur Ouvrages d'Art



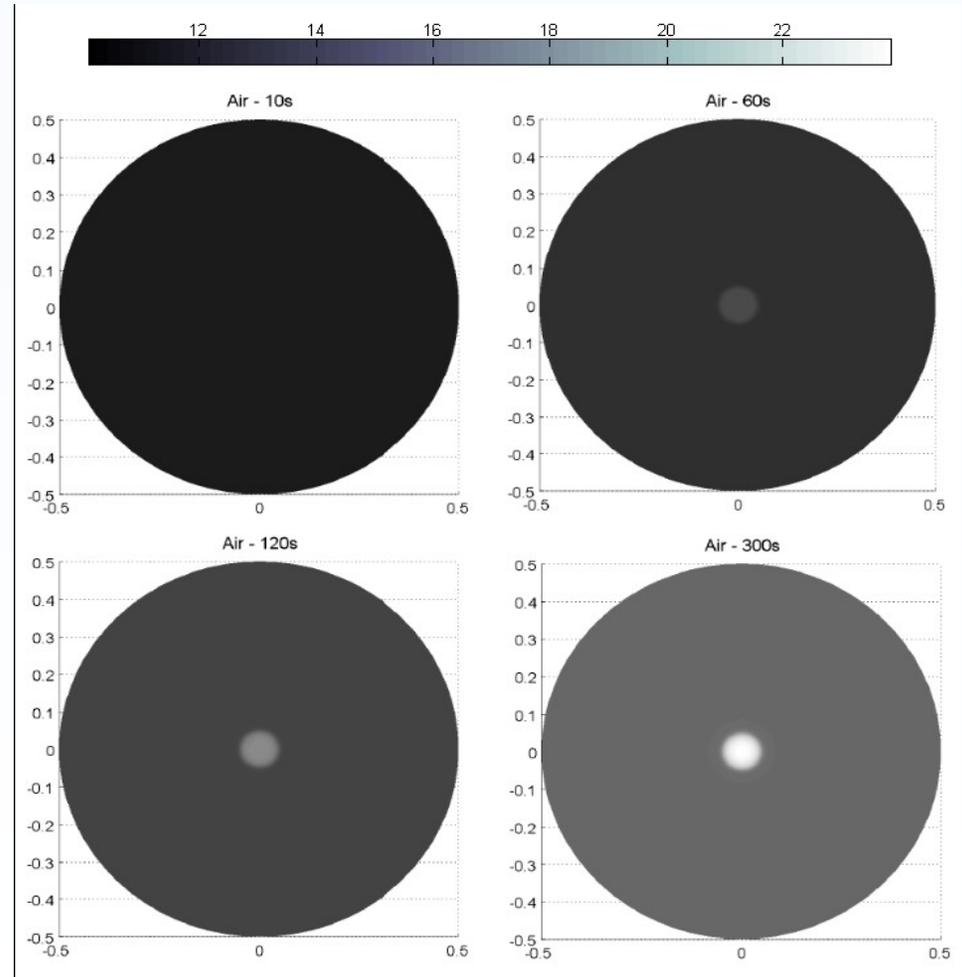
Modélisation des défauts

- Modélisation du comportement thermique des complexes d'étanchéité: étude paramétrique sur l'influence des défauts d'étanchéité sur la signature thermique d'un tablier
- Défauts testés
 - Décollement (pellicule d'eau ou d'air)
 - Humidité dans le béton support
- Variables
 - Épaisseur d'enrobé
 - Taille du défauts
 - Épaisseur du défaut

Modélisation des défauts

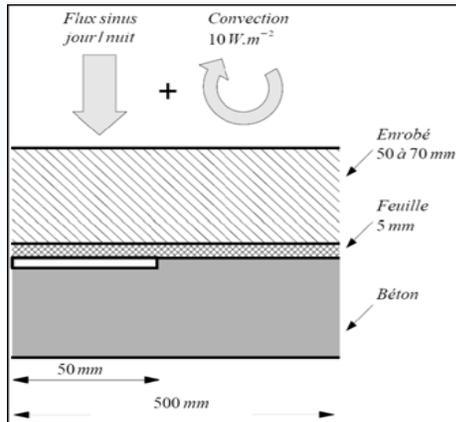


Évolution de la température de surface à des temps différents pour un modèle sans enrobé et un défaut de type eau

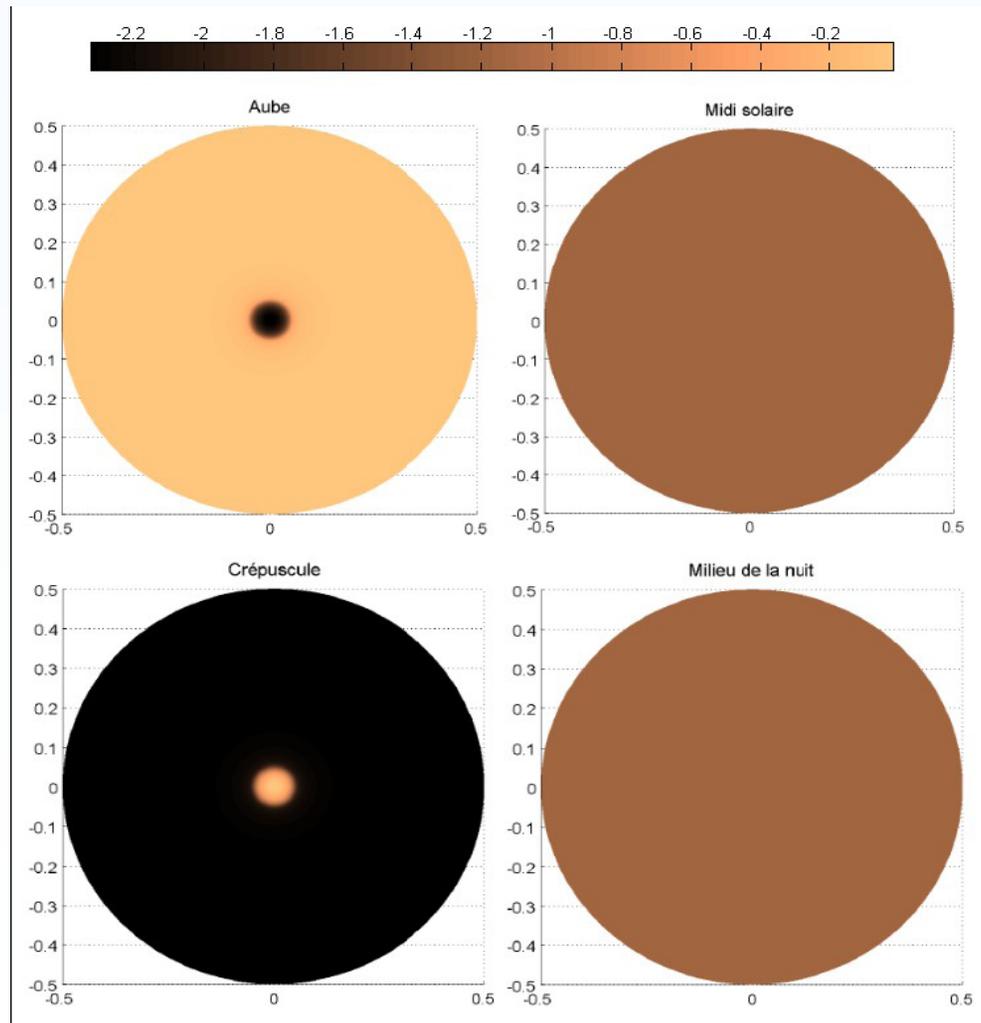


Évolution de la température de surface à des temps différents pour un modèle sans enrobé et un défaut de type air

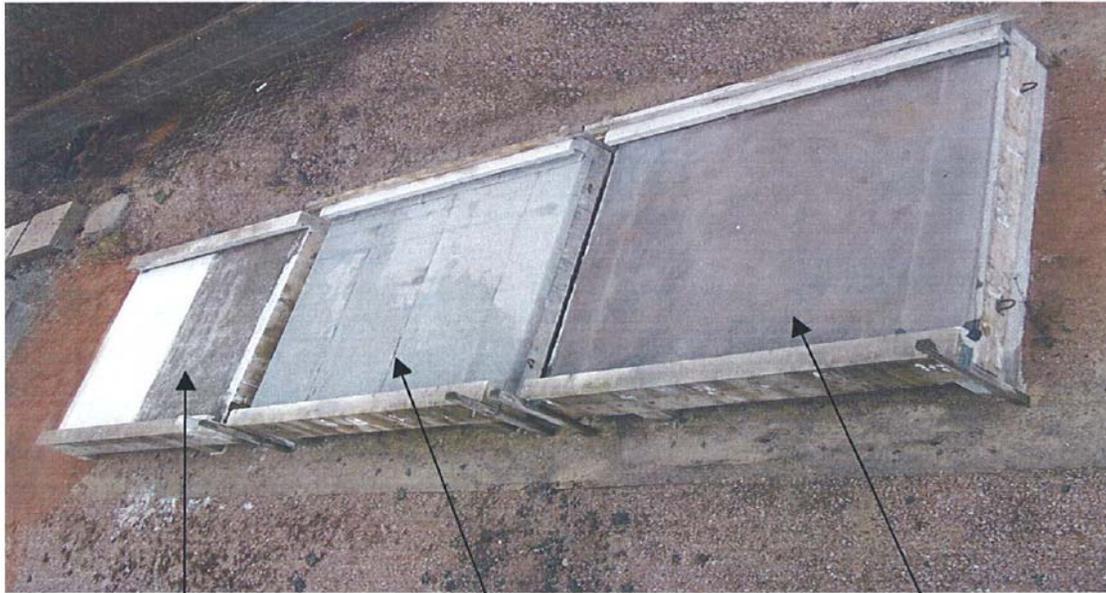
Modélisation des défauts



Évolution de la température de surface à des temps différents pour un modèle avec enrobé de 50mm et un défaut de type air



Site test de Margenne : Dalles avec défauts connus



Dalle n° 3

Dalle n° 2

Dalle n° 1

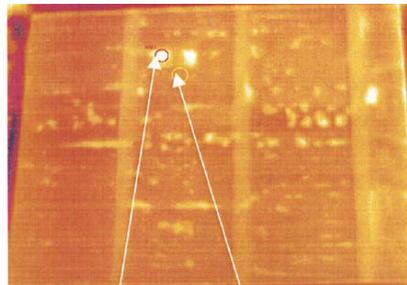
Film mince adhérent

Feuille préfabriquée monocouche

Bicouche asphalte

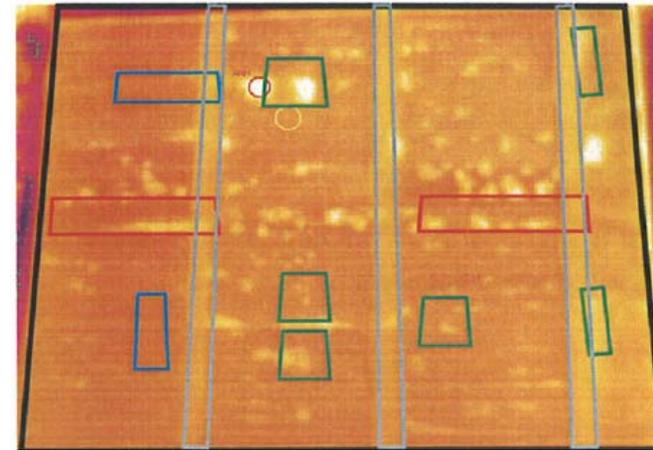


Cliché visible dalle N°2



Zone 1 « gonfle » Zone 2 « saine »

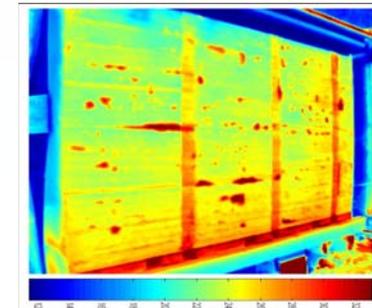
Cliché IR bande III dalle N°2



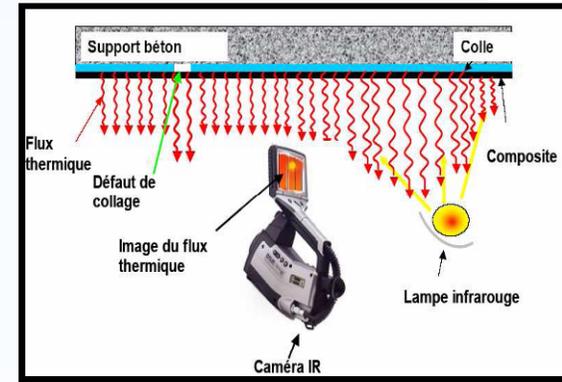
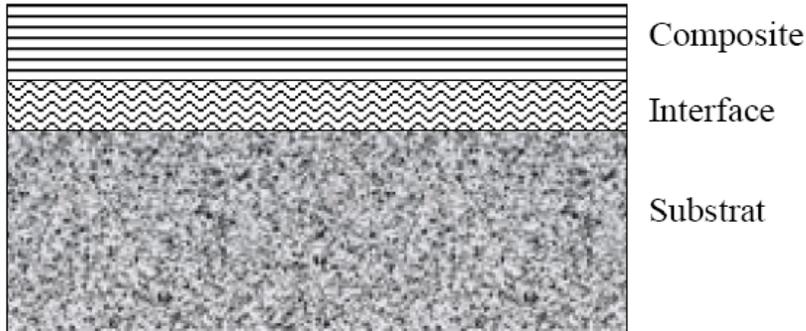
Défauts d'adhérence
Produit surchauffé
Poinçonnement



Positionnement des défauts sur
cliché IR Bande III de la dalle N°2



Cliché IR bande II dalle N°2

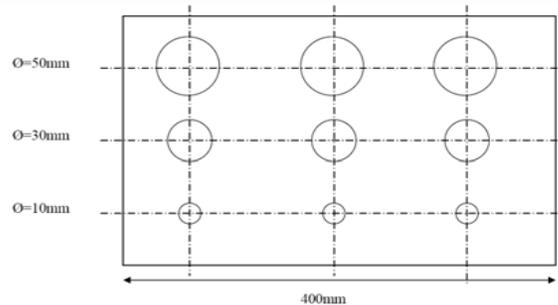


Vue en coupe au niveau de la structure réparée

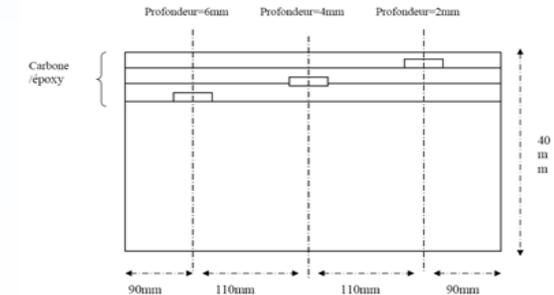
Schéma de principe de l'essai par ThIR active



Exemple de poutre renforcée



Vue en Plan

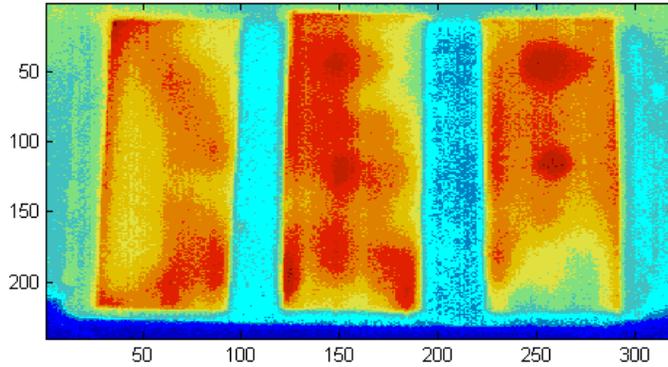


Vue en Coupe Longitudinale

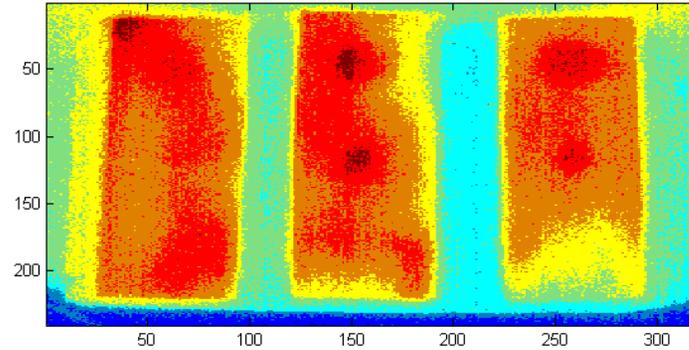
Dalle comportant différents défauts réalisée pour des essais en laboratoire

Cartes de contraste : Essais en laboratoire sur dalle réparée

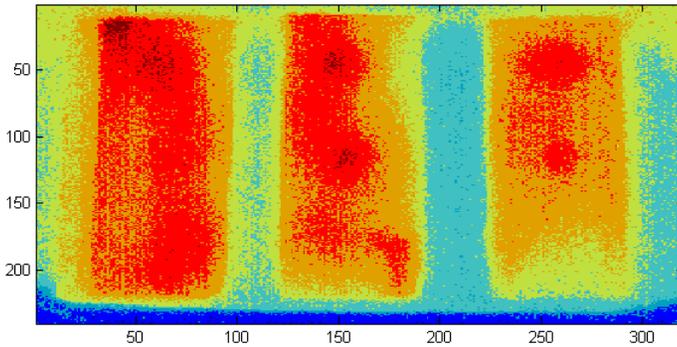
Carte de contraste à t=50s



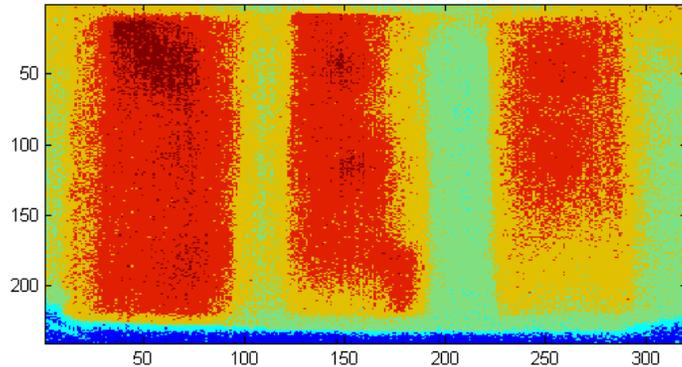
Carte de contraste à t=300 s



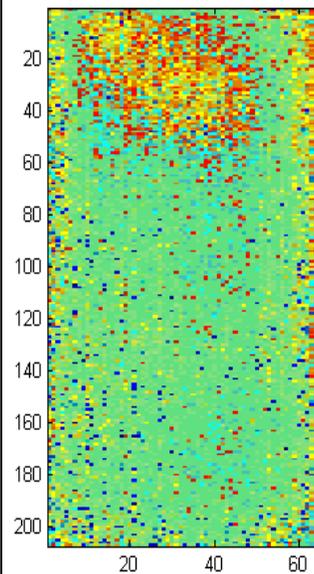
Carte de contraste à t=500 s



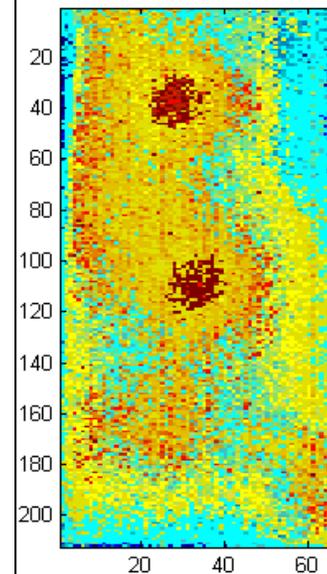
Carte de contraste à t=700 s



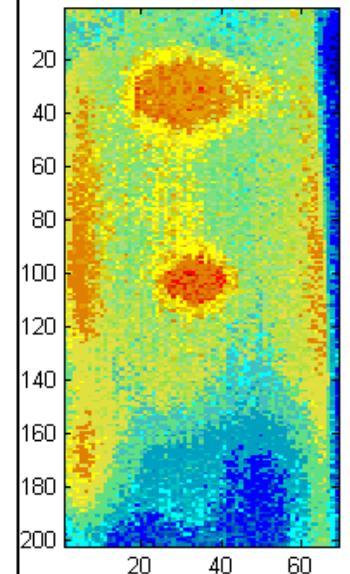
Carte de contraste gauche à t=900 s



Carte de contraste milieu à t= 300 s



Carte Contraste Bd Droite à t=50 s

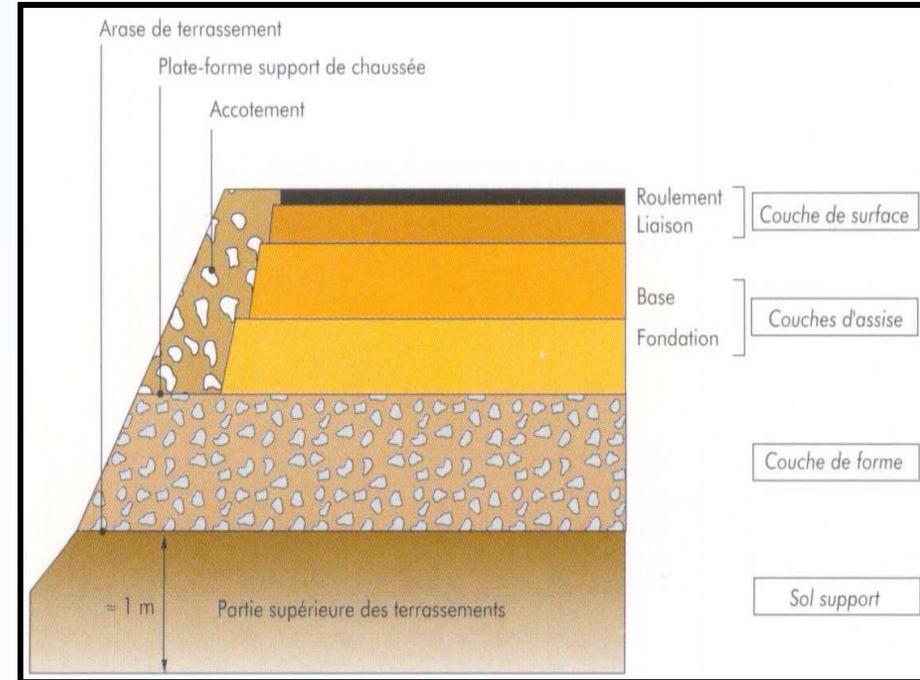


Carottages présentant des décollements

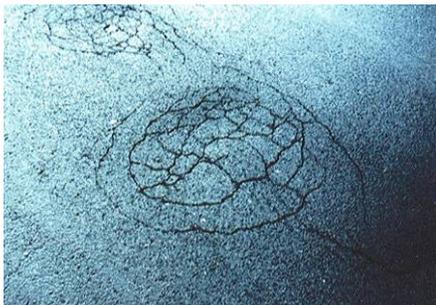


Structure mixte

Structure bitumineuse
épaisse

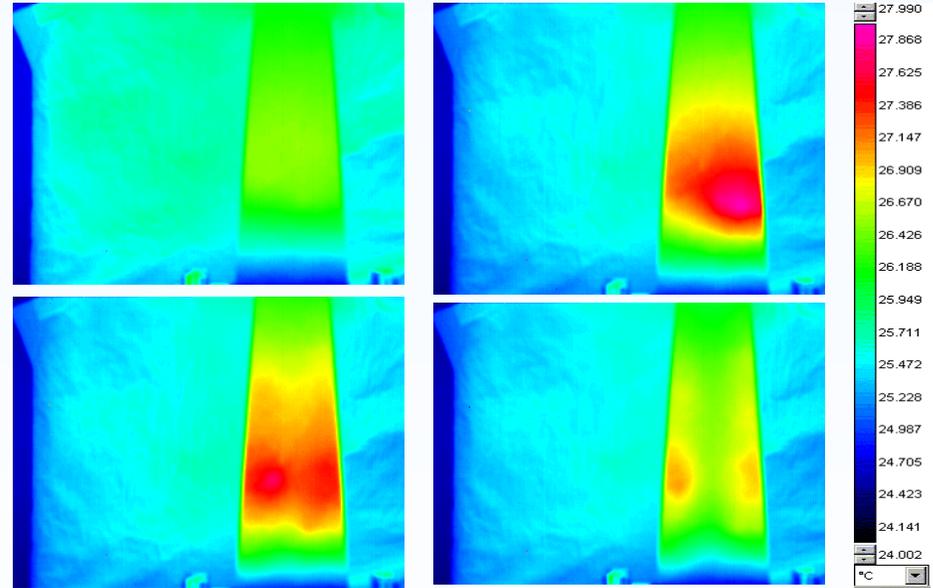
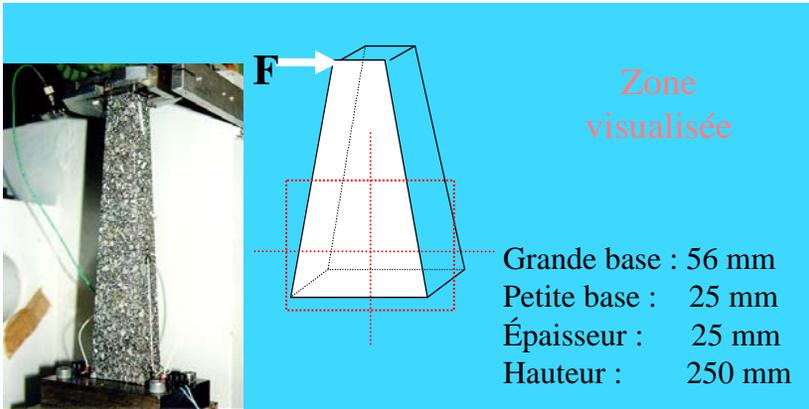


Coupe schématique d'une structure de chaussée
(Extrait du guide technique SETRA-LCPC sur la conception et le dimensionnement des structures de chaussées)

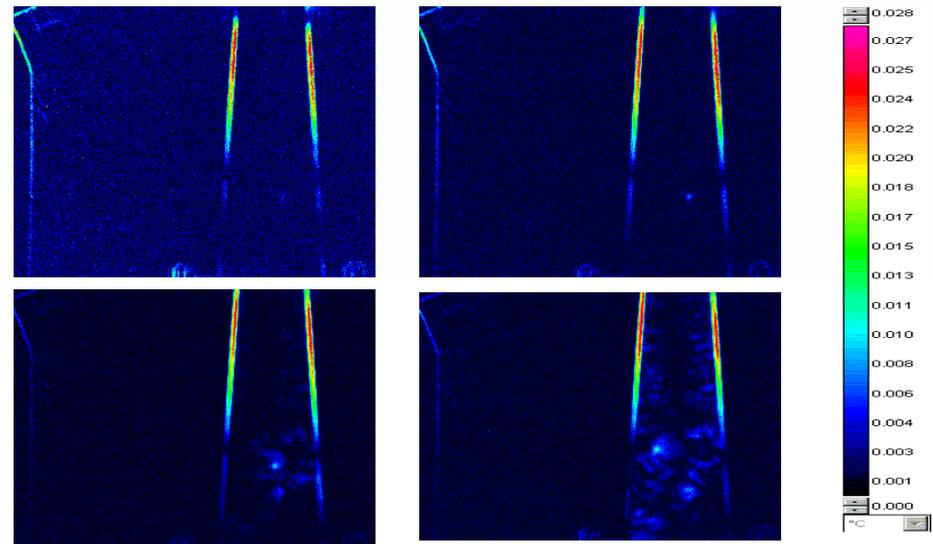
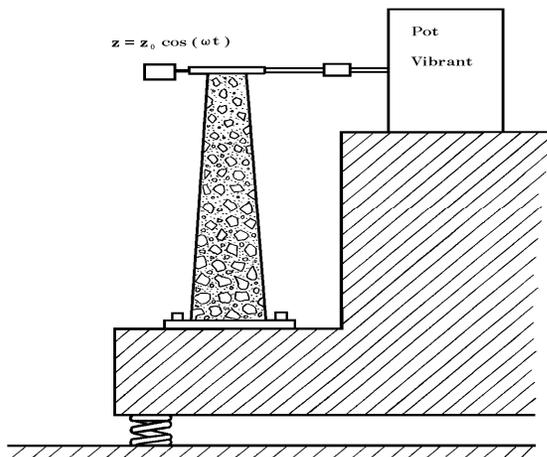


Faïençage circulaire pouvant être dû à un défaut de collage
(Exemple extrait de la méthode d'essai LPC N°52 : Catalogue des dégradations de surface des chaussées)

Éprouvette de flexion

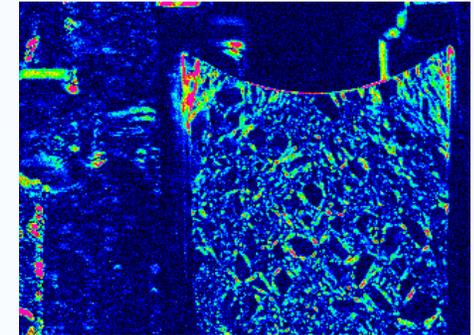
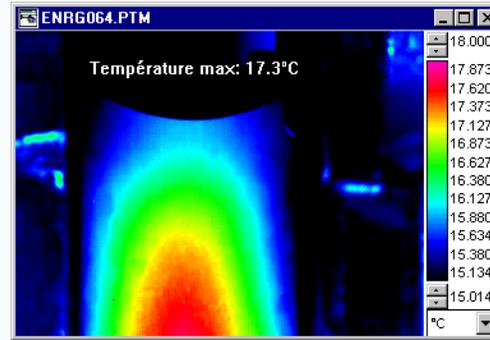
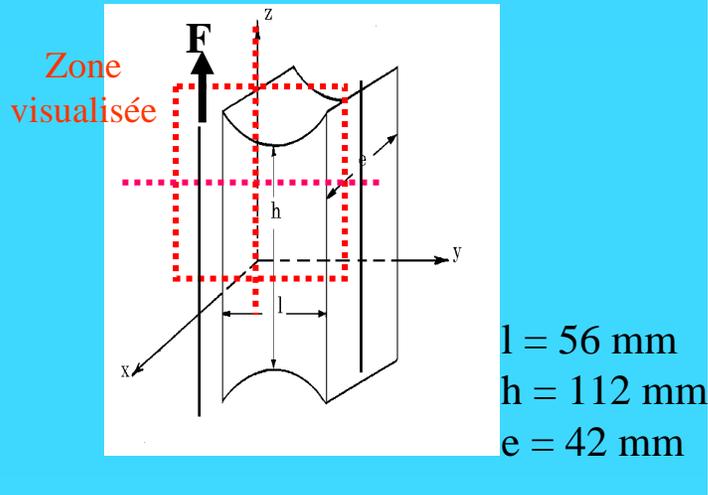


Conditionnement



Images démodulées

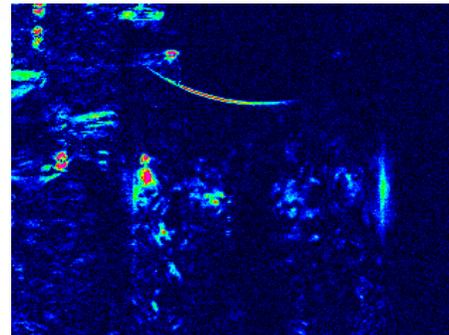
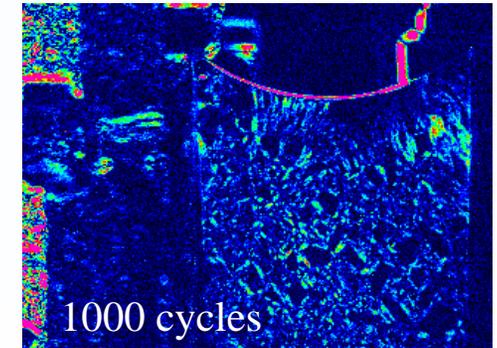
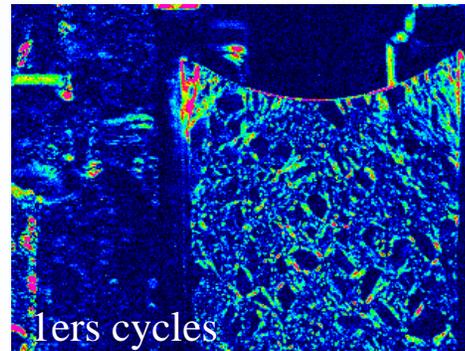
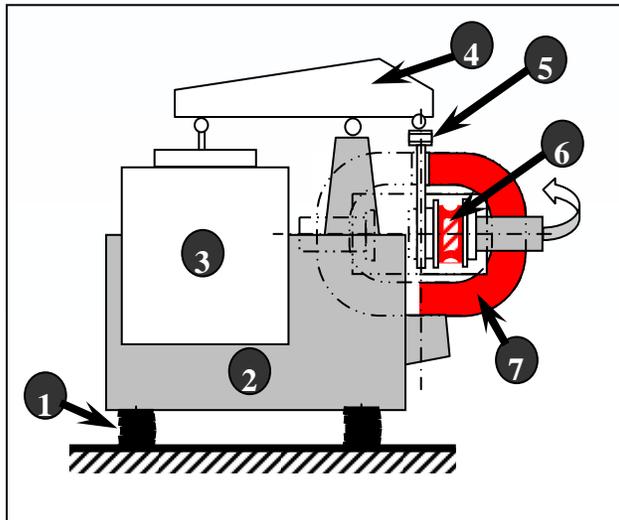
Éprouvette de cisaillement



Images moyennées
delta T_{\max} : 3°C

Images démodulées
delta T_{\max} : 0.05°C

Machine de cisaillement



Détection de défauts en sous face d'échantillons en Béton Bitumineux

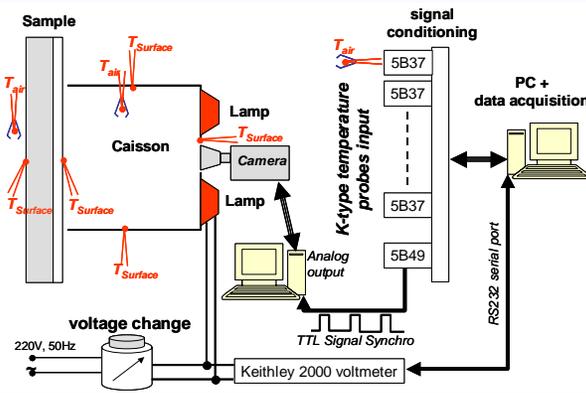
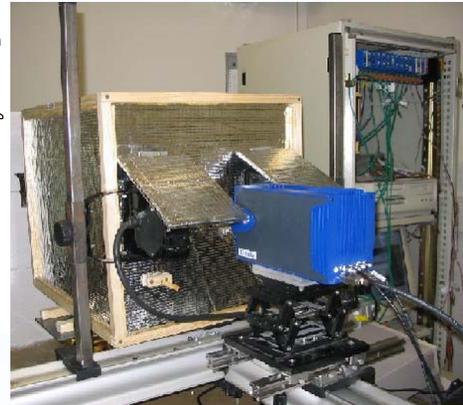
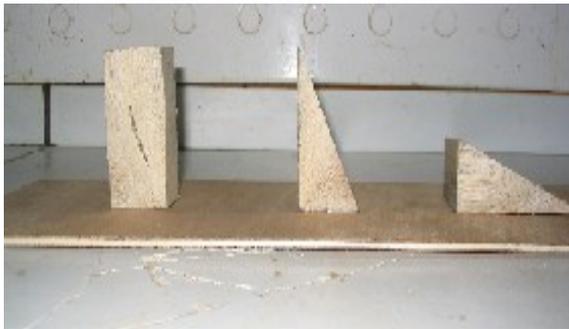


Schéma de principe



Dispositif expérimental

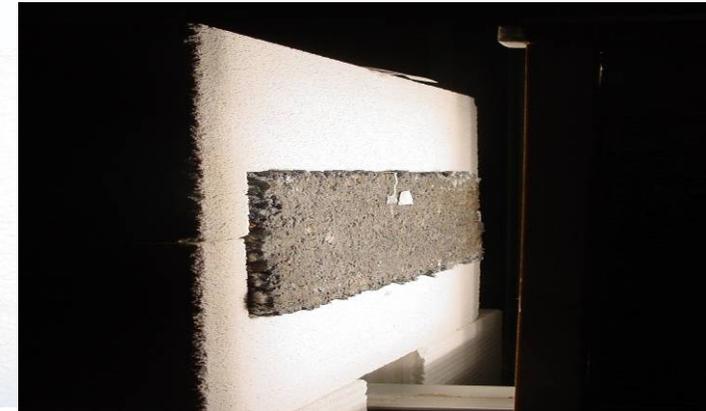
- Deux natures de défauts air ou bois
- Échantillons parallélépipédiques de 10 cm x 18 cm x 50 cm
- Défauts de formes parallélépipédiques ou pyramidales localisés de 1.3 cm jusqu'à 6 cm sous la surface
- Espacement entre défauts suffisant pour éviter des interactions entre les signatures thermiques lors des essais



Géométrie des défauts en bois

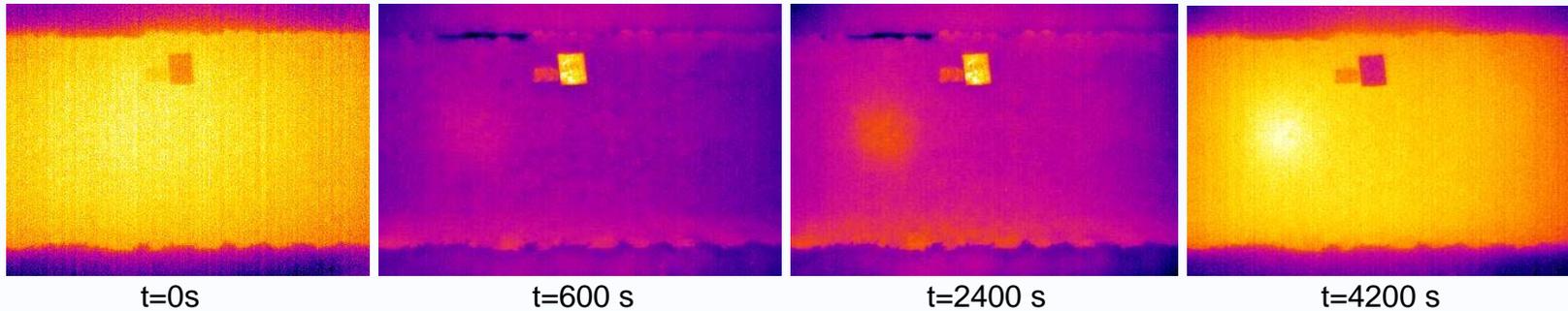


Face arrière

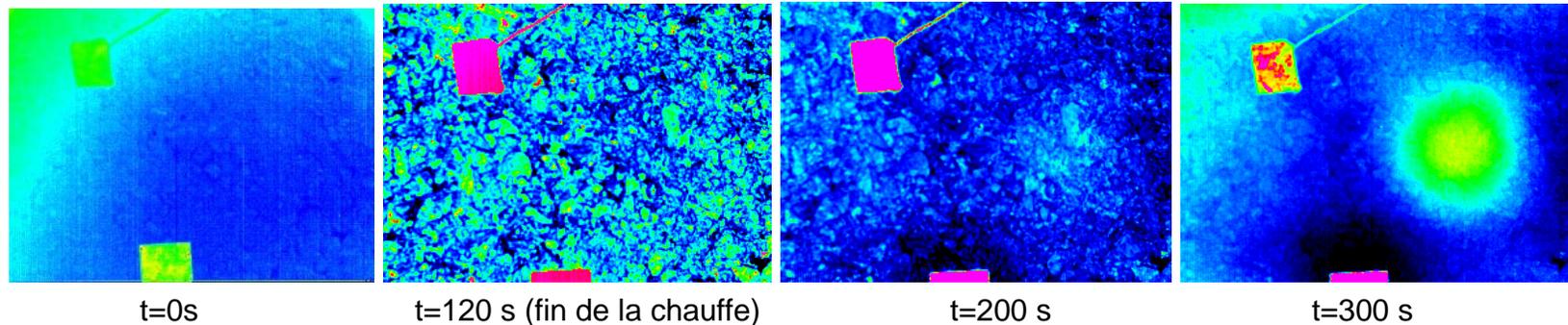


Face avant (visualisée)

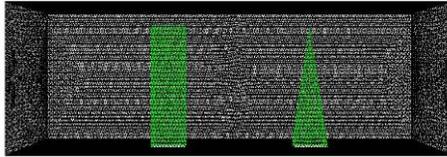
Exemples de thermogrammes acquis sous deux sollicitations thermiques différentes



**Thermogrammes FLIR® S65 - Durée du créneau de chauffe 1 heure à 220 W.m^{-2}
Echantillon avec 2 défauts en bois**

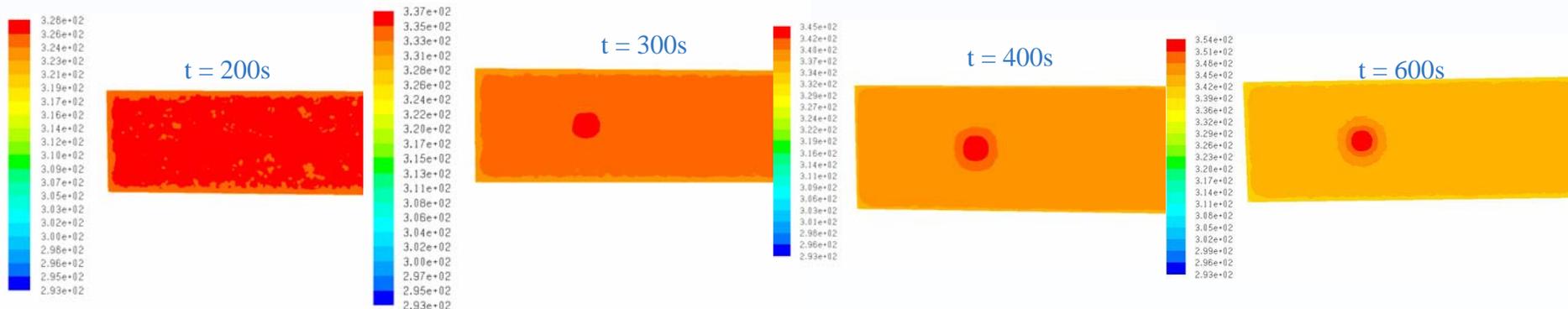


**Thermogrammes CEDIP® Jade III – Durée du créneau de chauffe 1 minute à 2620 W.m^{-2}
Défaut carré en bois**

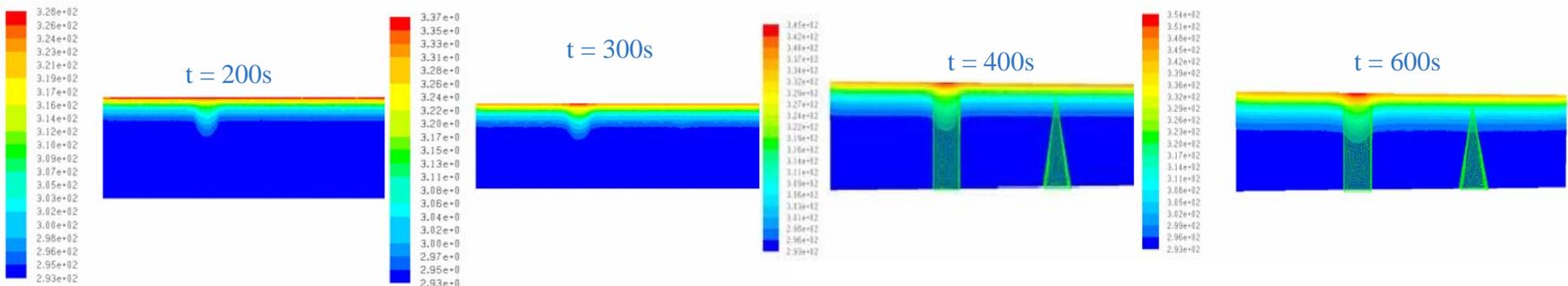


- ◆ Maillage 3d non structuré tétraédrique réalisé avec GAMBIT™. Nombre d'éléments 1892429
- ◆ Text = 20°C – Sollicitation par un Echelon de 400 W
- ◆ Coefficient d'échange global $h = 10 \text{ W.m}^{-2}\text{.K}^{-1}$ sur faces avant, arrière et latérales

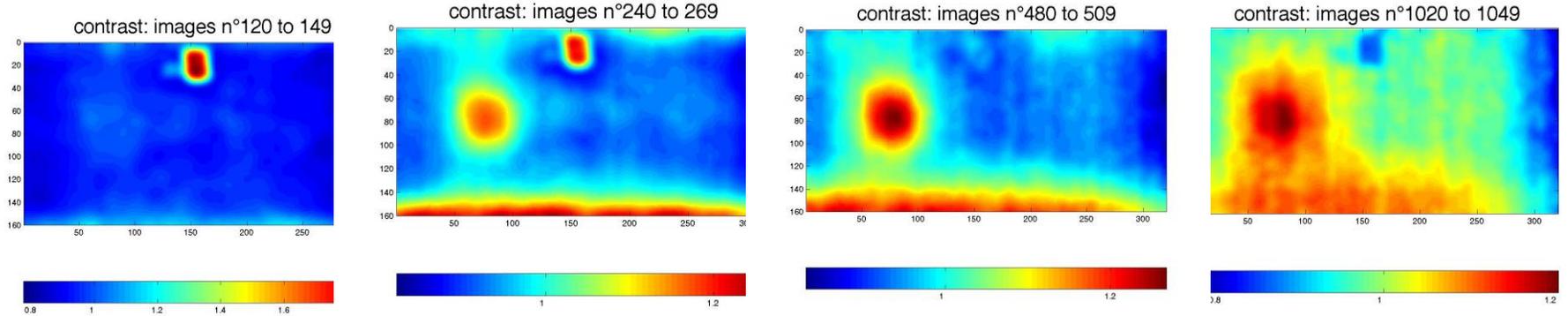
Défauts et maillage associé



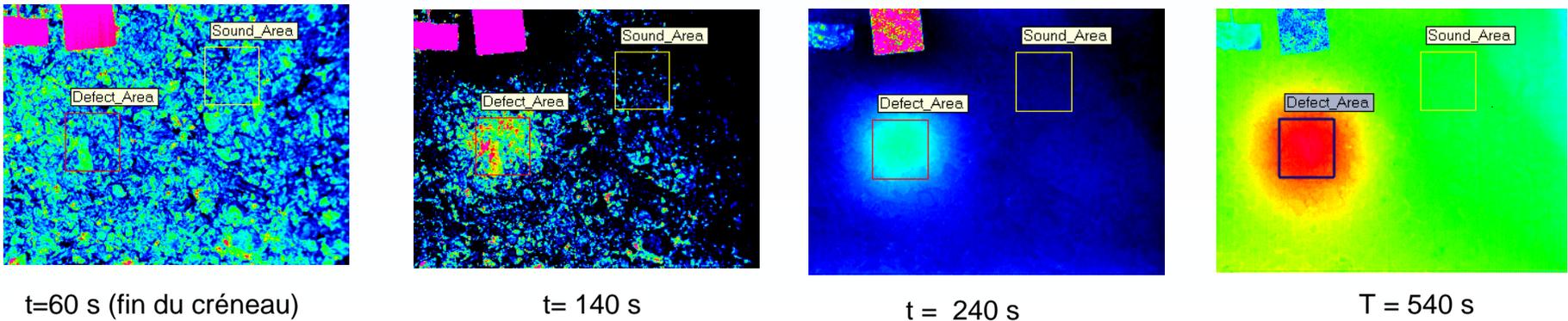
Evolution du champ des températures de surface sous sollicitation thermique



Coupe montrant l'évolution des températures dans l'échantillon



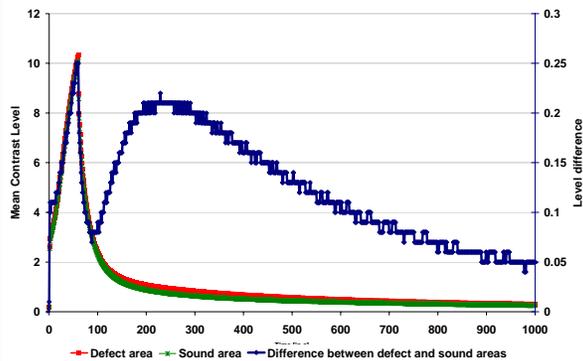
Cartes FLIR® S65 - Durée du créneau 5 min à 2620 W.m⁻² – Deux défauts en bois



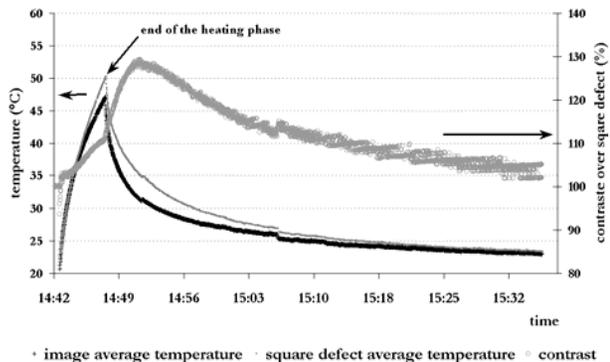
Cartes CEDIP® Jade III – Durée du créneau de chauffe 1 minute à 2620 W.m⁻² Défaut carré avec air

Exemple d'analyse par approche fréquentielle

Contraste thermique et influence de l'échelle d'observation

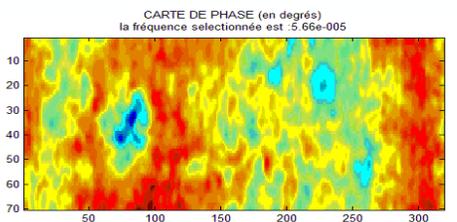
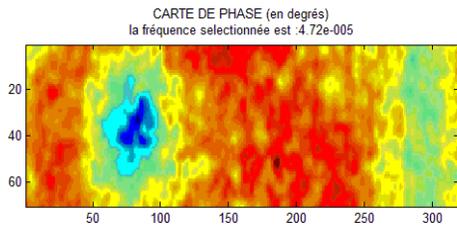
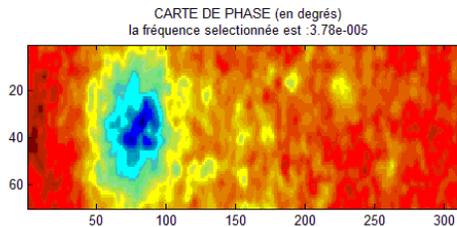
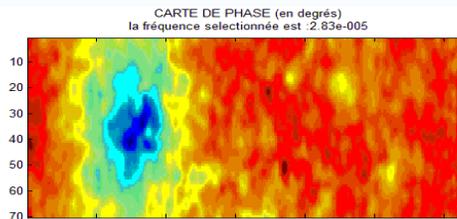


Evolution du contraste CEDIP® Jade III

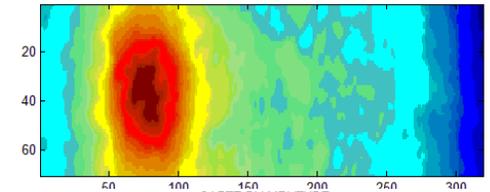


Evolution du contraste FLIR® S65

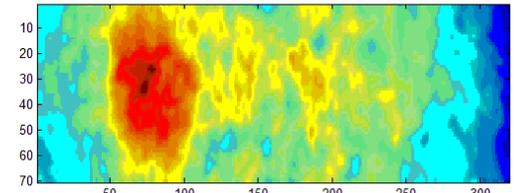
Exemples de cartes de phase et d'amplitude à différentes fréquences



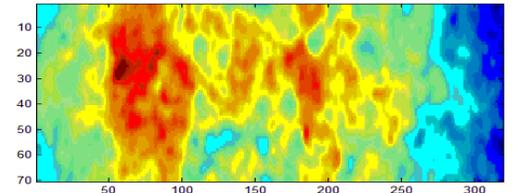
CARTE D'AMPLITUDE
la fréquence sélectionnée est : 1e-005



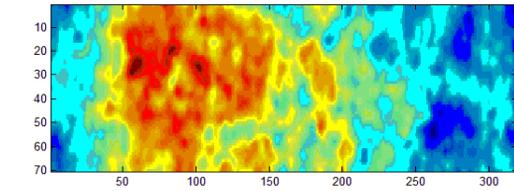
CARTE D'AMPLITUDE
la fréquence sélectionnée est : 2.83e-005



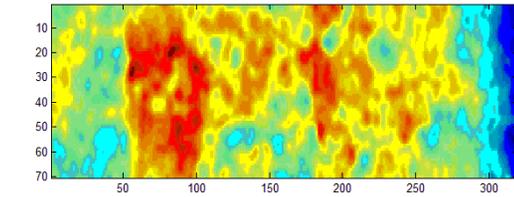
CARTE D'AMPLITUDE
la fréquence sélectionnée est : 3.78e-005



CARTE D'AMPLITUDE
la fréquence sélectionnée est : 4.72e-005



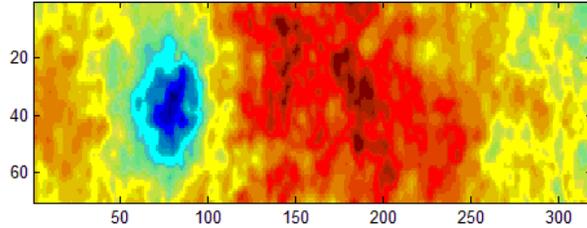
CARTE D'AMPLITUDE
la fréquence sélectionnée est : 5.66e-005



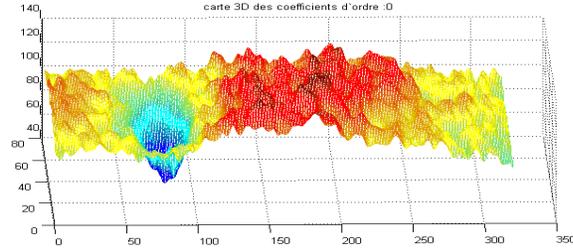
Exemple d'analyse s'appuyant sur le calcul de cartes de coefficients de polynômes

Intérêt : Réduction du nombre d'images à analyser (ici passage de 3220 images à 6 cartes)

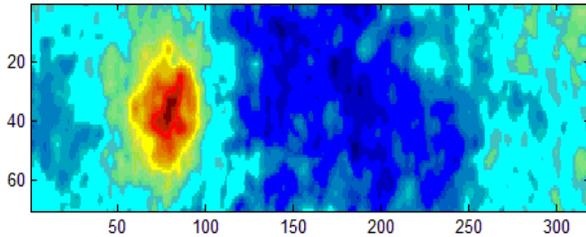
carte 2D des coefficients d'ordre :0



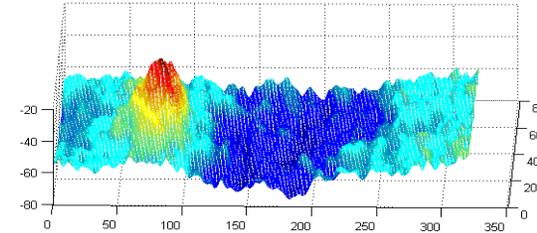
carte 3D des coefficients d'ordre :0



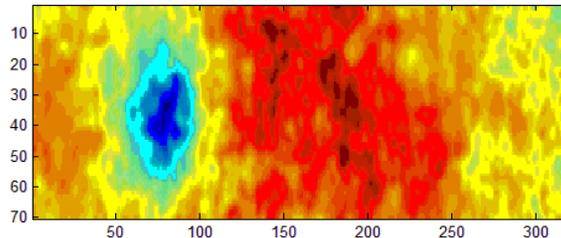
carte 2D des coefficients d'ordre :1



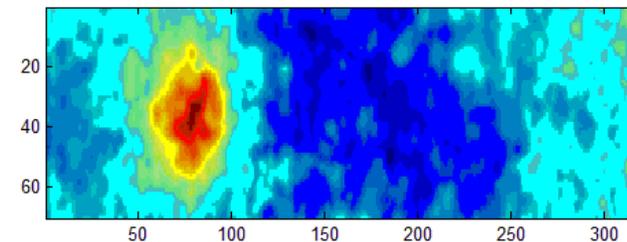
carte 3D des coefficients d'ordre :1



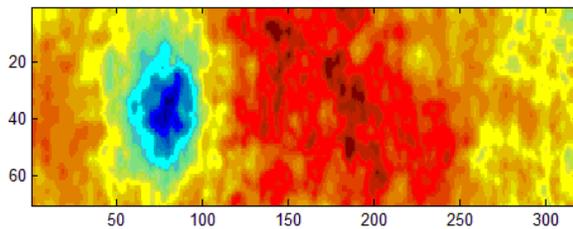
carte 2D des coefficients d'ordre :2



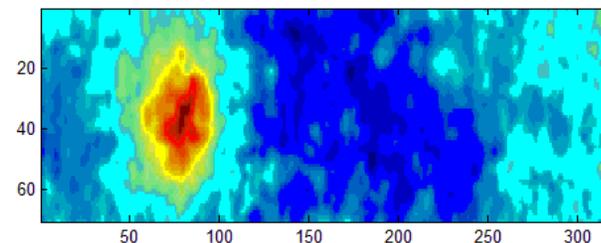
carte 2D des coefficients d'ordre :3



carte 2D des coefficients d'ordre :4



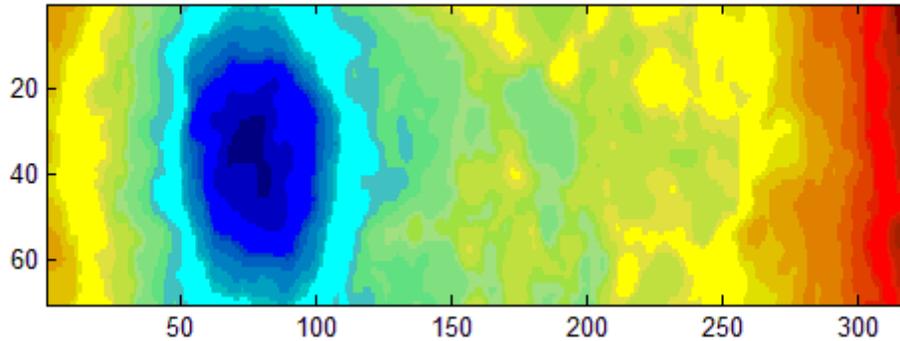
carte 2D des coefficients d'ordre :5



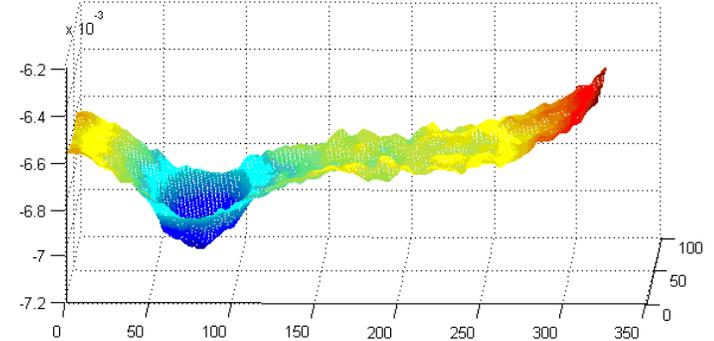
Exemple d'analyse s'appuyant sur le calcul de cartes obtenues par décomposition en valeurs singulières

Intérêt : Réduction du nombre d'images à analyser (ici passage de 3220 images à 2 cartes)

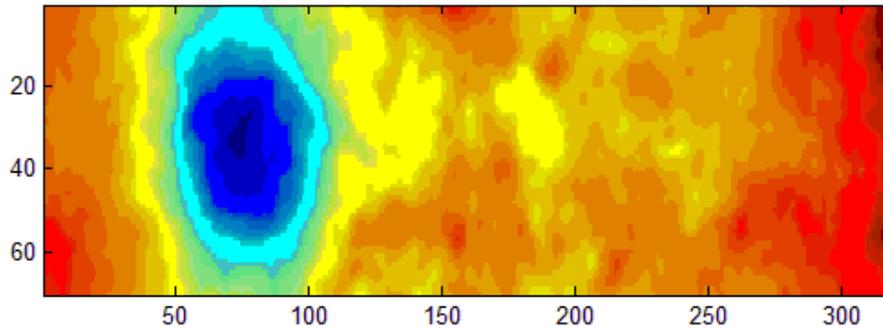
EOF numéro :1



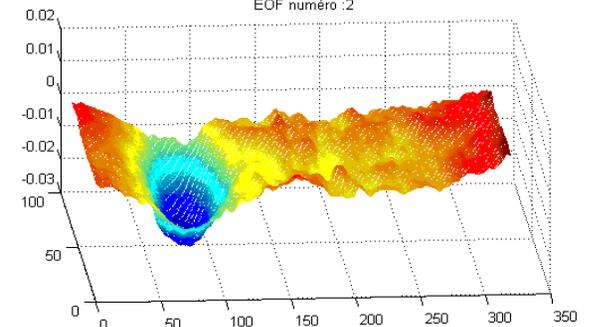
EOF numéro :1



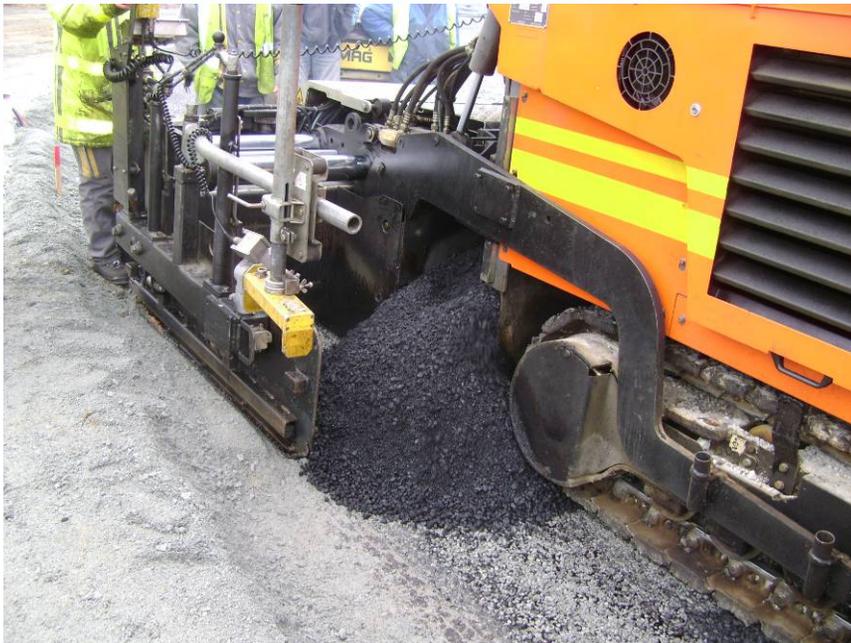
EOF numéro :2



EOF numéro :2

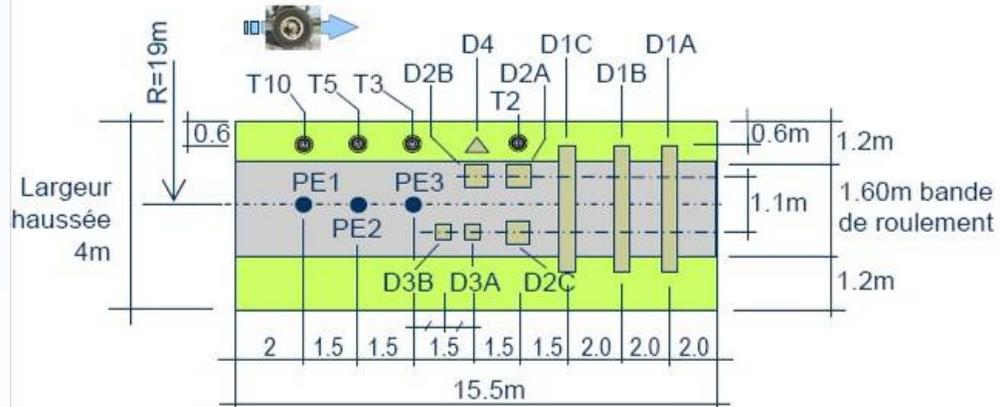


Site test sur manège de fatigue Construction du site

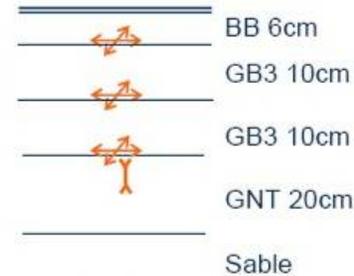


Localisation des défauts sur le site test du manège de fatigue du LCPC

Planche P1



Extensiomètres Kiowa
 ε et déformation longitudinale
 et déformation transversale
 ε_z déformation verticale

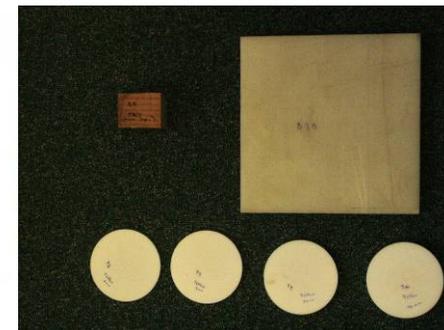


Profils extensiométriques
PE1 PE2 PE3

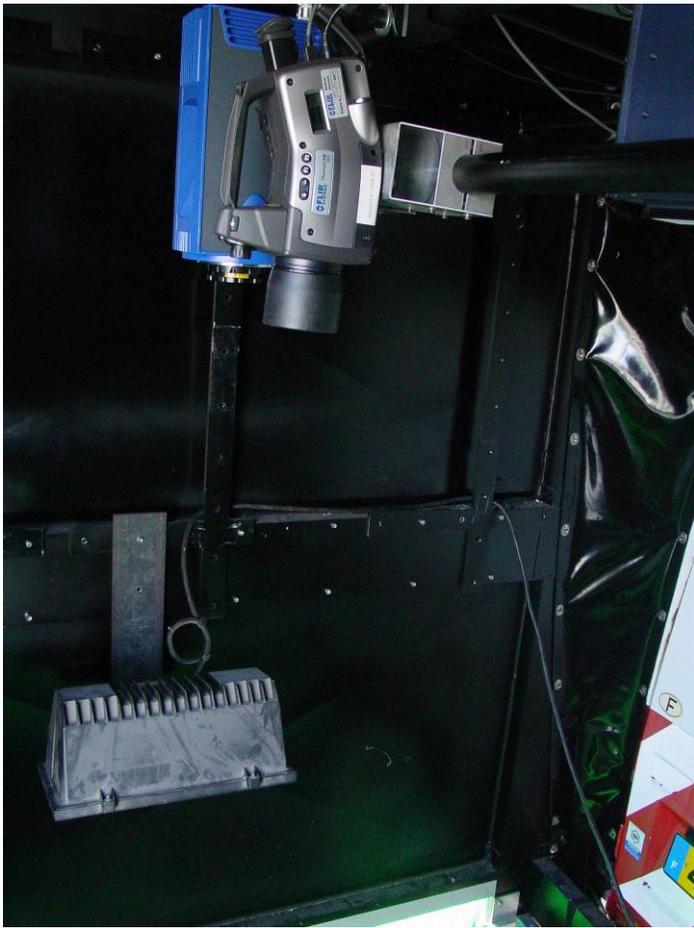
Nb=3*7= 21 jauges Kiowa

Vue en plan : profils de mesures
extensiométriques PE1 PE2 PE3
et défauts simulés

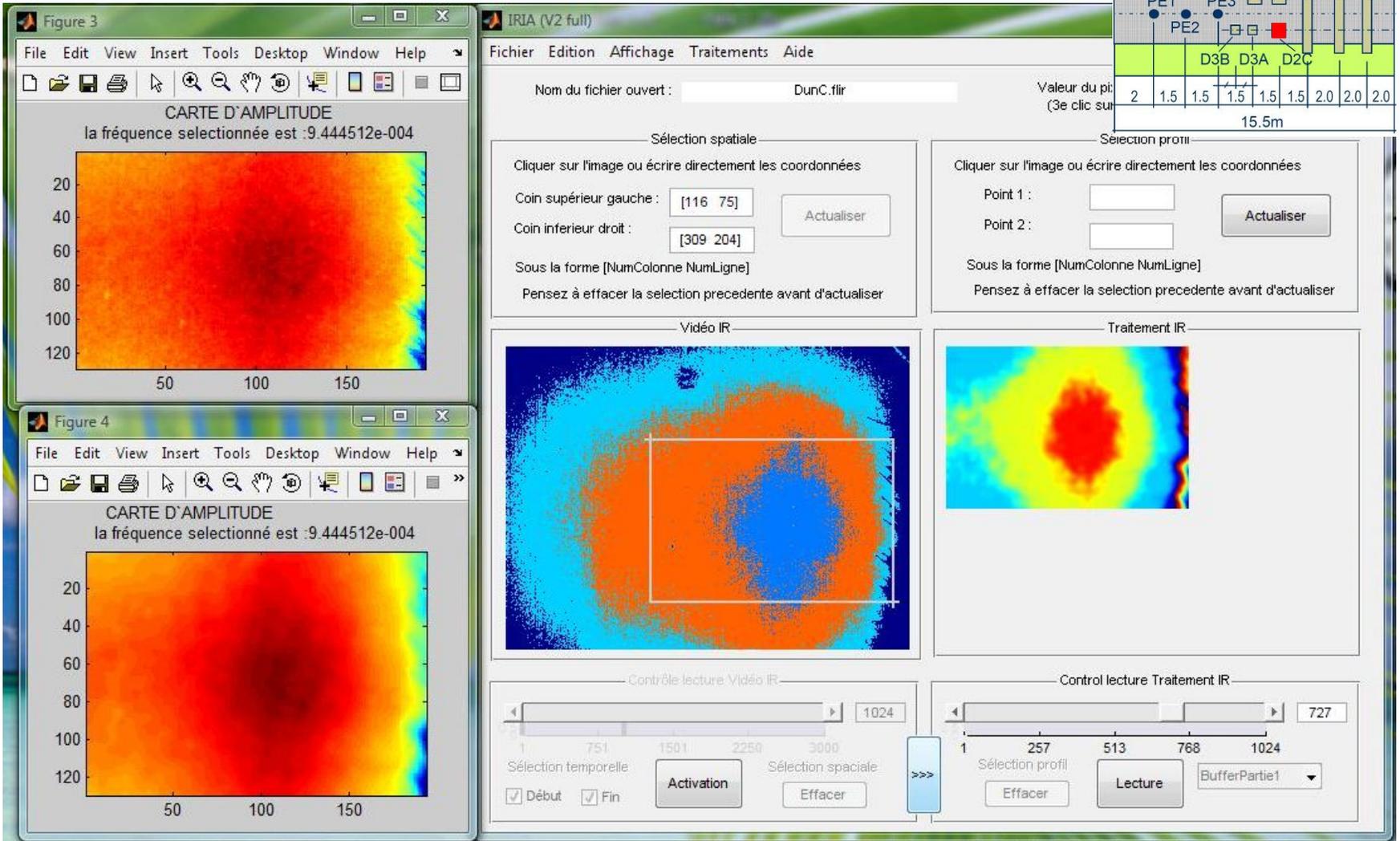
Défauts:	Code	Dimensions	Matériau	Configuration
	D1A	2.5mx1m	craft	BB/GB
	D1B	2.5mx1m	craft	GB/GB
	D1C	2.5mx1m	sable	GB/GB
	D2A	0.5x0.5cm	craft	BB/GB
	D2B	0.5x0.5cm	craft	GB/GB
	D2C	0.5x0.5cm	sable	GB/GB
	D3A	0.2x0.2cm	craft	BB/GB
	D3B	0.2x0.2cm	téflon	BB/GB
	D4	5x4x3cm	bois	BB/GB
	T10	Φ84ep10mm	téflon	BB/GB
	T5	Φ84ep5mm	téflon	BB/GB
	T3	Φ84ep3mm	téflon	BB/GB
	T2	Φ84ep2mm	téflon	BB/GB



Matériel utilisé lors des essais sur site test



Exemple de résultat sur site test du manège de fatigue

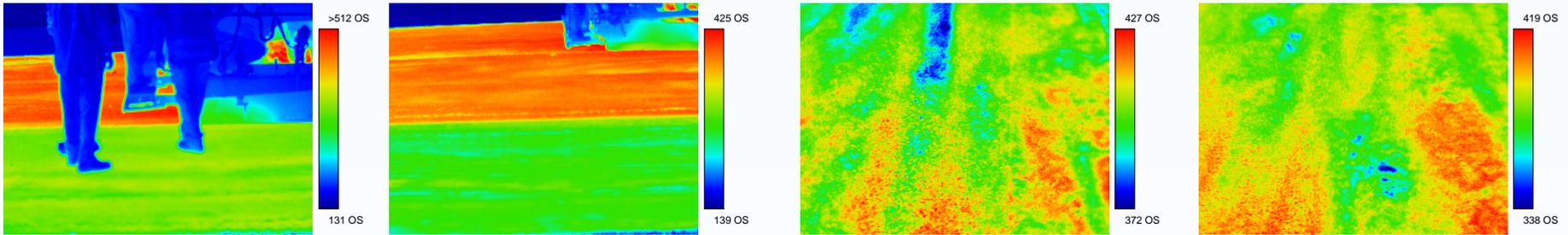


The software interface displays the following components:

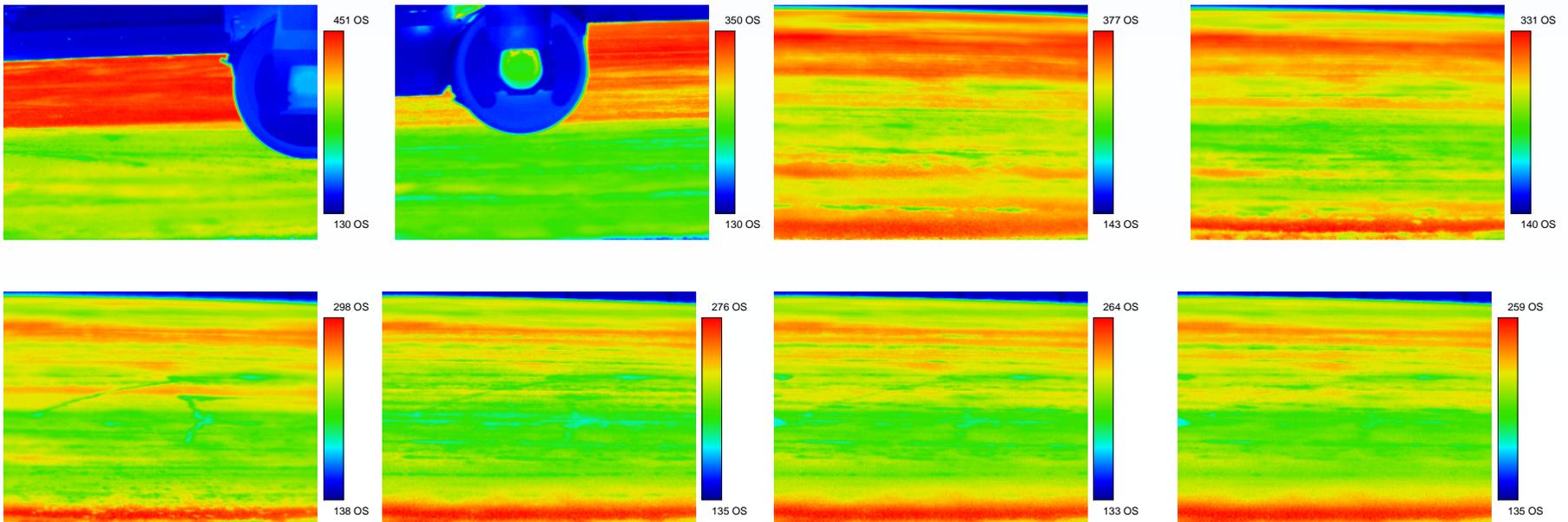
- Figure 3 (Top Left):** A window titled "Figure 3" showing a "CARTE D'AMPLITUDE" (Amplitude Map) for a selected frequency of $9.444512e-004$. The map is a 120x150 grid with a color scale from blue (low) to red (high).
- Figure 4 (Bottom Left):** A window titled "Figure 4" showing a similar "CARTE D'AMPLITUDE" for the same frequency.
- IRIA (V2 full) Main Window:**
 - File Information:** "Nom du fichier ouvert : DunC.flir", "Valeur du pi (3e clic sur) : 15.5m".
 - Sélection spatiale (Spatial Selection):**
 - Coordinates: "Coin supérieur gauche : [116 75]", "Coin inférieur droit : [309 204]".
 - Buttons: "Actualiser", "Sous la forme [NumColonne NumLigne]", "Pensez à effacer la selection precedente avant d'actualiser".
 - Sélection profil (Profile Selection):**
 - Buttons: "Point 1:", "Point 2:", "Actualiser".
 - Text: "Sous la forme [NumColonne NumLigne]", "Pensez à effacer la selection precedente avant d'actualiser".
 - Vidéo IR (IR Video):** A large image showing a circular pattern with a white rectangular selection box.
 - Traitement IR (IR Processing):** A smaller image showing a processed version of the IR video with a red/yellow center.
 - Contrôle lecture Vidéo IR (IR Video Playback Control):**
 - Slider: 1 to 3000, current value 1024.
 - Buttons: "Sélection temporelle", "Début", "Fin", "Activation", "Effacer".
 - Control lecture Traitement IR (IR Processing Playback Control):**
 - Slider: 1 to 1024, current value 727.
 - Buttons: "Sélection profil", "Effacer", "Lecture", "BufferPartie1".
- Diagram (Top Right):** A schematic of a test specimen with various points labeled: T10, T5, T3, D2B, D4, D2A, D1C, D1A, PE1, PE2, PE3, D3B, D3A, D2C, D1B. A red square highlights a specific area.

Exemple de suivi d'un chantier routier : réalisation d'une couche de roulement avec un enrobé à chaud

Mise en œuvre



Compactage et refroidissement



Conclusion - Perspectives

- Pour les chapes d'étanchéité des Ouvrages d'art :
 - Pellicule d'air plus facilement détectable que pellicule d'eau
 - Avec enrobé: pellicule d'eau très difficile à détecter - privilégier sollicitation naturelle diurne
- Pour les structures de Chaussées
 - Détection de défauts en sous face (profondeur quelques centimètres) faisabilité en laboratoire
 - Transposition sur le terrain nécessite d'optimiser la période d'observation si les essais sont sous sollicitations naturelles sinon il faut rechercher une technique de sollicitation adaptée
- Points durs pour les matériaux de type Béton Bitumineux :
 - Influence du compactage et connaissance des propriétés thermiques
 - Homogénéité des états de surface
 - Connaissance des propriétés radiatives (notamment en fonction de la longueur d'onde)
 - Adaptation de l'échantillonnage spatiale du champ de mesure pour s'affranchir de la différence de comportement thermique des granulats vis-à-vis du liant
- Les performances des caméras IR influent sur les besoins de prétraitement des données
- Analyse quantitative (caractérisation des défauts) requiert encore de travailler sur les méthodes d'identification et de caractérisation