

DEFBETIR : Détection par infrarouge de la signature thermique de défauts et pathologies dans les structures de génie civil en béton

Ing. Samuel PAEZ
Ing. Michaël NAHANT
Ing. Jérémy VAN LEEUWEN
PIERRARD – Virton

Ce projet de recherche a pour but le développement de techniques de thermographie infrarouge permettant d'ausculter des structures en béton armé, principalement les bassins de stations d'épuration et les tabliers de ponts, de façon à y localiser des zones défectueuses en vue de leur réparation. Les défauts à détecter sont les nids de gravier, les délaminations, ou tout autre défaut ou dégradation interne ayant des caractéristiques thermiques similaires. Diverses techniques de chauffage et d'observation sont développées.

Mots-clefs : thermographie infrarouge, béton armé, détection de défauts, nids-de-gravier, délaminations.

In this research, infrared thermography is used to detect defects and damages in reinforced concrete structures. The research is mainly centered on wastewater treatment plants and bridge decks. The defects that need to be detected are rock pockets, delaminations and concrete disaggregation, but also all defects which have similar thermal properties. The aim of the project is to allow a defect mapping of the whole structure in order to repair it.

Keywords: infrared thermography, reinforced concrete, defects detection, honeycombing, delaminations.

1. Introduction

1.1 Présentation du projet

Ce projet de recherche, mené dans le cadre du programme FIRST de la Région Wallonne visant à encourager la recherche scientifique dans les Instituts Supérieurs Industriels, a pour but l'élaboration de nouvelles méthodes non destructives de détection de défauts internes dans les structures en béton, par thermographie infrarouge c'est-à-dire par l'utilisation d'une caméra infrarouge.

La durée initiale du projet était de deux ans, et les résultats encourageants de cette première partie ont permis de réaliser une prolongation supplémentaire d'un an, qui est consacrée au développement d'une méthodologie d'auscultation industrielle sur chantier, fiable, économique et plus rapide que les techniques d'auscultation existantes. Les partenaires du projet sont le CRISIA, le CRISIP, l'entreprise de construction GALERE, ainsi que le SPW et le CRR.

1.2 Objectifs

Ces dernières décennies ont vu l'émergence à travers le monde de nombreuses techniques de « contrôle non destructif » (CND ou NDT dans la littérature anglophone) des ouvrages d'art en béton. Certains de ces ouvrages vieillissent en effet prématurément, avec l'apparition de "maladies" du béton, de désagrégation de celui-ci, de corrosion des armatures ou des câbles de précontrainte ou d'autres problèmes similaires. Les conséquences peuvent aller de simples décollements de portions de béton (présentant de sérieux risques pour les usagers de nos routes) à la ruine pure et simple de l'ouvrage.

Il a donc fallu se munir de techniques rapides et fiables permettant d'établir un diagnostic précis des détériorations subies par les ouvrages d'art, en endommageant le moins possible ces derniers. Il existe actuellement nombre de ces techniques, ayant chacune leurs avantages et leurs limites ; on peut citer, entre autres, le sondage radar, le sondage par ultrasons, l'impact-écho, le calcul du potentiel de corrosion, la mesure de la résistivité électrique ou bien la thermographie infrarouge.

Le but de ce projet de recherche est le développement d'une méthodologie générale visant à la détection des défauts internes dans les ouvrages en béton par thermographie. La thermographie a été choisie pour sa rapidité d'exécution et pour la possibilité de travailler sans contact direct avec la surface à ausculter. Les ouvrages étudiés sont dans un premier temps les voiles (murs) en béton armé des bassins biologiques de stations d'épuration des eaux usées, et, dans un second temps, les tabliers de ponts en béton précontraint.



Figure 1 : Intérieur d'un bassin de station d'épuration

Pour les bassins d'épuration des eaux, les défauts à détecter sont ceux qui risquent de nuire à l'étanchéité de l'ouvrage ou d'affaiblir sa résistance structurelle. Il s'agit surtout :

- des fissures de retrait traversant les voiles. Ces fissures apparaissent dans les quelques jours qui suivent le bétonnage et sont généralement verticales. Elles font courir un risque que les eaux polluées se répandent dans l'environnement.
- des « nids de gravier », qui sont des zones où il manque du mortier entre les granulats, ceux-ci sont donc moins bien liés entre eux. Ce sont des zones où la résistance est localement inférieure à celle du reste de la structure, ce qui constitue des points faibles dans le voile.

De plus, ces défauts nuisent à la durabilité de la structure. En effet, ils augmentent la probabilité que des agents agressifs (sulfates contenus dans les

eaux usées, chlorures, ...) pénètrent dans le béton et attaquent les armatures en entraînant leur corrosion.

Malgré une mise en œuvre très soignée du béton (excellente compacité, présence de joints de retrait, important enrobage des armatures, cure, vibration, ...), l'apparition localisée de ces défauts reste inévitable. Le but du projet est de concevoir un dispositif capable de détecter la présence de ces défauts dès la réalisation du voile afin de les réparer immédiatement et de diminuer le nombre de tests d'étanchéité par mise sous eau des bassins, qui sont très coûteux en temps et en argent.

En ce qui concerne les ouvrages d'art, il faut savoir que la Région Wallonne compte plus de 3700 ponts en béton. La plupart de ceux-ci ont entre 25 et 50 ans, et de nombreux défauts ou pathologies apparaissent ou se révèlent, nuisant à la sécurité de l'ouvrage ou représentant des coûts d'entretien et de réparation importants. Nous souhaitons donc pouvoir détecter non seulement les délaminations de plaques de béton en face supérieure du tablier, mais aussi, en généralisant, tout type de défaut ayant un comportement thermique similaire, tel que le phénomène de "pourrissement" des dalles de tablier, fréquemment rencontré en Belgique. Le but est de mieux estimer l'étendue des réparations nécessaires et donc leur coût.



Figure 2 : Taches en face inférieure d'un tablier de pont, caractéristiques du phénomène de pourrissement des dalles.

1.3 Principes de la thermographie infrarouge

Tout objet dont la température est supérieure à 0 K (-273°C) émet naturellement de l'énergie sous forme d'ondes électromagnétiques. Le type de rayonnement émis par l'objet (c'est-à-dire la fréquence ou la longueur d'onde à laquelle il émet) est fonction de sa température : ainsi un corps à une température de 6000K (température en surface du soleil) émet principalement dans le domaine de la lumière visible ; par contre un corps à une température de l'ordre de 300K ($\pm 27^\circ\text{C}$, soit une température proche de l'ambiance terrestre) émet principalement dans le domaine de l'infrarouge.

La loi de Stefan-Boltzmann relie la température d'un solide à l'énergie de radiation qu'il émet ; on peut donc déterminer la température de surface d'un corps, à distance, en mesurant le rayonnement infrarouge provenant de celui-ci à l'aide de capteurs appropriés :

$$M = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad , \text{ où :}$$

M : puissance totale émise par le matériau par rayonnement [W/m²].

ε : émissivité du matériau (pour le béton : $\varepsilon \approx 0,92$).

T : température absolue en kelvin.

σ : constante de Stefan-Boltzmann = $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$

Le rayonnement émis par une surface solide ne provient cependant pas uniquement du corps considéré : une partie du rayonnement reçu par l'observateur a été réfléchi par la surface, et provient donc de son environnement ; et de plus, certains corps, de par leur nature ou leur épaisseur, peuvent transmettre une partie du rayonnement qui les atteint. A ceci s'ajoute le fait que l'air ambiant absorbe une partie du rayonnement – part très faible mais non négligeable si l'observateur se trouve à grande distance du corps étudié.

Le signal finalement capté est la somme de plusieurs rayonnements d'origines diverses ; la mesure précise de la température d'un objet à distance nécessite donc la connaissance ou du moins l'estimation de nombreuses variables, concernant non seulement ce corps mais également son environnement. La caméra infrarouge moderne est généralement équipée d'une matrice de X par Y capteurs étalonnés afin de transcrire le rayonne-

ment reçu en température, permettant finalement de reconstituer, par l'utilisation d'une échelle de couleur, une image thermique de la scène observée. C'est de cette image dont nous disposerons pour pouvoir localiser les défauts dans les ouvrages en béton.

1.4 Utilisation de la thermographie infrarouge comme technique de contrôle non-destructif : application au génie civil

L'objectif principal de la technique est de mettre en évidence la présence de défauts situés sous la surface de l'objet étudié – problème délicat puisque la caméra thermique ne mesure que les températures de surface !

Les applications existant aujourd'hui (et celles mises en œuvre jusqu'à présent dans le cadre de cette recherche) font presque toutes appel à un système de chauffage ou de refroidissement :

- Soit le rayonnement solaire ou le réchauffement (ou refroidissement) ambiant : on parle alors de thermographie passive ;
- Soit un moyen de chauffage (ou de refroidissement) artificiel :
 - par conduction (surface mise en contact avec un solide chaud ou froid) ;
 - par convection (air chaud ou air froid soufflé) ;
 - par radiation (radiateur infrarouge).

On parle alors de thermographie active.

Le principe de détection se base sur la différence d'effusivité thermique entre le béton sain et les zones défectueuses. L'effusivité est une propriété intrinsèque du matériau qui représente physiquement l'aptitude d'un corps à changer de température lorsqu'il subit une sollicitation thermique (chauffage ou refroidissement) en surface. C'est pourquoi l'effusivité thermique est parfois appelée inertie thermique. Elle se calcule comme suit :

$$e = \sqrt{c \cdot \lambda \cdot \rho}$$

avec λ la conductivité thermique, ρ la masse volumique et c la chaleur massique.

Tout défaut situé sous la surface d'un élément en béton, et présentant une effusivité thermique inférieure à celui-ci, va provoquer, en cas de stimulus thermique naturel ou artificiel appliqué en surface, un réchauffement plus

rapide de la zone au droit du défaut. En effet, le défaut agissant comme un isolant va freiner la progression du flux de chaleur dans le béton, créant ainsi une zone plus chaude en surface au droit du défaut. Ce réchauffement pourra alors être détecté par la caméra infrarouge, mettant ainsi en évidence la présence du défaut.

Par exemple, l'effusivité thermique de l'air est beaucoup plus faible que celle du béton : un élément en béton contenant une cavité remplie d'air manifestera après chauffage un contraste thermique en surface à l'emplacement de la cavité, comme l'illustre le schéma ci-dessous.

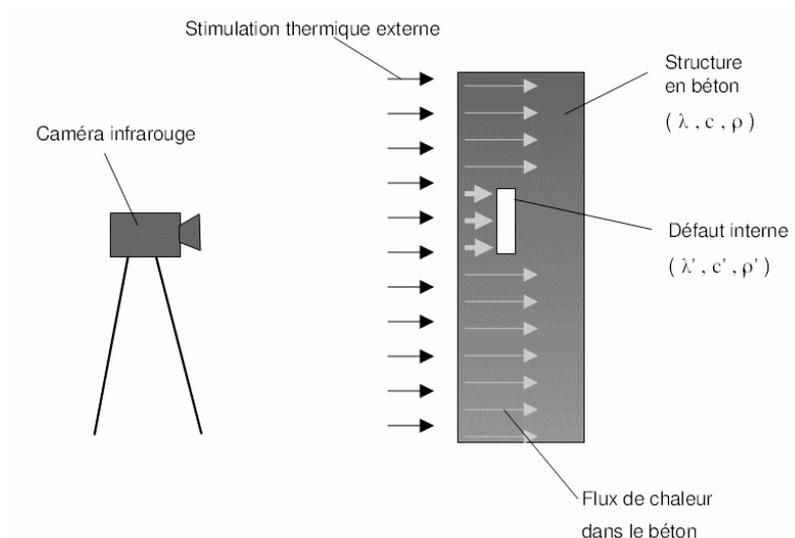
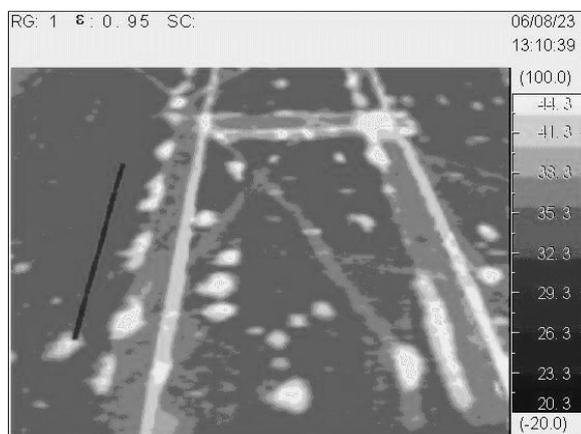
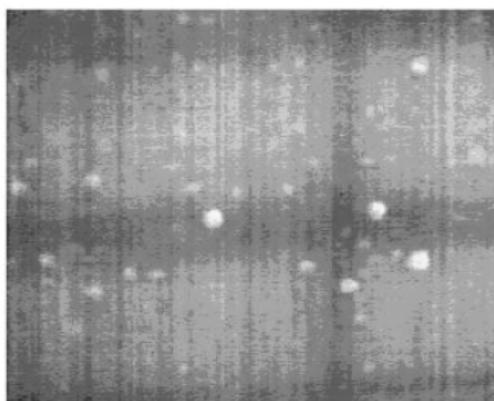


Figure 3 : Principe de la détection des défauts par thermographie.

Ce principe est depuis quelques années maintenant utilisé un peu partout à travers le monde. En Wallonie, c'est essentiellement la Direction de l'Expertise des Ouvrages du SPW qui utilise la technique pour l'auscultation des ouvrages d'art sous sa responsabilité.



Ci-dessus : Figure 4 : Détection par infrarouge de « cloques » (bulles d'air) sous la couche d'étanchéité d'un tablier de pont grâce au réchauffage par le rayonnement solaire, ces cloques n'étant pas visibles à l'œil nu. [1]



Ci-contre : Figure 5 : Détection par infrarouge de « piqûres » en face inférieure d'un tablier de pont, c'est-à-dire des décollements localisés de plaques de béton : la corrosion des armatures en acier provoque la formation de rouille, qui de par son caractère expansif entraîne la fissuration du béton

(ces décollements ne sont encore une fois pas visibles à l'œil nu). On peut de plus deviner la structure en caissons du tablier (la position des voiles internes est marquée par des zones plus foncées sur l'image IR). [1]

L'utilisation de la thermographie IR en tant que technique non-destructive de localisation des défauts dans les structures de béton présente de nombreux avantages :

- C'est une méthode sans contact, qui permet de travailler à plusieurs mètres de distance.

- Elle permet d'ausculter de grandes surfaces assez rapidement.
- Elle ne met pas en œuvre de rayonnements dangereux.
- Elle permet d'obtenir des résultats en temps réel sous forme d'images colorées.

Ses inconvénients sont principalement :

- Le problème des variations locales d'émissivité de la surface du béton.
- La nécessité d'obtenir un chauffage le plus uniforme possible (sauf en cas de post-traitement numérique des images).
- La dépendance aux conditions climatiques (température ambiante, pluie, vent, etc.).

2. Différentes phases du projet

2.1 Modélisation par éléments finis des phénomènes de transfert thermique mis en jeu

Un modèle informatique, utilisant la technique des éléments finis, a été développé afin de simuler la réponse thermique d'une portion de béton sur laquelle est appliquée une stimulation thermique déterminée. Le modèle représente un cube de béton de 10 cm de côté, faisant partie d'un voile semi-infini, dans lequel il est possible d'insérer des défauts de nature et de dimensions variables. Il permet donc de tester virtuellement différents types de chauffage (taux d'uniformité, puissance de chauffe, durée) sur des défauts plus ou moins denses ou profonds.

Le modèle, prenant en considération les équations exactes du transfert de chaleur par conduction, convection et rayonnement, fournit en quelques minutes la courbe d'évolution de température de surface au droit d'une zone de béton sain, celle au droit du défaut, ainsi que la courbe de contraste thermique, qui est la valeur de la différence entre ces deux dernières, et qui correspond à la faculté de détecter le défaut à l'aide de la caméra infrarouge. Le modèle permet non seulement de travailler avec une puissance de chauffe constante, mais également d'introduire comme paramètre d'entrée une puissance variable selon une fonction donnée. En outre, la température ambiante peut aussi varier durant la simulation.

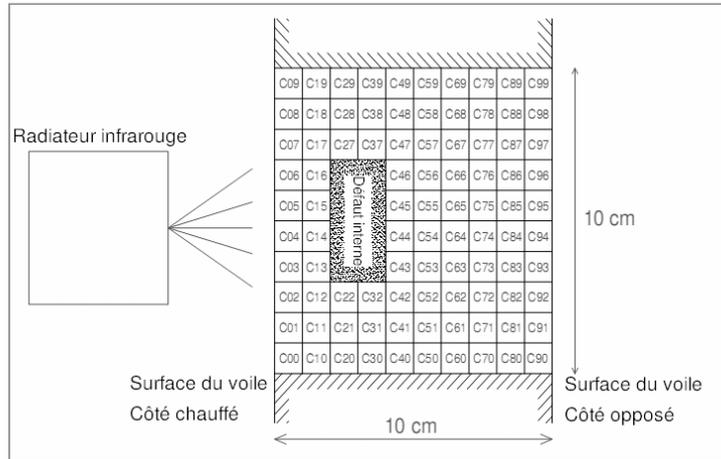


Figure 6 : Coupe transversale du modèle, contenant ici une cavité à 2 cm de profondeur. Le modèle utilisé est tridimensionnel.

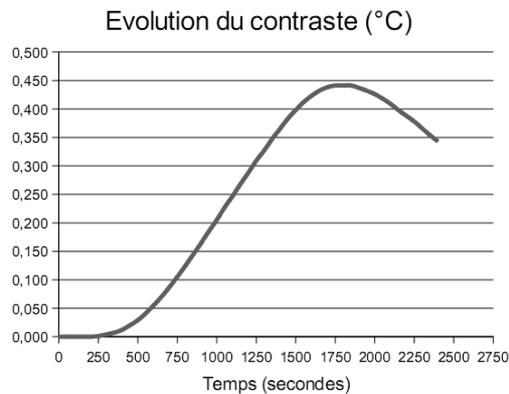


Figure 7 : Graphe représentant l'évolution du contraste de la température de surface entre une zone défectueuse et une zone de béton sain.

Cette étude a permis d'aboutir aux conclusions suivantes :

- Le contraste thermique maximal est directement proportionnel à la puissance de chauffage,
- Le contraste thermique maximal est directement proportionnel à la durée du chauffage,

- Le temps au bout duquel le contraste est maximal est presque indépendant de la puissance de chauffage, et n'est que faiblement dépendant de la durée de chauffage.
- La présence de barres d'armature n'a presque pas d'influence sur la détection des défauts si ceux-ci se situent dans l'épaisseur d'enrobage.
- La profondeur maximale de détection est d'environ 5 cm,
- Pour un défaut de type nid-de-gravier, situé à 4 cm de profondeur, le contraste thermique maximal est d'environ 15 % de l'échauffement d'une zone de béton sain au même instant,
- L'effet du vent est particulièrement important : pour une température ambiante de 15°C, un vent de 20 km/h divise par deux le contraste (donc la détectabilité) d'un défaut subsurfacique.

2.2 Essais en laboratoire

Plusieurs dalles de béton, comportant différents défauts à différentes profondeurs, ont été réalisées par nos soins. Les nombreux tests menés sur ces dalles comportaient tout d'abord une première phase de réchauffage de la surface de la dalle (par le rayonnement solaire ou par un appareil de chauffage tel qu'un radiateur infrarouge), puis dans un deuxième temps l'observation par thermographie de l'évolution temporelle des températures en surface lors du refroidissement.

Tests de détection des fissures

Blocs de béton cassés

Des éléments en béton ont été cassés puis réassemblés, de façon à obtenir des fissures. Les éléments ont ensuite été chauffés ponctuellement à l'aide d'un décapeur thermique. Les essais réalisés ont montré que les fissures ralentissaient le flux de chaleur parallèle à la surface allant du point chauffé vers les zones alentour, permettant ainsi de repérer les emplacements des fissures sur les thermogrammes.

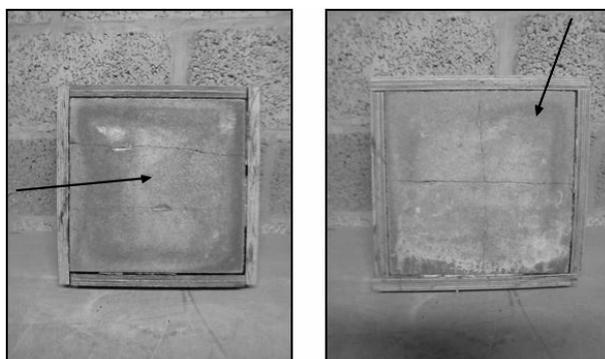


Figure 8 : Éléments de béton utilisés pour l'étude des fissures. Les flèches désignent la zone chauffée.

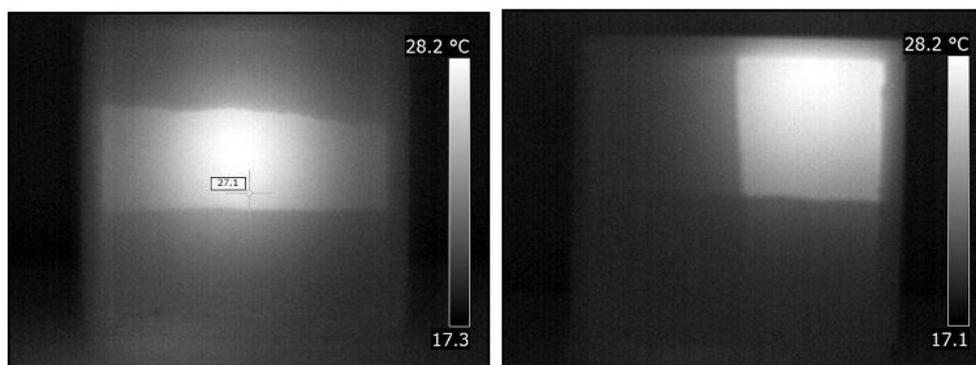


Figure 9 : Images thermiques de ceux-ci après chauffage local, mettant les fissures en évidence.

Dalle comportant une fissure de retrait

Nous avons également réalisé une dalle de grande longueur dans laquelle nous avons provoqué l'apparition d'une fissure de retrait. Celle-ci a été étudiée de la même façon que précédemment, et les images ont été retraitées numériquement (par utilisation de filtres de détection des bords) pour améliorer la visibilité de la fissure.

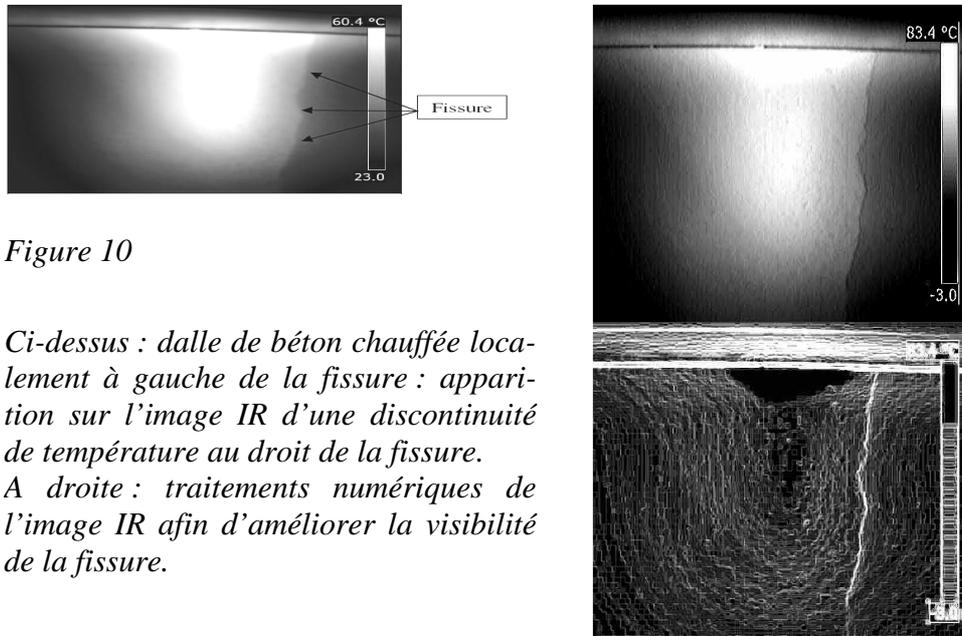


Figure 10

*Ci-dessus : dalle de béton chauffée localement à gauche de la fissure : apparition sur l'image IR d'une discontinuité de température au droit de la fissure.
A droite : traitements numériques de l'image IR afin d'améliorer la visibilité de la fissure.*

Tests de détection des nids de gravier

1. Par thermographie active

De nombreuses dalles de béton ont été fabriquées pour simuler la présence de défauts de type nid de gravier. Ceux-ci ont dans un premier temps été confectionnés à l'aide de graviers emballés dans un sachet plastique, puis dans un second temps par des blocs de béton maigre directement coulés dans la dalle. Ces dalles ont été stimulées thermiquement à l'aide d'un radiateur infrarouge, par une méthode de chauffage statique (le radiateur est fixe) ou de chauffage mobile (le radiateur passe de nombreuses fois devant la surface à chauffer).

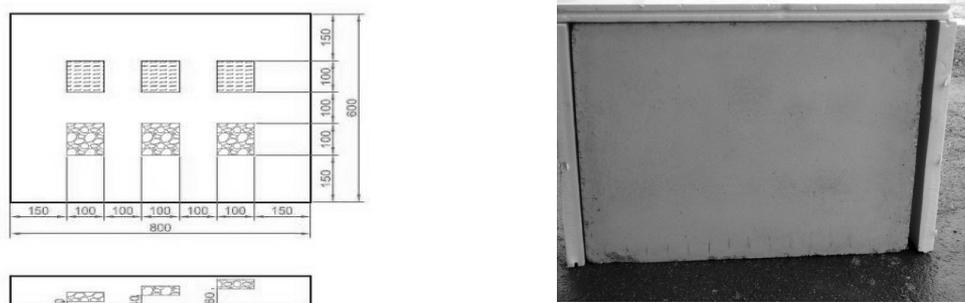


Figure 11 : Plan et photo de la dalle-test contenant des défauts de type nid de gravier (en bas) et bloc de polystyrène (en haut).

Les essais réalisés sur cette dalle nous permettent d'affirmer qu'une détection fiable des défauts internes nécessite un chauffage qui soit le plus uniforme possible. C'est pourquoi la technique du chauffage mobile est meilleure que celle du chauffage statique, bien que beaucoup plus difficile à mettre en œuvre en pratique sur chantier. De plus, il est apparu que lorsque les essais sont réalisés à l'extérieur, un jour froid et venteux, il est beaucoup plus difficile de repérer les défauts. Il est donc conseillé en extérieur de protéger la surface du vent durant l'auscultation.

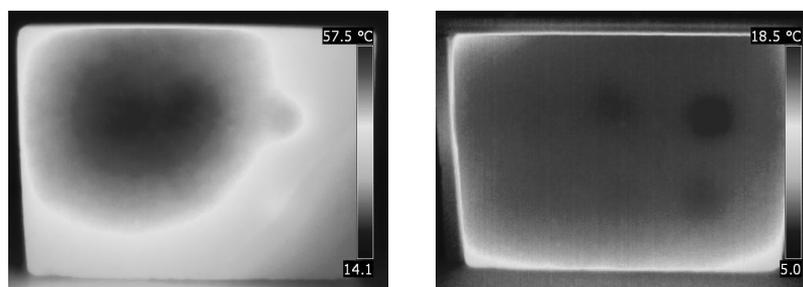


Figure 12 : Images infrarouges de la même dalle. Comparaison des deux techniques : chauffage statique (à gauche) et chauffage mobile (à droite). Cette dernière méthode permet d'obtenir une meilleure uniformité de chauffage et donc une meilleure détection des défauts.

2. Par thermographie passive

La thermographie passive utilise uniquement le rayonnement solaire ou le réchauffement naturel de l'atmosphère pour réaliser la sollicitation thermique du béton.

La dalle sur l'image infrarouge ci-dessous a été exposée aux rayons solaires pendant deux heures, en plein midi, un jour très ensoleillé de septembre. Les défauts les plus proches de la surface sont clairement visibles, ce qui prouve que la thermographie passive peut être utilisée pour détecter des nids de gravier dans des structures en béton.



Figure 13. : Image thermographique de la dalle : la seule source de chaleur utilisée est le rayonnement du soleil.

La thermographie passive a un avantage indéniable : c'est une technique de détection économique et écologique (puisque'elle ne nécessite aucun chauffage artificiel), et qui de plus fournit un chauffage parfaitement uniforme. Par contre, la puissance disponible est assez faible, et la technique est fortement dépendante des conditions météo, de l'orientation des surfaces à ausculter ou de la teinte du béton (en effet, 46 % de l'énergie du rayonnement solaire est constituée de lumière visible, et les zones sombres du béton absorbent davantage celle-ci que les zones claires).

Vérification de l'efficacité de la thermographie infrarouge par d'autres techniques de détection.

Une dalle de béton de grandes dimensions, contenant un défaut de type nid de gravier, a été étudiée par quatre méthodes différentes (thermographie, ultrasons, géoradar et carottage), afin de vérifier si les résultats fournis par la thermographie sont fiables et concordent avec les trois autres techniques.

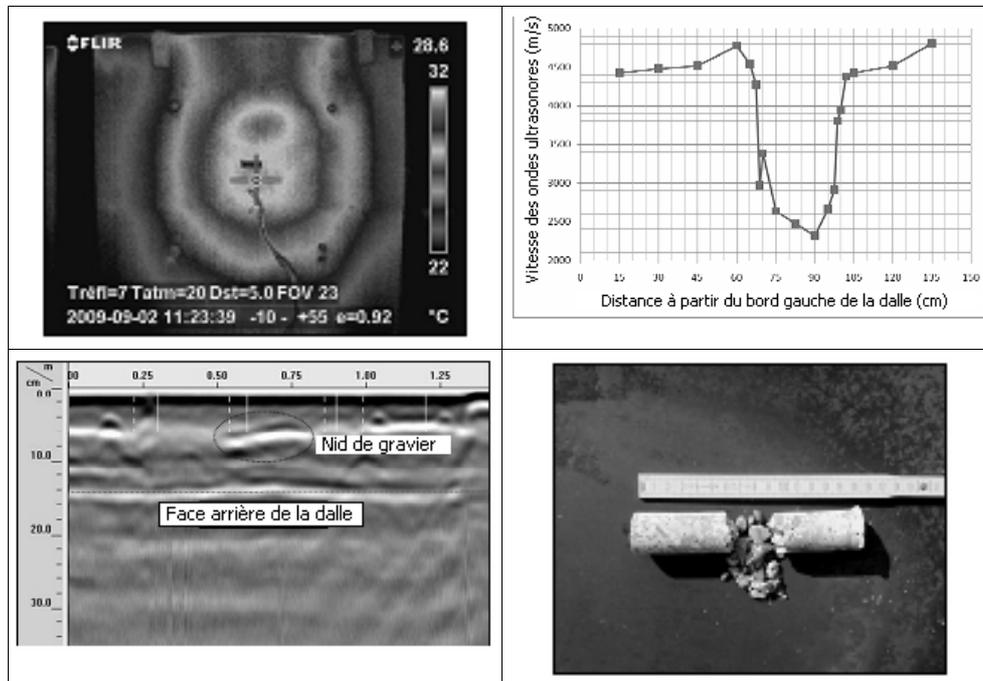


Figure. 14 : Résultats des quatre essais : thermographie infrarouge, ultrasons, radar et carottage.

Les résultats des quatre techniques concordent parfaitement et localisent le défaut exactement au même endroit. Cela nous montre que la thermographie donne des résultats aussi fiables que d'autres méthodes éprouvées pour détecter la présence de défauts internes de type nid de graviers dans des éléments en béton.

2.3 Étude d'une technique de traitement d'image temporel : la thermographie à phase pulsée.

La principale difficulté rencontrée dans le cadre de la détection des défauts dans les structures en béton par thermographie active est liée au système de chauffe. Pour obtenir une détection précise, la stimulation thermique à appliquer doit être la plus uniforme possible, ce qui n'est pas toujours aisé à réaliser en pratique. La thermographie à phase pulsée, appelée aussi PPT (pour Pulsed Phase Thermography), est une technique mathématique complexe, qui permet de convertir numériquement une séquence d'images

thermographiques prises à intervalles réguliers durant le refroidissement du béton, en une série d'images d'amplitude et de phase pour différentes fréquences. Le passage du domaine temporel au domaine fréquentiel se fait à l'aide de la transformée de Fourier. Le principal avantage de cette technique est d'être beaucoup moins dépendante des non-uniformités de chauffage et des variations de teinte et d'émissivité.

Cette technique est déjà étudiée depuis une quinzaine d'années mais n'est principalement appliquée que dans des domaines industriels pointus, comme l'aéronautique ou l'aérospatial. Les études précédentes ont principalement porté sur l'inspection de matériaux homogènes avec une haute conductivité thermique tels que l'aluminium ou le plexiglas, extrêmement éloignés des caractéristiques du béton, qui est un matériau hétérogène et dont la conductivité thermique est relativement faible. Ces différences impliquent que la durée d'analyse est fortement allongée : la durée du chauffage passe de quelques millisecondes à quelques minutes, tandis que la phase de refroidissement peut atteindre plus d'une heure.

Les premiers résultats ont été obtenus par simulation numérique. Conformément aux résultats de la littérature, nous avons constaté que les images de phase augmentaient la détectabilité des défauts en réduisant l'influence des non-homogénéités de chauffage. Par contre, les images d'amplitude n'apportent ici aucune amélioration.

D'autres essais ont été réalisés au laboratoire. La dalle test de la figure 11, contenant des défauts à 2, 4 et 6 cm de la surface, a été chauffée de manière uniforme (fig. 15 a, b et c) ou non-uniforme (fig. 15 d, e et f).

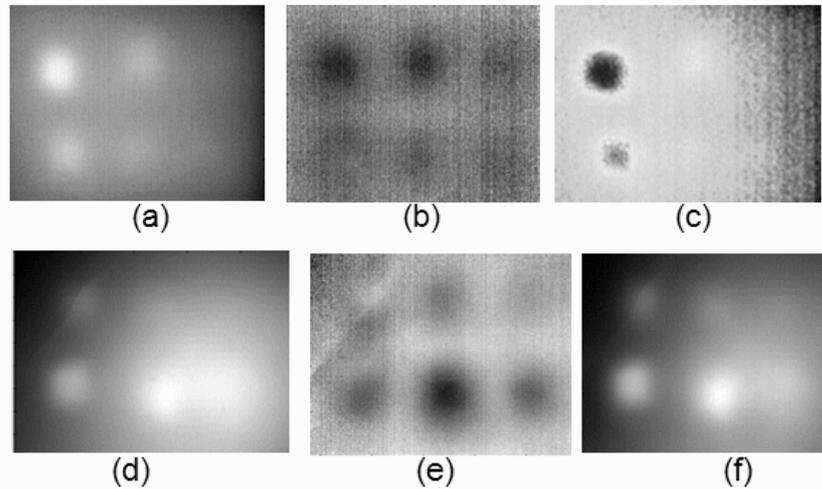


Figure 15 : (a), (d): images infrarouges ; (b), (e): images de phase à $3,7 \cdot 10^{-4} \text{ Hz}$; (c), (f): images d'amplitude à $3,7 \cdot 10^{-4} \text{ Hz}$

D'autres essais ont ensuite été exécutés en extérieur, avec la même dalle que précédemment mais sous l'influence des conditions climatiques réelles : les variations de puissance solaire ou de vitesse du vent durant l'expérience créent des perturbations dans la courbe de refroidissement qui nuisent à la détection des défauts. En outre, la dalle présente des zones plus foncées, qui absorbent plus d'énergie solaire et donc perturbent encore plus l'analyse. Les informations disponibles sur les images de phase sont donc réduites. Les défauts sont clairement visibles sur la première image de phase (fig. 16 c), mais ne le sont plus sur les images suivantes (fig. 16 d). Pour améliorer celles-ci, la courbe de refroidissement de chacun des pixels a été lissée (fig. 16 e et f).

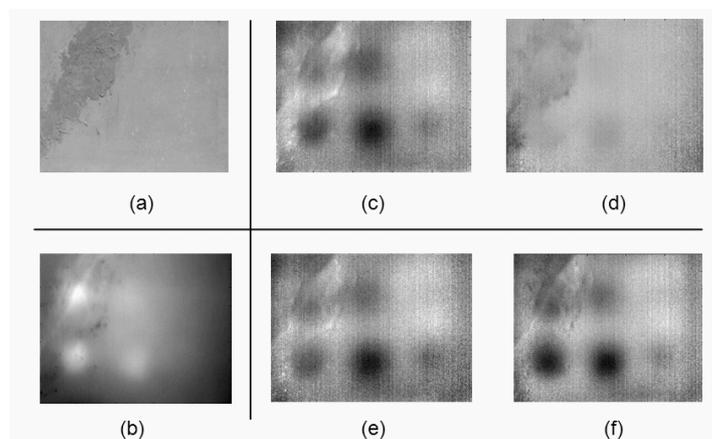


Figure 16 : Chauffage par radiateur. (a): photo de la dalle test; (b): image infrarouge ; (c) et (d): images de phase à $1,85 \cdot 10^{-4}$ Hz et $3,7 \cdot 10^{-4}$ Hz; (e) et (f): images de phase à $1,85 \cdot 10^{-4}$ Hz et $3,7 \cdot 10^{-4}$ Hz avec lissage.

Sur la figure 17 ci-dessous la PPT est testée avec une stimulation passive. La phase de refroidissement est amorcée en protégeant la dalle des rayons solaires. La faible puissance de chauffage explique pourquoi les défauts n'apparaissent que faiblement sur les images de phase (fig. 17 b et c). Par contre, les images d'amplitude (fig. 17 e et f) donnent ici d'une façon étonnante de très bons résultats permettant de mieux repérer les défauts que sur les images infrarouges ou les images de phase.

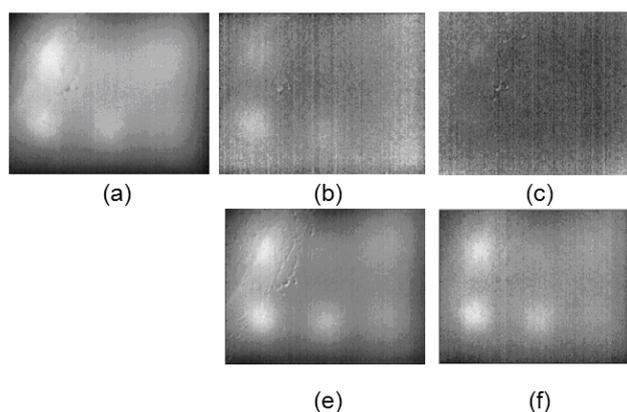


Figure 17 : Chauffage solaire uniquement. (a): image IR; (b) et (c): images de phase à $1,85 \cdot 10^{-4}$ Hz et $3,7 \cdot 10^{-4}$ Hz; (e) et (f): images d'amplitude à $1,85 \cdot 10^{-4}$ Hz et $3,7 \cdot 10^{-4}$ Hz.

2.4 Essais sur des ouvrages réels.

Stations d'épuration

Un des objectifs du projet est de concevoir une méthode fiable et rapide, permettant d'utiliser la thermographie infrarouge afin de dresser un plan d'ensemble des voiles d'une station d'épuration, sur lequel seraient mentionnées les zones défectueuses. Des défauts bien localisés pourraient être réparés immédiatement, ce qui réduirait les besoins de tests d'étanchéité par mise sous eau. Les surfaces des voiles des stations d'épuration peuvent atteindre des dimensions impressionnantes, entre cent et plusieurs milliers de mètres carrés. Leur épaisseur est de trente centimètres environ.

Des essais ont été effectués sur deux chantiers de stations d'épuration : le premier à Lives-sur-Meuse, près de Namur, et le second à Hamme-Mille, près de Wavre.

De nombreuses analyses ont été accomplies sur ces deux chantiers. Les voiles ayant été bétonnés avec le plus grand soin, les défauts y sont très rares. Après de nombreuses tentatives, une zone comportant un défaut présumé a été repérée par thermographie.

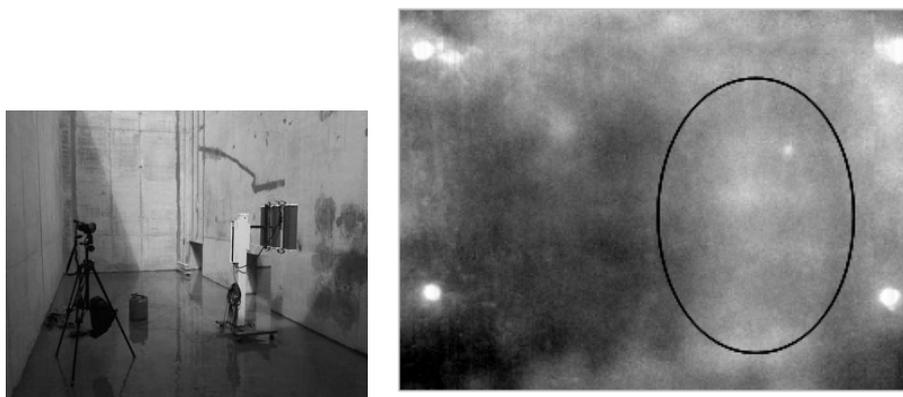


Figure 18 : Chantier de Lives-sur-Meuse. Une zone chaude apparaît sur l'image infrarouge, témoignant probablement de la présence d'un défaut interne.

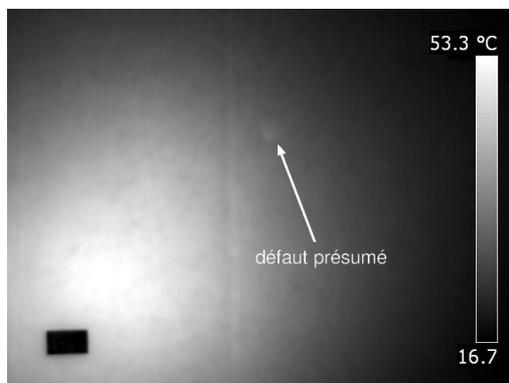


Figure 19 : Chantier de Hamme-Mille. Une anomalie thermique (désignée par la flèche) est apparue dans cette zone après chauffage. La non-uniformité de la chauffe (en bas à gauche de l'image) est très importante et même gênante.

Ponts

Pont de Moyen

Ce pont, situé dans la commune de Chiny, permet d'enjamber la Semois. Il est réalisé en béton armé et est composé de trois travées de respectivement 23,70m, 31,80m et 23,70m. Ce pont est connu pour comporter de nombreux nids de gravier fortement marqués.

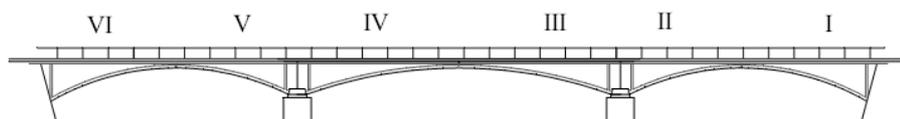


Figure 20 : Pont de Moyen : vue en élévation

Des analyses ont été effectuées par thermographie passive, soit par ensoleillement direct, soit en utilisant le réchauffement atmosphérique. Ils ont permis dans les deux cas de mettre en évidence les nids de gravier, pourtant invisibles à l'œil nu. Cet essai prouve une fois de plus l'intérêt d'utiliser la thermographie passive lorsque les conditions sont favorables.

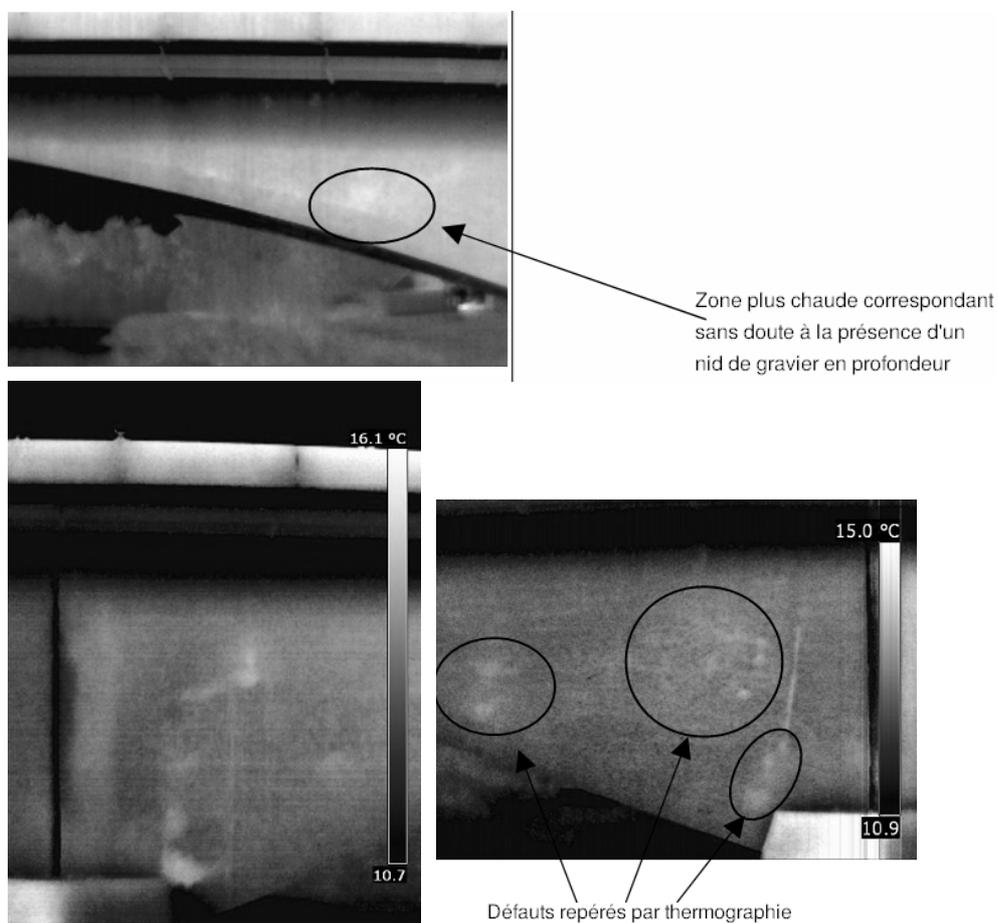


Figure 21 : Images infrarouges prises par thermographie passive sur le pont de Moyen. Les nids de gravier apparaissent plus chauds que les zones saines.

Une auscultation par ultrasons et par carottages localisés avait été réalisée par le SPW dans le passé, mettant en évidence la présence de nombreux nids de gravier. Les résultats ont été comparés aux images infrarouges et la concordance entre les résultats des deux essais est assez bonne.

Pont de l'A27 à Verviers

Il s'agit d'un pont à poutres en réparation. La face inférieure du tablier a été observée en fin d'après-midi. Ici, la chaleur traverse l'épaisseur du tablier durant la journée. Les zones comportant des délaminations freinent ce passage, ce qui crée des zones plus froides en face inférieure.

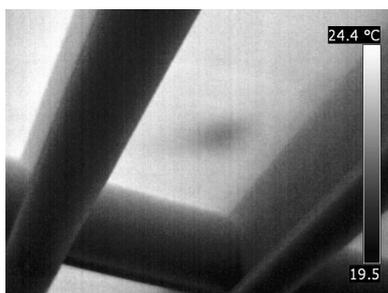


Figure 22 : Zone froide en sous-face du tablier, pouvant correspondre à une délamination.

Colonnes de bâtiment.

Des colonnes présentant des problèmes de décollement de portions de béton dus à la corrosion des armatures ont été observées par infrarouge. Les décollements, dont un grand nombre n'étaient pas visibles à l'œil nu, se sont révélés immédiatement sur les images thermiques. Il apparaît donc que les décollements de béton sont le type de défaut le plus facilement détectable par thermographie, sans nécessiter aucun chauffage artificiel.

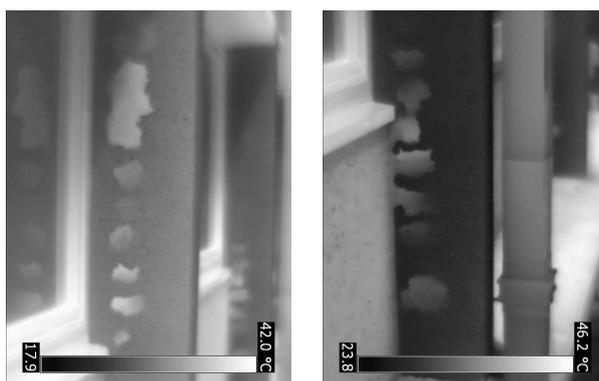
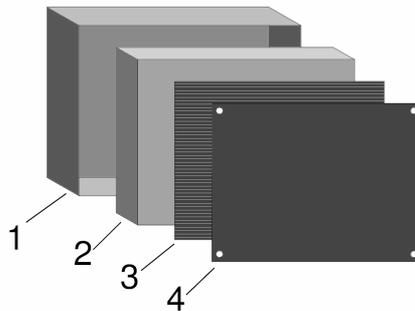


Figure 23 : Images infrarouges de colonnes de bâtiment. Les décollements de béton apparaissent particulièrement bien.

2.5 Conception et réalisation d'un nouvel appareil de chauffage

Les essais effectués sur chantier ont démontré qu'il était très difficile de chauffer une surface importante de béton d'une manière uniforme. Nous avons donc conçu et réalisé un prototype de caisson chauffant. Ce caisson, placé en face de la zone à ausculter et fonctionnant par rayonnement infrarouge, permet d'obtenir une chauffe beaucoup plus homogène et une puissance élevée. En effet, le chauffage infrarouge de type canon à chaleur fonctionnant au mazout possède des avantages intéressants, comme la simplicité d'utilisation et la portabilité, mais pose le problème d'un chauffage non-uniforme qui risque de diminuer la détectabilité des défauts. L'utilisation du caisson chauffant permet d'éliminer en partie ce problème.



*Figure 24 : Caisson chauffant : schéma de principe en vue explosée.
1. Caisson en aluminium – 2. Isolant en laine minérale – 3. Tissu chauffant électrique avec face adhésive – 4. Plaque métallique recouverte d'une peinture à haute émissivité*

3. Principales innovations du projet

Les trois principales innovations de cette recherche sont :

- L'utilisation de la thermographie infrarouge pour la détection des nids de gravier. Ceux-ci sont en effet beaucoup plus difficiles à détecter que des cavités remplies uniquement d'air.
- Les importantes dimensions et la courbure des voiles des bassins d'épurations, ainsi que le développement de la méthodologie à une échelle industrielle.
- Le développement de techniques de chauffage alternatives, permettant de prendre en compte les particularités des structures de génie civil : les variations d'émissivité ou de teinte, l'accessibilité de la zone étudiée ou l'influence des conditions climatiques.

4. Conclusion

Les résultats atteints jusqu'à présent sont très prometteurs et, tout en gardant à l'esprit les limitations de la technique, comme les perturbations dues au vent, les variations de teinte et d'émissivité et les non-uniformités de chauffage, les possibilités d'utilisation concrète de la thermographie pour détecter des défauts internes dans des structures en béton sont bien réelles.

La thermographie a montré dans cette recherche, que ce soit au laboratoire ou sur chantier, sa capacité à déterminer avec certitude la présence d'un défaut dans un élément en béton. La caractérisation précise de ce défaut (dimensions exactes, constitution ou profondeur) requiert toujours d'avoir recours à d'autres méthodes, comme les ultrasons ou le radar. Toutefois, l'observation thermographique préalable permet de réduire les surfaces à ausculter par ces méthodes, en ciblant les zones suspectes.

L'efficacité de la méthode sur le plan scientifique est prouvée. Les principaux problèmes restant à contourner sont donc principalement d'ordre pratique et économique : un chantier de construction ne permet pas d'utiliser n'importe quel matériel, et de plus, la technique doit rester rentable pour intéresser une entreprise de construction. Les méthodes développées jusqu'à présent devront encore être améliorées pour favoriser la rapidité de l'essai donc son intérêt industriel.

Ce projet de recherche a été présenté lors du QIRT 2010 (Quantitative Infrared Thermography International Conference) à l'Université Laval de Québec (Canada). Le résumé de la présentation est disponible sur :

<http://qirt.gel.ulaval.ca/archives/qirt2010/papers/QIRT%202010-099.pdf>

5. Sources

- [1] SPW, Direction générale des Routes et Bâtiments, Département des Expertises techniques, Direction de l'Expertise des ouvrages, Liège.
- [2] COUTURIER Jean-Pierre, *Analyse fréquentielle de la thermographie à phase pulsée*, Mémoire présenté à la Faculté des Études Supérieures de l'Université Laval, Québec, 1997.
- [3] IBARRA-CASTANEDO Clemente, *Quantitative subsurface defect evaluation by Pulsed Phase Thermography : Depth retrieval with the phase*, Université Laval, Québec, 2005.
- [4] MALDAGUE Xavier, *Theory and Practice of Infrared Technology for Nondestructive Testing*, Wiley Science, 2001.
- [5] SHAM FUNG CHU Janet, *Studies of using Infrared Flash Thermography (FT) for detection of surface cracks, subsurface defects and water-paths in building concrete structures*, City University of Hong-Kong, 2008.

6. Remerciements

Tout d'abord, un grand merci aux promoteurs de ce projet de recherche, MM. Christian RICHARD et Michel BERNARD ; ainsi qu'à tous les enseignants ayant apporté leur aide à ce projet.

Merci également à M. Pierre BONHOMME, partenaire industriel du projet ; et à M. Miikka VARHELAHTI, chercheur, pour leur participation à nos recherches.