

Le projet « DEFBETIR »

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

Chercheurs : Samuel PAEZ – Michaël NAHANT

1. Introduction

Ce projet de recherche, d'une durée totale de trois ans (de septembre 2007 à septembre 2010) est issu d'une demande, d'une part, de l'entreprise de construction Galère S.A., et d'autre part, du Service Public de Wallonie (Direction générale des Routes et Bâtiments, Département des Expertises techniques, Direction de l'Expertise des ouvrages) et du Centre de Recherches Routières ; respectivement partenaire industriel et partenaires scientifiques du projet. Comme tous les projets de recherche réalisés dans le cadre du programme "FIRST Haute École", ce projet a bénéficié d'un financement de la Région wallonne.

Ce projet vise le développement d'une méthode, basée sur le principe de la thermographie infrarouge, permettant de repérer les zones défectueuses dans des structures en béton. En effet, tant Galère que le SPW ou le CRR sont confrontés à la problématique de la détection des défauts dans les ouvrages en béton armé ou précontraint.

Ce projet a été mené en collaboration entre les Centres de recherche des Hautes Écoles Robert Schuman et Blaise Pascal. Un étudiant de la Haute École Robert Schuman, J. Van Leeuwen, a également participé au projet dans le cadre de son travail de fin d'études, pour ce qui concerne notamment la simulation numérique 3D et l'étude de la thermographie à phase pulsée.

2. Le contexte du projet

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 (apparition de « maladies » du béton : corrosion des armatures du béton armé, corrosion des câbles de précontrainte, désagrégation du béton, délaminations, phénomène de « pourrissement », entre autres), avec des conséquences pouvant 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 permettant d'établir un diagnostic précis des détériorations subies par les ouvrages d'art, sans endommager ces derniers (en tout cas le moins possible).

Il existe actuellement nombre de ces techniques ; on peut citer, entre autres, le sondage radar, le sondage par ultrasons, l'impact-écho, le calcul du potentiel de corrosion (ou encore « mapping potentiométrique »), la thermographie infrarouge... Toutes ces techniques ont certes des avantages, mais aussi plusieurs inconvénients qui les rendent encore difficile à mettre en œuvre à grande échelle dans un environnement industriel.

3. Le projet

3.1. L'identification des besoins des partenaires industriels et scientifiques

La constitution du projet et la détermination de ses objectifs s'est focalisée sur les besoins du partenaire industriel et des partenaires scientifiques.

Ceux-ci souhaitaient disposer d'une méthodologie générale, rapide, économique et fiable, ayant pour but la détection des défauts ou dégradations internes dans les ouvrages en béton armé, neufs ou plus anciens.

3.2. Choix de la méthode

Parmi les différentes techniques existantes de détection des défauts dans les ouvrages en béton, la technique de la thermographie infrarouge a été retenue dès le commencement du projet. En effet, cette technique, utilisée en tant que méthode non-destructive de localisation des zones défectueuses dans les structures de béton, présentait de nombreux avantages pour une utilisation industrielle :

- C'est une méthode sans contact, qui permet de travailler à quelques mètres de distance, à l'inverse de la plupart des autres méthodes d'auscultation des ouvrages en béton, telles que le radar ou l'impact-écho. Et bien évidemment, elle n'altère pas l'ouvrage étudié.
- Elle permet d'ausculter de grandes surfaces assez rapidement.
- Elle ne met pas en œuvre de rayonnements dangereux, contrairement à d'autres techniques parfois utilisées dans ce domaine (gammagraphie).
- Elle permet d'obtenir des résultats en temps réel sous forme d'images colorées, permettant une interprétation rapide et immédiate des résultats.

Les caméras infrarouges, dont les prix se démocratisent, trouvent là une belle opportunité d'utilisation, grâce à leur faculté d'opérer de façon non destructive et à distance. Dans le domaine qui nous préoccupe, le principe physique utilisé est le suivant : tout défaut situé sous la surface d'un élément en béton, et présentant une conductivité 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. C'est ce réchauffement local qui pourra alors être détecté par la caméra infrarouge, mettant ainsi en évidence la présence du défaut.

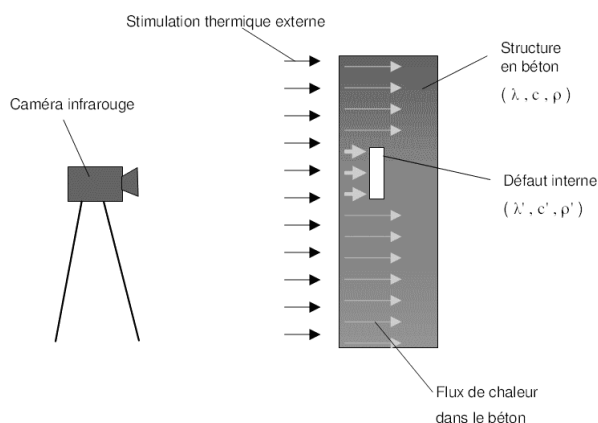


Fig. 1 : Schéma de principe de la méthode.

La surface du béton est chauffée par une source extérieure. Les défauts internes ont une conductivité thermique plus faible que celle du béton. Dans les zones saines, le flux de chaleur pénètre en profondeur dans le béton ; par contre, dans les zones défectueuses, la chaleur s'accumule en surface au droit du défaut. La caméra permet de repérer cet échauffement local et de détecter la présence du défaut.

Bien que les méthodes existantes de détection des défauts par thermographie présentait de belles opportunités dans le domaine du génie civil, leurs inconvénients majeurs nécessitaient des recherches complémentaires. Celles-ci ont été rendues possibles par le présent projet.

Celui-ci vise en effet à développer des méthodes de thermographie donnant lieu à des observations plus faciles à mettre en place, plus fiables et à meilleur rendement ; en ayant en permanence à l'esprit l'utilisation quotidienne sur chantier par l'entreprise.

3.3. Les ouvrages à ausculter

Suivant le souhait du partenaire industriel, les ouvrages à étudier dans le projet sont dans un premier temps les voiles 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.

En ce qui concerne les bassins d'épuration des eaux, la méthode développée doit permettre de détecter les défauts 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 imperfections 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.



Fig. 2: Vues de bassins de stations d'épuration en béton armé

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. Le but du projet est de 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, pour le partenaire industriel comme pour les partenaires scientifiques, est de mieux estimer l'étendue des réparations nécessaires et donc leur coût.



Fig. 3: Les ouvrages d'art en béton armé vieillissent et se dégradent (photo de gauche), nécessitant des réparations (photo de droite)

3.4. Intérêt de la recherche pour le partenaire industriel

Le partenaire industriel cite lui-même certains cas où l'intérêt industriel et économique de la recherche semble évident. La mise au point d'un système fiable de détection, d'identification et de caractérisation de défauts dans les bétons :

1. permettrait dans certains cas (p. ex. détection de défauts dans les bassins des stations d'épuration) de diminuer le nombre d'opérations coûteuses telles que les mises sous eau ;
2. permettrait, dans le cas de réparation d'ouvrages d'art, de mieux asseoir le diagnostic des défauts (nature, endroit exact, étendue, etc.) et ainsi, dans le souci d'une meilleure compétitivité,
 - d'éviter des méthodes d'investigation plus onéreuses et/ou plus destructrices,
 - de diminuer le risque d'erreurs de diagnostic, toujours coûteuses soit au client, soit à l'entrepreneur,
 - de permettre un calcul des coûts de réparation plus précis,
 - de raccourcir les durées d'intervention, et donc de gêne à la circulation,
3. permettrait de mieux savoir où effectuer des sondages,
4. permettrait enfin de détecter de façon précoce, et donc sans trop de conséquences économiques, les inévitables défauts dans la pose d'étanchéités.

De plus, outre l'intérêt économique direct, il y a également un impact positif sur la qualité même du travail et donc la durée de vie des ouvrages d'art.

4. La réalisation de la recherche

La recherche a été réalisée en plusieurs étapes. Tout au long de celles-ci, des réunions régulières entre le partenaire industriel, les partenaires scientifiques, le promoteur et le chercheur permettaient de faire le point sur l'avancée de la recherche et de faire correspondre au mieux le déroulement du projet avec les attentes de l'entreprise.

4.1. Études préalables

Une première phase a été consacrée à la recherche bibliographique. Le but de celle-ci était de rassembler tout ce qui existait dans le domaine du contrôle non-destructif des matériaux par thermographie. Il est ressorti de cette recherche que la méthode était déjà utilisée notamment en aéronautique pour repérer les défauts dans les métaux ou les matériaux composites, et dans le domaine du génie civil pour repérer les bulles d'air sous les chapes d'étanchéité des ponts.

La suite de l'étude s'est faite par modélisation numérique, en utilisant la technique des éléments finis, pour recréer un bloc de béton virtuel dans lequel on a inséré des défauts. Grâce à ce modèle, il a été possible de tester tous les paramètres d'auscultation en les adaptant à toutes les situations que l'on pourrait rencontrer en pratique.

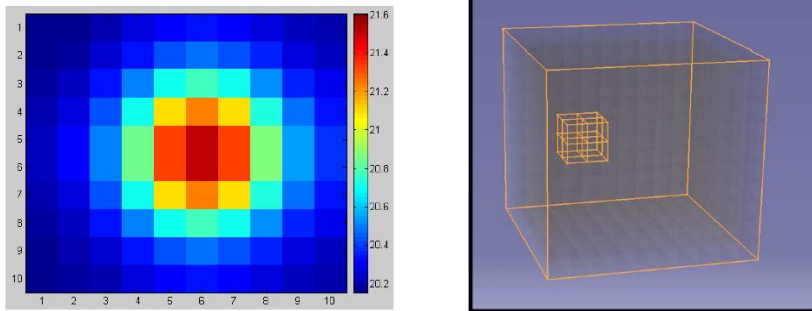


Fig. 4: Représentation du modèle numérique 3D utilisé dans le cadre de ce projet

4.2. Essais en laboratoire

D'autres essais ont ensuite été réalisés en laboratoire, sur une vingtaine de dalles dans lesquelles ont été insérés plusieurs types de défauts caractéristiques de ceux rencontrés en pratique sur les chantiers du partenaire industriel : nids de gravier de différentes densités, fissures minces, délaminations... Ces différentes dalles ont été analysées par thermographie à l'aide de méthodes de chauffage naturel (rayonnement solaire) ou artificiel.

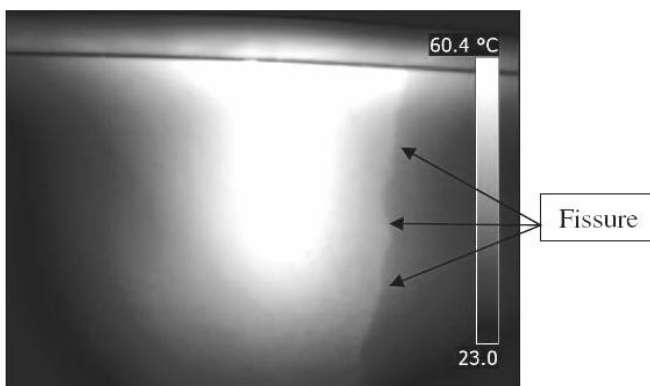


Fig. 5: Repérage de fissures au laboratoire. L'élément de béton est chauffé en partie centrale. Le flux de chaleur se diffuse parallèlement à la surface. Les fissures ralentissent ce flux de chaleur et donc apparaissent sur l'image infrarouge.

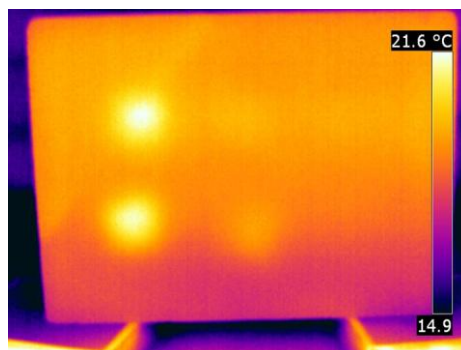


Fig. 6: Image infrarouge d'une dalle test en béton, contenant des défauts internes de type nid de gravier. Cette image a été prise après 20 minutes de chauffage et 5 minutes de refroidissement. Les défauts, complètement invisibles à l'œil nu, apparaissent parfaitement sur l'image infrarouge.

Les nombreux essais réalisés ont permis de déterminer notamment la distance idéale de la source de chaleur, dans le cas d'un chauffage actif, ou encore la différence de diagnostic selon que le test était effectué un jour nuageux ou un jour ensoleillé, dans le cas d'un chauffage passif (naturel).

4.3. Essais sur chantier

La suite des études s'est déroulée sur des chantiers du partenaire industriel : chantiers de stations d'épuration ou de réparation d'ouvrages d'art pour la plupart. Cette étape a permis de vérifier dans des cas réels et dans des conditions pratiques la méthodologie de détection développée en laboratoire.

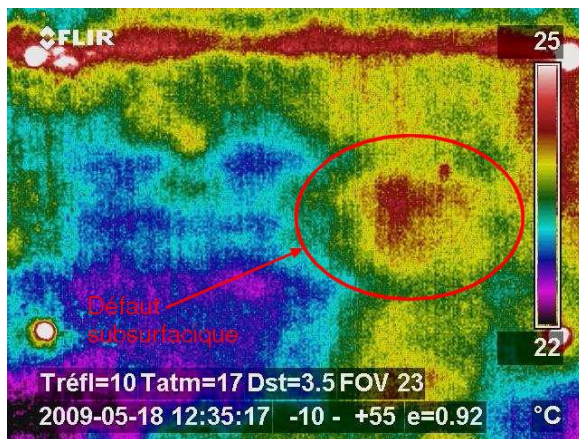


Fig. 7: Essais réalisés sur des chantiers de stations d'épuration. L'image infrarouge met en évidence la présence d'un défaut interne de type nid de gravier.

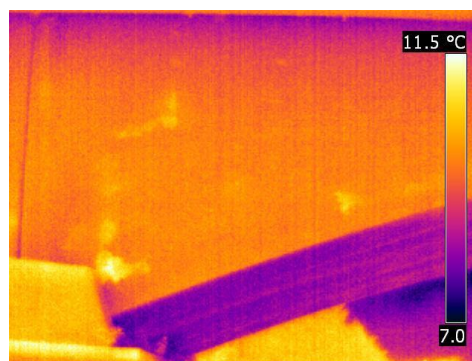


Fig. 8: Détection de nids de gravier internes par thermographie sur le pont de Moyen (Commune de Chiny)

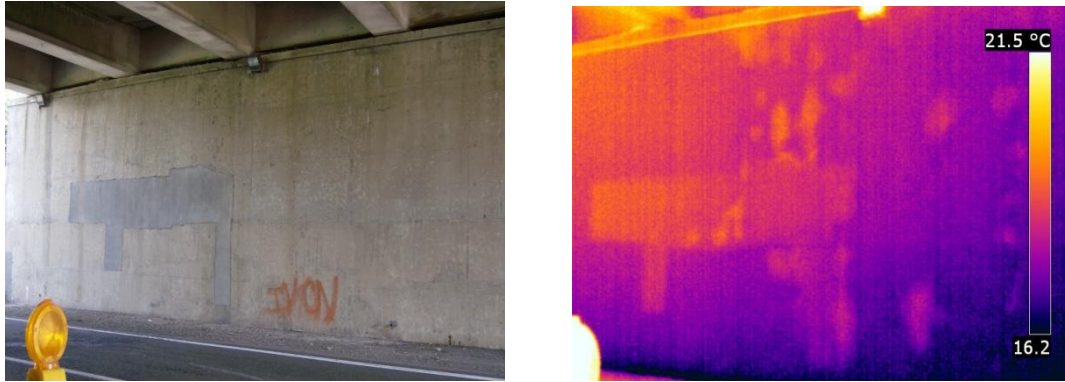


Fig. 9: Auscultation par thermographie infrarouge des culées d'un pont en travaux près de Bastogne. Des décollements de béton, invisibles à l'œil nu, apparaissent sur l'image infrarouge.

Un des problèmes rencontrés lors des essais était la non-uniformité du chauffage. En effet, la détection correcte des défauts internes, surtout sur chantier, nécessite une parfaite uniformité de la sollicitation thermique.

Plusieurs solutions ont alors été envisagées afin de résoudre ce problème.

La première d'entre elles a été une technique purement mathématique, la thermographie à phase pulsée, qui analyse l'évolution de la température dans le temps, et qui permet de compenser fortement les problèmes de différences de température. Un programme informatique a également été développé pour réaliser cette transformation à partir d'images infrarouges prises sur chantier. Malheureusement, ces méthodes, bien que donnant d'excellents résultats, demandent beaucoup trop de temps pour pouvoir être appliquées de manière efficace sur chantier.

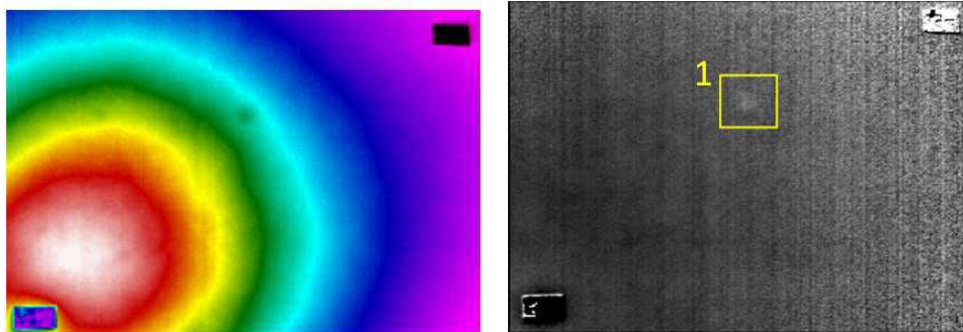


Fig. 10: L'application du principe de la thermographie à phase pulsée permet de réduire les non-uniformités de chauffage et de mettre en évidence la présence du défaut (image de droite)

4.4. Conception et réalisation d'un prototype de caisson chauffant

Une autre solution a alors été étudiée : la conception d'un système de chauffage qui permettrait une excellente homogénéité de la sollicitation, ce que ne permettent pas les modèles actuellement sur le marché. Plusieurs systèmes ont été imaginés pour obtenir ces caractéristiques de chauffe. Un caisson chauffant est apparu être la solution la plus adaptée. Après étude théorique, conception et dimensionnement, un prototype a été réalisé par le laboratoire du centre de recherche.

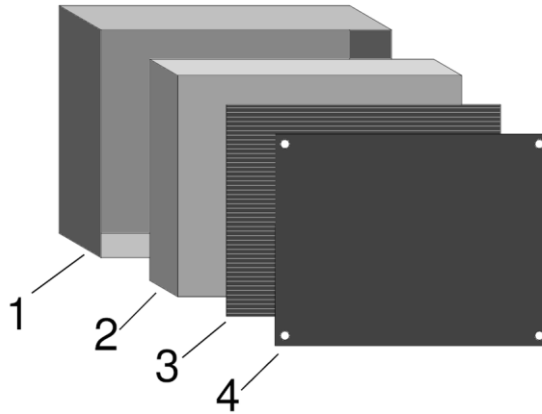


Fig. 11: Caisson chauffant : schéma de principe en vue explosée. 1. Caisson en aluminium – 2. Isolant en laine minérale – 3. Tissu chauffant électrique avec face adhésive – 4. Plaque métallique recouverte d'une peinture à haute émissivité

Ce caisson chauffant fonctionnant par rayonnement, placé en face de la zone à ausculter, permet d'obtenir à la fois une chauffe homogène et une puissance élevée, permettant d'augmenter la faculté de détection des défauts sur chantier.

Le caisson développé peut se concevoir de manière modulaire et donc s'adapter à des zones de différentes dimensions et même à des surfaces très étendues.

5. Les résultats de la recherche

La présente recherche a atteint une grande partie de ses objectifs, tant sur le plan scientifique qu'industriel.

Sur le plan scientifique, le présent projet a permis une meilleure connaissance théorique et pratique des comportements thermiques des défauts et/ou pathologies du béton, ainsi que de l'application de la thermographie au domaine du génie civil. Ces découvertes scientifiques dans ce domaine ont fait l'objet de plusieurs publications scientifiques.

Sur le plan industriel, les résultats suivants ont été obtenus, directement valorisables par les partenaires :

- La documentation précise de la méthodologie à respecter pour effectuer dans les meilleures conditions les analyses des ouvrages sur chantier : temps de chauffe, caractéristiques optimales du système de chauffage, distance et durée à respecter, et cela en fonction des conditions climatiques de l'essai ;
- Le développement d'outils logiciels permettant d'estimer la possibilité de détection thermographique des défauts dans des conditions données, ainsi que de réaliser le traitement numérique des images par thermographie à phase pulsée ou par dérivation logarithmique.
- La mise en évidence de la faculté de la thermographie infrarouge de détecter avec une excellente précision les décollements de béton dans les culées de ponts avant qu'ils ne soient visibles à l'œil nu, technique intéressant fortement le partenaire industriel car permettant un gain de temps appréciable par rapport à la méthode du sondage au marteau.
- Le développement d'un appareillage de chauffage innovant, conçu dans le cadre de ce projet ; ainsi que la réalisation d'un prototype, suivis de nombreux tests de validation exécutés avec succès.
- La conception théorique d'un système permettant d'utiliser le caisson chauffant développé à l'échelle industrielle, ainsi qu'une étude économique de sa rentabilité pour l'entreprise.

6. Publications liées au projet

- PAEZ Samuel, *DEFBETIR : Détection par infrarouge de la signature thermique des défauts et pathologies dans les structures de génie civil en béton*, Revue trimestrielle de l'AIDISIA de mars 2008, pp. 18-22. AIDISIA asbl, Arlon (Belgique), 2008.
- NAHANT Michaël, PAEZ Samuel, *Détection de défauts et de dégradations internes dans des ouvrages en béton armé par thermographie infrarouge*, Revue trimestrielle de l'AIDISIA de décembre 2009, pp. 18-22. AIDISIA asbl, Arlon (Belgique), 2009.
- NAHANT Michaël, PAEZ Samuel, VAN LEEUWEN Jérémy, *Detection by infrared thermography of the heat signature of diseases and defects in concrete structures of civil engineering*, Proceedings of the 10th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography (QIRT 10), pp. 197-204. Editions du CAO, Québec (Canada), juillet 2010. ISBN 978-2-9809199-1-6. Article concernant le projet disponible en ligne sur le site officiel du QIRT : <http://qirt.gel.ulaval.ca/archives/qirt2010/papers/QIRT%202010-099.pdf> et sur celui de NDTnet : <http://www.ndt.net/article/qirt2010/papers/qirt2010-099.pdf>
- PAEZ Samuel, NAHANT Michaël, VAN LEEUWEN Jérémy, *Détection par infrarouge de la signature thermique de défauts et pathologies dans les structures de génie civil en béton*, Revue Scientifique des Instituts Supérieurs Industriels Libres Francophones Belges (ISILF) n°25, pp. 57-82. SEGEC, Bruxelles (Belgique), mai 2011.
- VAN LEEUWEN Jérémy, NAHANT Michaël, PAEZ Samuel, *Study of Pulsed Phase Thermography for the Detection of Honeycombing Defects in Concrete Structures*, Online Workshop - NDT&E of Composite Materials - CompNDT 2011. NDTnet, Kirchwald (Allemagne), mai 2011. Document disponible en ligne sur le site de NDTnet : http://www.ndt.net/article/CompNDT2011/papers/19_Nahant.pdf
- LOIX-VILLERS Désirée, *À l'assaut des petits défauts*, Revue *La Galerie* n°22, pp. 20-21. Galère S.A. - BAM Wallonie, Chaudfontaine (Belgique), juin 2011.
- NAHANT Michaël, *Détection par infrarouge de la signature thermique des défauts et pathologies dans les structures de génie civil en béton*, Poster, 5th Pan American Conference for Non Destructive Testing - PANNDT 2011. PANNDT, Cancun (Mexique), octobre 2011. Disponible en ligne sur le site de NDTnet : http://www.ndt.net/article/panndt2011/papers/97_Nahant.pdf