

# **APTITUDE DE LA THERMOGRAPHIE INFRAROUGE À DÉTECTER LES FISSURES ET NIDS D'ABEILLE DANS LE BÉTON**

J. RHAZI, S. NAAR

Groupe de Recherche sur l'Auscultation et l'Instrumentation

Département de génie civil

Université de Sherbrooke

Sherbrooke (Québec) J1K 2R1

Jamal.Rhazi@USherbrooke.ca

## **RÉSUMÉ :**

Cet article a trait à la détection des fissures et nids d'abeille dans le béton armé. Une étude comparative entre les aptitudes du radar et de la thermographie infrarouge à détecter de tels défauts a été effectuée in situ sur une dalle de béton de 15 m de longueur, 15 m de largeur et 0,30 m d'épaisseur. Les résultats délivrés par la thermographie infrarouge sont présentés et comparés à l'analyse visuelle d'une trentaine d'échantillons de béton prélevés de la dalle.

La thermographie infrarouge s'est révélée beaucoup plus intéressante que le radar si l'on considère la rapidité de la prise des données. De plus, les résultats de la thermographie sont exploitables en temps réel. Par contre, l'analyse des données radar nécessite un traitement préalable des données, engendrant ainsi des délais entre la prise des mesures et l'obtention de résultats exploitables.

Globalement, toutes les anomalies thermiques révélées par la thermographie infrarouge ne se sont pas avérées correspondant à des défauts de mise en place du béton. De même, tous les défauts de mise en place du béton observés sur les carottes prélevées des dalles n'ont pas été détectés par la thermographie. La fiabilité de cette technique, dans le présent cas d'étude, est estimée être de l'ordre de 50 %.

## 1. INTRODUCTION

Une étude a été menée récemment par le Groupe de Recherche sur l'Auscultation et l'Instrumentation (Université de Sherbrooke) sur les aptitudes de la thermographie infrarouge et du radar à détecter les défauts de mise en place du béton.

Les essais ont été menés sur une dalle de béton de 15 m de longueur, 12 m de largeur et 30 cm d'épaisseur. Cette dalle contient deux rangées d'armature situées à 7 cm et à 25 cm de la surface.

Des échantillons de béton prélevés de la dalle par carottage ont révélés l'existence, dans certaines parties de la dalle, de nids d'abeille, d'un mauvais enrobage de la première rangée d'armature et de vides sous la deuxième rangée d'armature. Les résultats des investigations par thermographie infrarouge sont présentés dans cet article.

## 2. PRINCIPE DE LA THERMOGRAPHIE INFRAROUGE

Lorsqu'un matériau est sollicité thermiquement (ex. réchauffement de façon naturelle par le soleil), la chaleur diffuse dans le matériau. La présence d'un défaut au sein du matériau (ex. une fissure) agit comme un isolant thermique et ralentit cette diffusion. Il s'en suit l'apparition d'une zone plus chaude en surface par rapport au matériau voisin dépourvu d'anomalie.

Les relevés de thermographie permettent, justement, d'obtenir, au moyen d'une caméra sensible aux rayonnements infrarouges, une image 2D mettant en évidence les variations de la température à la surface du béton. Celles-ci peuvent être causées par des variations de la porosité du béton (défauts étendus) et/ou par la présence de vides au sein du béton (défauts localisés).

Pour qu'une anomalie puisse être détectée par thermographie, le contraste de température entre les zones saines et la zone problématique doit être idéalement d'au moins 0,5 °C. D'autre part, si le diamètre du défaut est faible et sa profondeur est grande, la chaleur diffuse autour du défaut en le contournant. Le contraste de température en surface entre la zone problématique et la zone saine est dans ce cas réduit, ce qui rend difficile la détection du défaut par thermographie. De façon générale, la dimension latérale d'un défaut détectable doit être au moins trois à quatre fois sa profondeur<sup>1</sup>. Ainsi, la détection d'un vide de 9 cm de diamètre n'est fiable que lorsque ce vide est situé à une profondeur inférieure à 3 cm.

L'essai de thermographie infrarouge est normalisé. La norme existante (ASTM D4788-88 « Detecting Delamination in Bridge Decks Using Infrared Thermography ») concerne toutefois les conditions d'utilisation de cette technique pour la détection de la délamination dans les dalles des tabliers de ponts. Il y est notamment précisé que la surface doit être exempte de tout débris et que les mesures doivent être effectuées par un ciel dégagé au moins 24 h après des précipitations.

---

<sup>1</sup> T. Lüthi (1998), Infrared Thermography, Materials and Structures, Vol. 31, pp 188-189

### **3. RELEVÉS DE THERMOGRAPHIE SUR LA DALLE**

Les mesures par thermographie ont été réalisées de 8h à 17h. Au cours de cette journée d'auscultation, la température ambiante a atteint 24 °C durant l'après midi. Plusieurs images thermiques ont été prises à l'aide d'une caméra infrarouge manufacturée par la compagnie américaine FLIR Systems (modèle : ThermaCAM® PM 575, résolution : 0,1 °C). Les essais thermiques se sont déroulés à différentes périodes de la journée afin de permettre de rehausser la probabilité de détection de vides situés en profondeur.

### **4. RÉSULTATS DES RELEVÉS DE THERMOGRAPHIE INFRAROUGE**

Les résultats des relevés thermiques sont donnés ci-dessous sous la forme d'images thermiques représentant la distribution de la température apparente, en degré Celsius (°C), à la surface des sections de la dalles contrôlée. L'échelle de température choisie pour décrire la variation de la température à la surface de la section auscultée est une échelle en couleur qui associe aux températures de surface les plus élevées (zones potentiellement problématiques) la couleur rouge-blanche et aux températures les plus basses (zones à priori saines) la couleur bleue.

La figure 1 est une photographie de la dalle. Les emplacements des 43 carottes prélevées de cette dalle sont indiqués sur cette photo ainsi que leur numéro d'identification. Ces numéros ont été inscrits sur la photo au moyen de différentes couleurs correspondantes à divers états visuels des carottes. Le tableau 1 ci-dessous donne la synthèse des observations visuelles effectuées sur ces carottes.

On constate, selon la figure 1, que le béton de la moitié supérieure de la dalle est en bon état et est exempt de tout défaut de mise en place. Le carottage indique que les zones problématiques sont situées sur le côté droit et le côté gauche de la moitié inférieure de la dalle. Les deux sections de béton sciées sur le côté droit (fig. 1) ont même révélées l'absence de béton sous la deuxième rangée d'armature. La carotte numéro 28 prélevée dans cette zone indique aussi l'absence de béton sous la deuxième rangée d'armature.

Afin d'étudier les possibilités de la thermographie à mettre en évidence les défauts de mise en place du béton de la dalle, l'analyse des images thermiques collectées sur cette dalle a été effectuée en se basant sur les observations effectuées sur les carottes.

La figure 2a est l'image thermique de la moitié inférieure de la dalle collectée à 15 h 00. La température de la surface s'étend entre 24,5 °C et 32 °C, soit une variation de 8,5 °C. Cette variation est large et ne permet pas d'apprécier l'importance relative d'une anomalie par rapport à une autre.

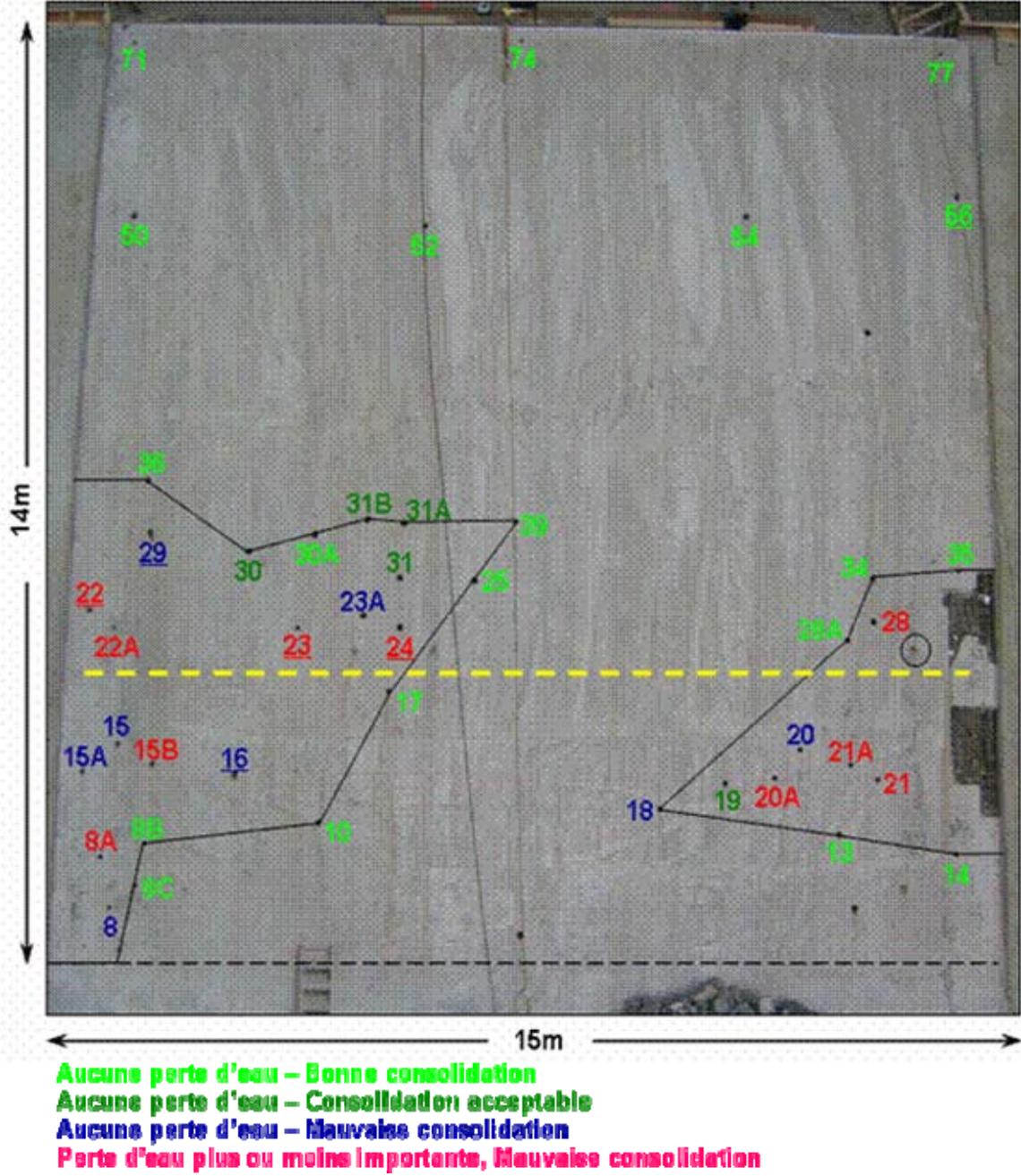


Figure 1 : Emplacement et des échantillons de béton prélevés de la dalle

**TABLEAU 1 : ÉTAT DES CAROTTES PRÉLEVÉES DE LA DALLE**

| Nombre de carottes | Observation  |
|--------------------|--|
| 20                 | Aucune perte d'eau durant le carottage<br>Béton bien consolidé                                   |
| 5                  | Aucune perte d'eau durant le carottage<br>Consolidation du béton acceptable                      |
| 8                  | Aucune perte d'eau durant le carottage<br>Consolidation du béton mauvaise                        |
| 10                 | Perte d'eau plus ou moins importante durant le carottage<br>Consolidation du béton très mauvaise |

Afin de mieux faire apparaître les anomalies thermiques et les mettre en évidence selon leur importance, l'échelle de température de l'image de la figure 2a a été réduite en maintenant fixe la valeur maximale de la température (32 °C) et en augmentant la valeur minimale de la température. Ainsi,

- l'image de la figure 2b a une échelle de température variant entre 27 °C, et 32 °C, soit un écart de 5 °C
- l'image de la figure 2c a une échelle de température variant entre 28 °C, et 32 °C, soit un écart de 4 °C
- l'image de la figure 2d a une échelle de température variant entre 29 °C, et 32 °C, soit un écart de 3 °C.

La figure 2 indique que la température la plus élevée est observée au sein de la zone comprise entre les forages 22 et 15. Une zone chaude apparaît aussi sur le côté droit de la dalle, au niveau du forage 28, et à droite du forage 21. Ce résultat est en accord avec les observations effectuées sur ces carottes qui indiquent une mauvaise consolidation du béton à ces endroits. Toutefois, la figure 2 montre que les endroits de la dalle qui ont été jugés problématiques au moyen des carottages n'ont pas tous été détectés par thermographie (ex. forage 16, 24, 20A). Ceci peut être expliqué par le fait que les défauts dans la dalle sont parfois de faibles dimensions et situés en profondeur. Dans certains cas, l'anomalie constatée sur les carottes est une porosité macroscopique qui ne conduit pas forcément à un réchauffement local significatif du béton (ex. carottes 15B, 23 et 18).

#### **a) Analyse thermique du côté droit**

La figure 3 donne l'image thermique de la zone délimitée par les forages 14-13-18-20A et prise à 15 h 00. La figure 3a est l'image thermique avec une échelle de température variant entre 24 °C et 30 °C. La figure 3b est la même que la figure 3 a mais avec une échelle de température réduite (27 °C à 29 °C) de manière à mieux visualiser les zones problématiques. Les constatations suivantes peuvent être effectuées à partir de ces images :

- La surface la plus chaude se situe à droite du forage 21. Le béton de cette portion de la dalle est vraisemblablement problématique et il est fort probable qu'un vide important se trouve à cet emplacement.

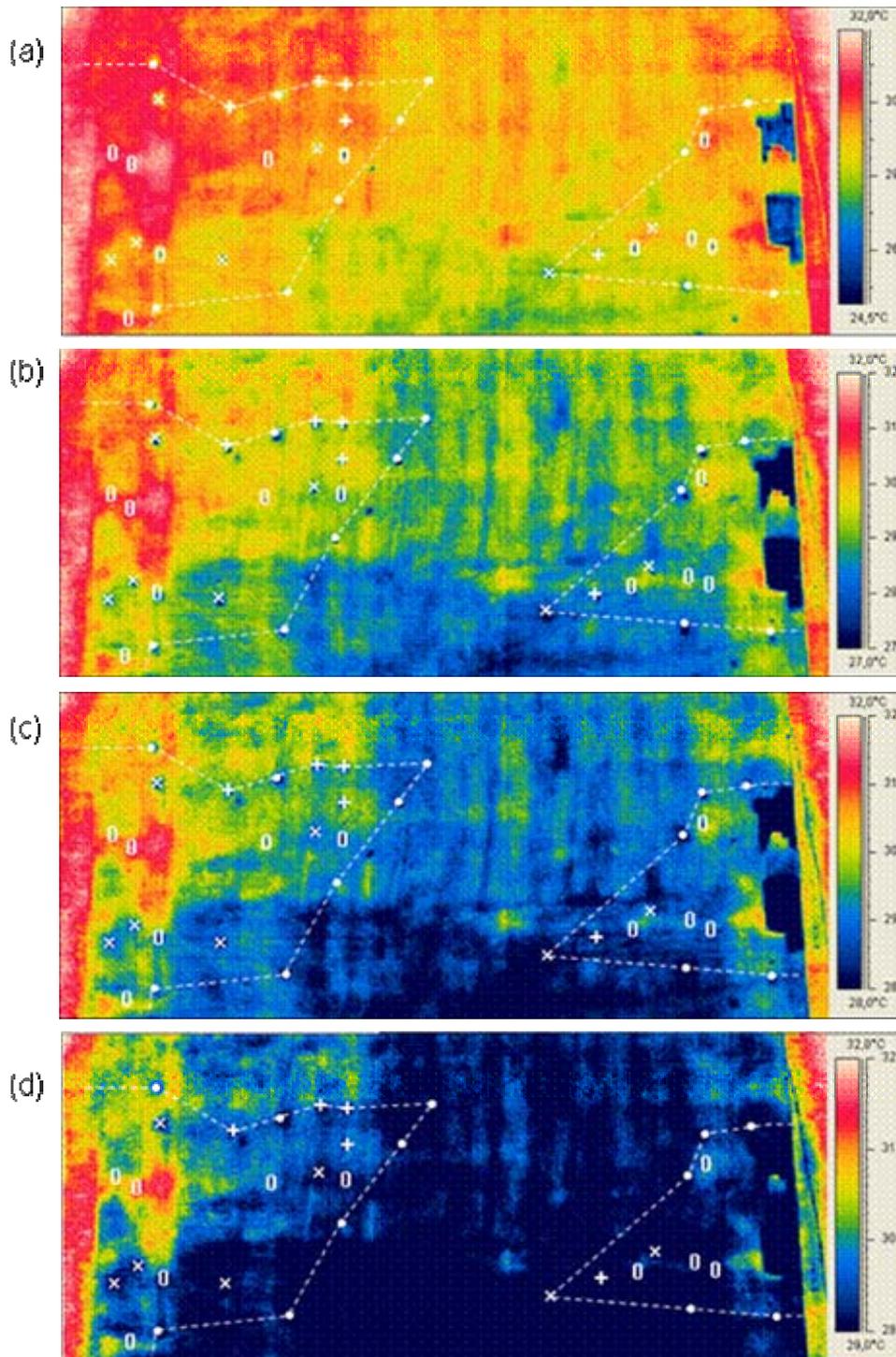


Figure 2 : Images thermiques de la moitié inférieure de la dalle

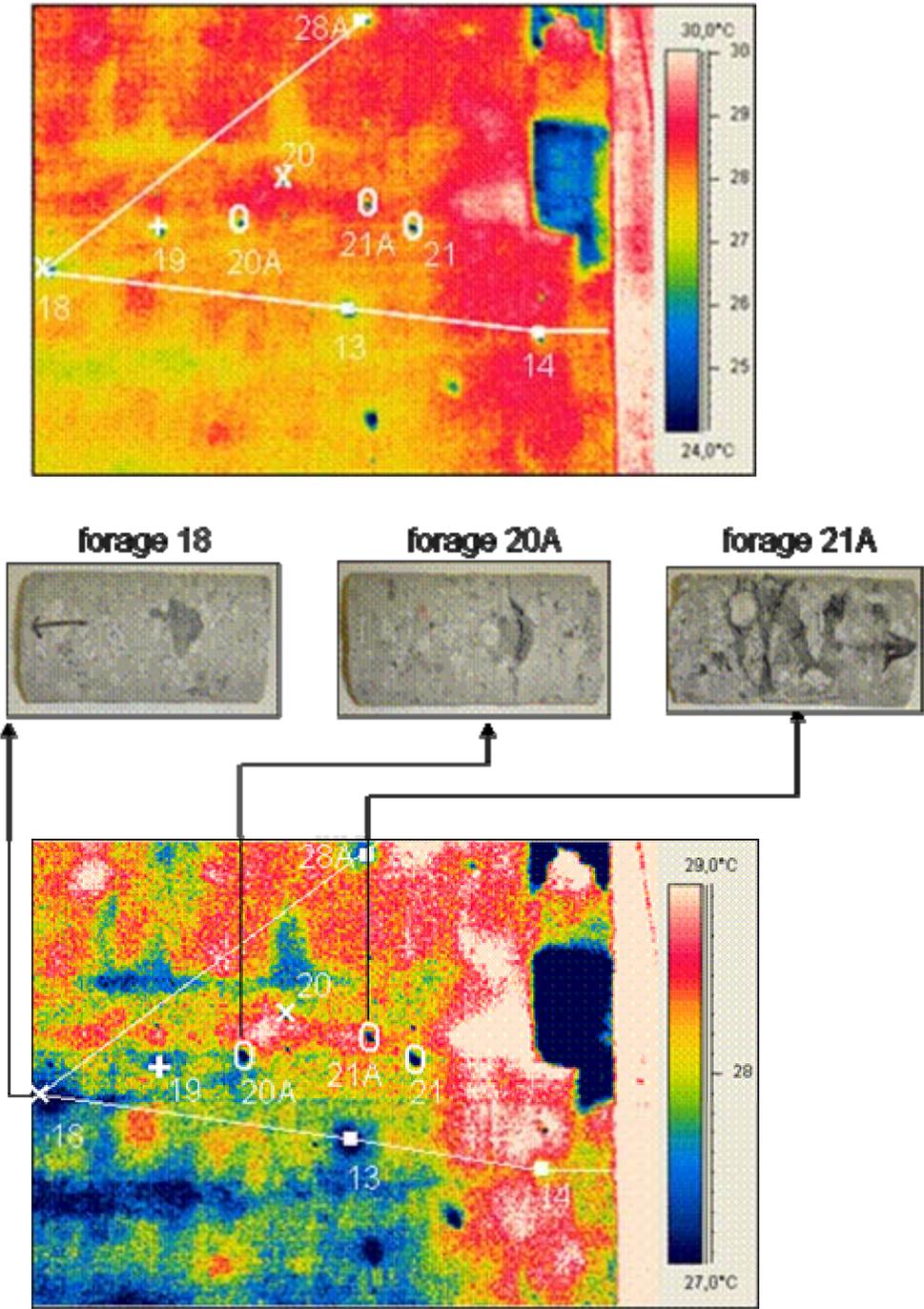


Figure 3 : Images thermiques de la partie inférieure du côté droit de dalle.

- Le forage 14 se situe dans une zone dont la température est supérieure à la température moyenne de l'image. Le béton à cet endroit est donc à priori problématique. Toutefois, le rapport de carottage indique que la qualité du béton de cette carotte est bonne
- Le forage 13 se situe dans une zone dont la température est plus faible que la température moyenne. Le béton à cet endroit est à priori bien consolidé. Ceci est en accord avec le rapport du carottage
- Le forage 18 se situe dans une zone où la température est plus faible que la température moyenne. Le béton à cet endroit est à priori bien consolidé. Le rapport du carottage mentionne que la consolidation du béton de cette carotte est mauvaise. Toutefois, la photographie de la carotte indique un vide ponctuel à 14 cm sous la surface. Ce vide n'est pas assez important pour engendrer une anomalie thermique à la surface.
- Le forage 28A se situe dans une zone où la température est plus faible que la température moyenne. Le béton à cet endroit est à priori bien consolidé. Ceci est en accord avec le rapport du carottage.
- Le forage 21 se situe à un endroit qui, selon l'image thermique, n'est pas problématique. Ceci est également indiqué sur deux autres images thermiques plus focalisées sur cette zone et données à la figure 4. Le rapport de carottage indique toutefois une perte d'eau à cet endroit et une mauvaise consolidation du béton à partir de 15 cm.
- Le forage 21A se situe dans une zone où la température est plus élevée que la température moyenne (fig. 3). Cette zone est donc potentiellement problématique. Le rapport de carottage mentionne également une perte d'eau importante à cet endroit et une mauvaise consolidation du béton, comme le montre la photographie de la carotte prélevée de ce forage.
- Le forage 20 se situe sur le périmètre d'une zone où la température est plus élevée que la moyenne (fig. 3 et 4). Le rapport de carottage ne fait état d'aucune perte d'eau à cet endroit mais précise que la consolidation du béton de cette carotte est mauvaise.
- Le forage 20A se situe aussi sur le périmètre d'une zone où la température est plus élevée que la moyenne (fig. 3 et 4). Le rapport de carottage mentionne une perte d'eau entre 13 et 15 cm et une mauvaise consolidation du béton à partir de 13 cm. La photographie de la carotte prélevée de cet endroit montre une fissure et un vide comparable à celui observé sur la carotte 18.
- Le forage 19 se situe dans une zone où la température est plus faible que la température moyenne, c-à-d dans une zone saine. Ce résultat est en accord avec le résultat du carottage qui mentionne une consolidation acceptable du béton et ne révèle aucune perte d'eau lors du carottage.

La figure 5 est une image thermique de la section de la dalle située au nord des forages 20 et 21 A. Dans la figure 5a, l'image est représentée sur une échelle de température allant de 24 °C à 30 °C, alors que l'échelle de température de la figure 14b varie entre 27 °C et 29 °C. Les observations effectuées à partir de ces images sont les suivantes :

- La température de la surface au niveau des forages 28A, 34 et 35 est supérieure à la température moyenne. Ceci est également indiqué sur deux autres images thermiques prises à cet endroit de la dalle (fig. 6). Cependant, selon le rapport de carottage, la consolidation du béton à ces endroits est bonne et aucune perte d'eau n'a été constatée durant le carottage. Il y a donc ici un désaccord entre les relevés thermiques et l'état réel des carottes.
- Le forage 28 se situe dans une zone dont la température est la plus élevée (fig. 5). Le béton de ce forage est devrait donc être mal consolidé. Le rapport du carottage révèle effectivement que la qualité du béton à cet emplacement est mauvaise et qu'une perte d'eau

importante a été constatée durant le carottage. La photographie de la carotte montre aussi l'absence de béton sur une grande partie de inférieure de cette carotte (fig. 5).

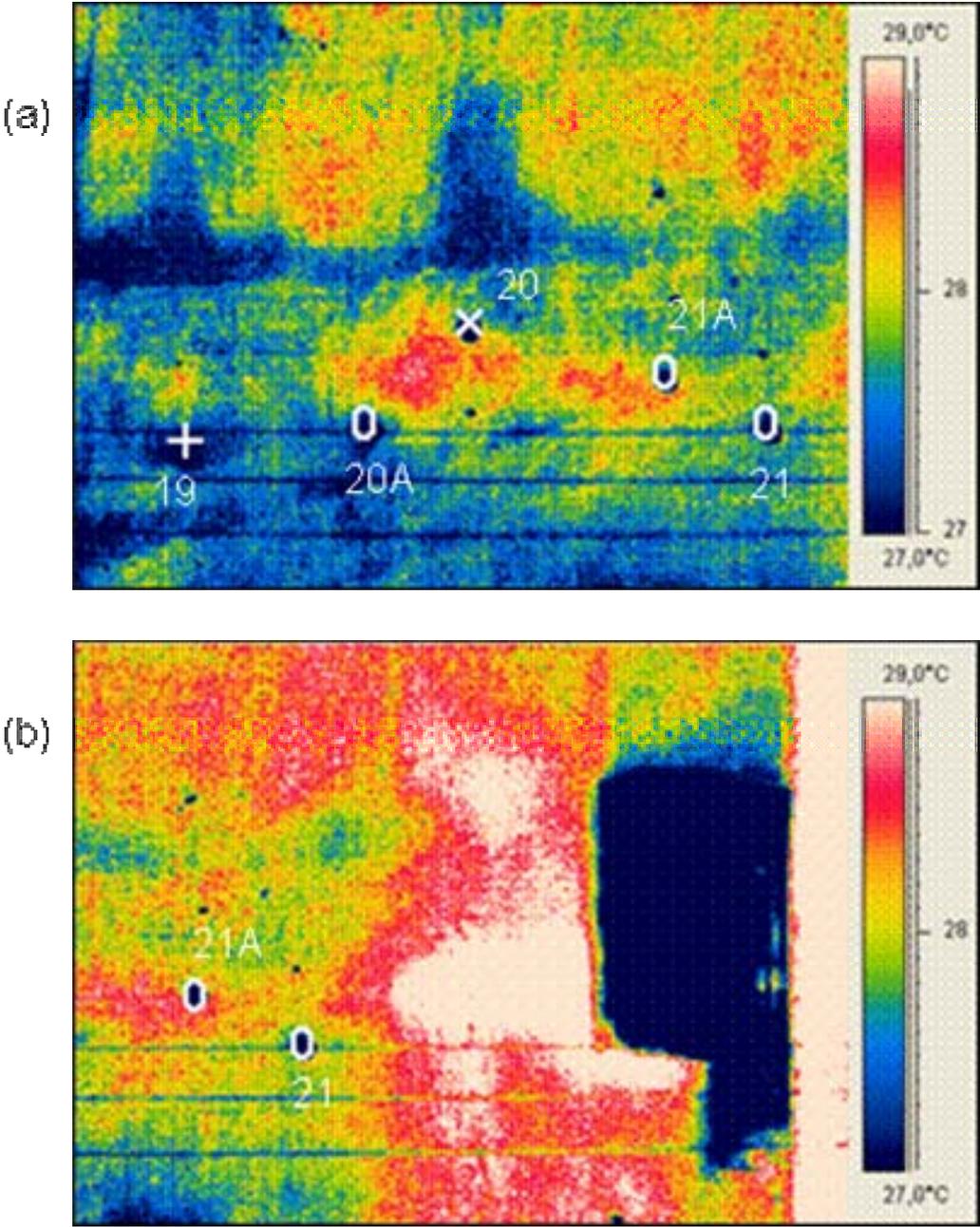


Figure 4 : Autres images thermiques de la partie inférieure du côté droit de dalle

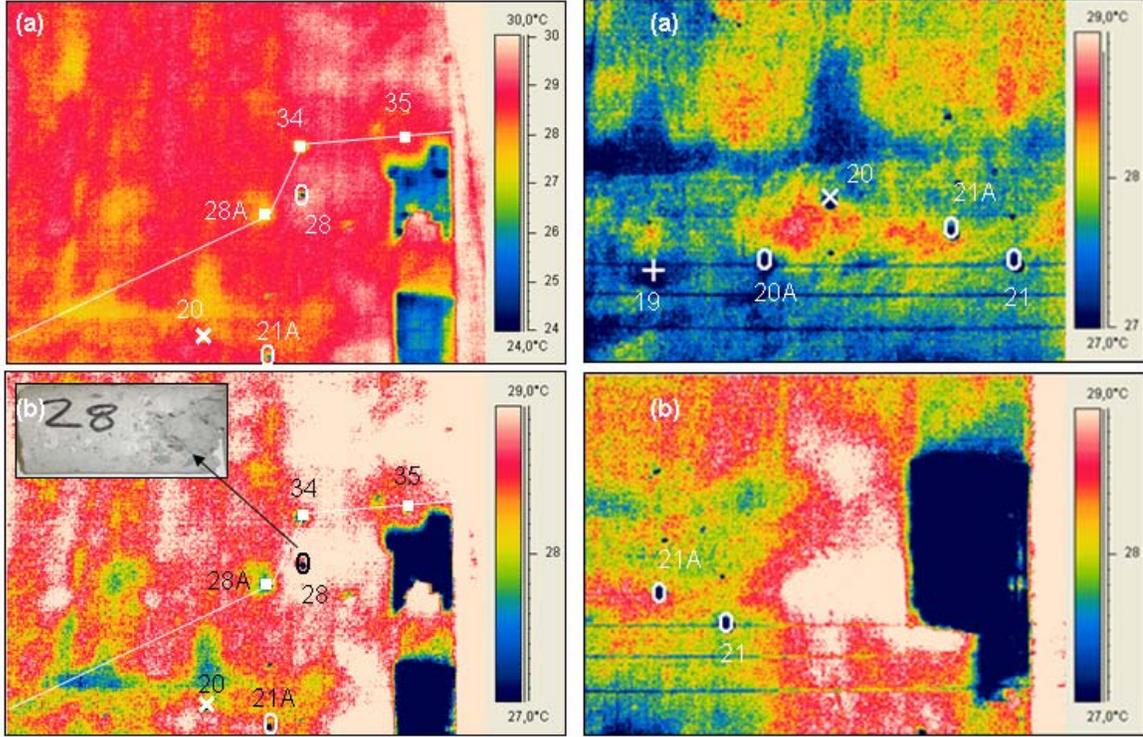


Figure 5 : Images thermiques de la partie supérieure du côté droit de la dalle

Figure 6 : Autres images thermiques de la partie supérieure du côté droit de la dalle.

### b) Analyse thermique du côté gauche

Les figures 7a, 7b et 7c donnent les images thermiques prises à 15 h 00 sur le côté gauche de la moitié inférieure de la dalle. L'analyse de ces figures montre que :

- La température de la surface la plus élevée est contenue dans une zone verticale qui s'étend du forage 36 au forage 15 et est maximale au niveau du forage 22A. Cette zone apparaît donc comme étant la plus susceptible de contenir des anomalies. Selon le rapport de carottage, seule la carotte prélevée du forage 36 est de bonne qualité. Les carottes prélevées des forages 22, 22A est 29 indiquent que la consolidation du béton est mauvaise. Le résultat thermographique est donc globalement concluant.
- La température de la surface au niveau des forages 15, 15A, 15B et 16 est inférieure à la température moyenne. Toutefois, la consolidation du béton de ces carottes est mauvaise.
- La température de la surface au niveau des forages 30, 30A, 31A, 31B est légèrement supérieure à la température moyenne. Le carottages indique que la consolidation du béton de ces carottes est bonne (carotte 30A) ou acceptable (carottes 30, 31A et 31B). Le résultat thermique peut être considéré ici comme mi-concluant.

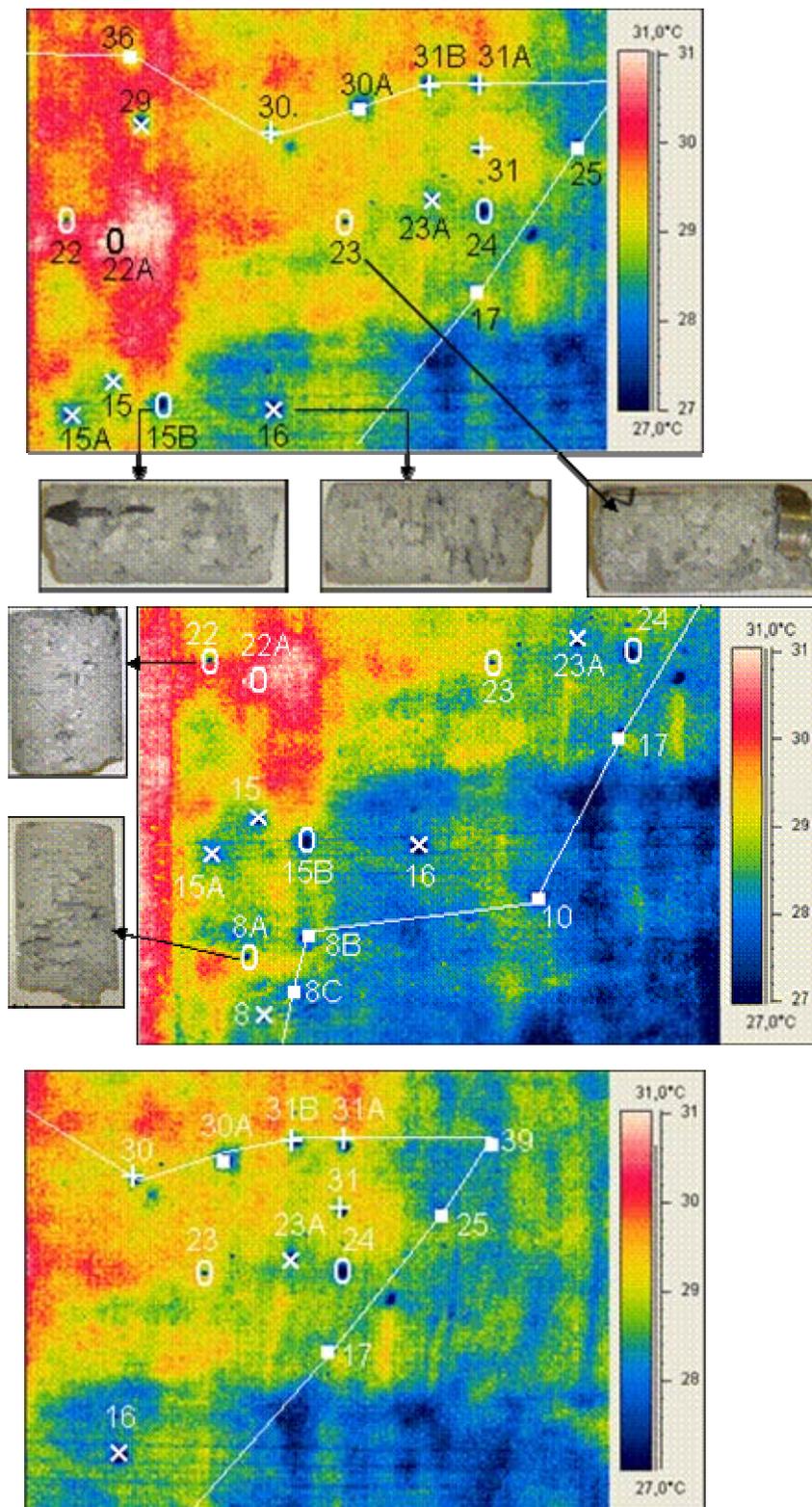


Figure 7 : Images thermiques de la partie gauche de la dalle

- La température de la surface au niveau des forages 10, 17, 25, 39 est inférieure à la température moyenne. Ceci peut-être interprété comme une bonne consolidation du béton. Le rapport de carottage indique également que la consolidation du béton de ces carottes est bonne.
- La température de la surface au niveau des forages 23 et 24 est inférieure à celle enregistrée au niveau du forage 22 et 22A, même si la consolidation du béton extrait de ces quatre forages est qualifiée de mauvaise. Ceci peut être logiquement expliqué par le fait que le béton au niveau des forages 22 et 22A est plus problématique que celui extrait des forages 23 et 24.
- La température au niveau du forage 23 est supérieure à celle enregistrée au niveau du forage 24. Ceci est observé aussi bien sur la figure 7 que sur la figure 8 qui donne deux autres images thermiques de cette partie de la dalle. Ce constat peut être corrélé aux informations fournies dans le rapport du carottage qui indiquent, pour le forage 23, une récupération de 15 cm, une perte d'eau à partir de 8 cm et un manque total d'enrobage de l'armature (fig. 7) et, pour le forage 24, une récupération de 23 cm et un enrobage partiel de l'armature. L'état du béton du forage 23 est donc plus mauvais que celui du forage 24, ce qui explique cette différence des températures au niveau de ces deux forages.
- La température au niveau du forage 23A est comparable à celle enregistrée au niveau du forage 24 (fig. 7 et 8). La consolidation du béton est qualifiée de mauvaise et l'acier est partiellement enrobé.
- La température au voisinage du forage 31 est supérieure à la température moyenne, et est supérieure à la température au niveau des forages 23A et 24. Cela indique donc que le béton à cet emplacement est plus mauvais. Toutefois, le rapport de carottage indique que la consolidation du béton est acceptable et qu'aucune perte d'eau n'a eu lieu durant le carottage. Le résultat observé ici pourrait être associé à la présence d'un plan de faiblesse dans le béton; la longueur de la carotte extraite de ce forage (12 cm) étant la plus petite carotte prélevée de la dalle.

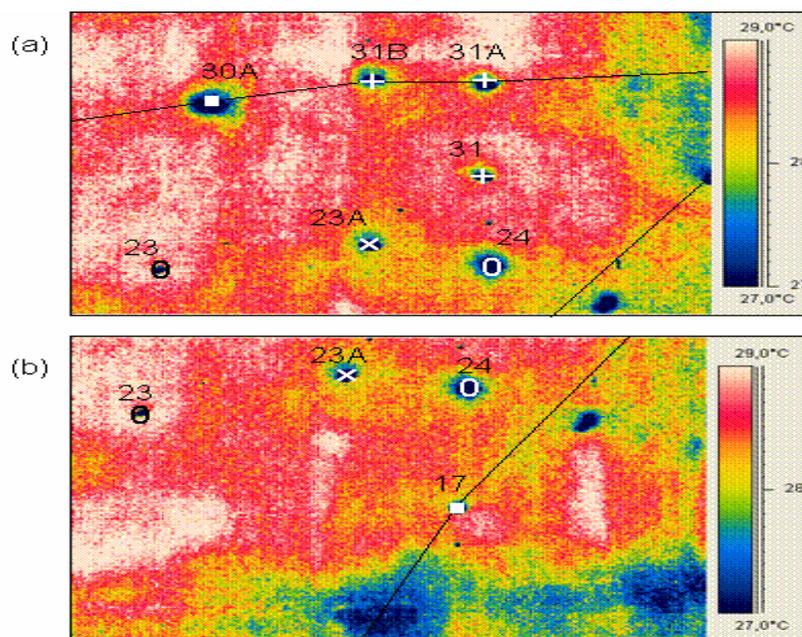


Figure 8 : Images thermiques de la partie supérieure du côté gauche de la dalle

## **5. CONCLUSIONS DE L'ÉTUDE**

Ce travail avait pour objectif d'étudier les possibilités de la thermographie infrarouge à détecter la mauvaise consolidation du béton armé . Voici les conclusions qui peuvent être dégagées des essais effectués :

La thermographie infrarouge s'est révélée beaucoup plus intéressante que le radar si l'on considère la rapidité de la prise des données. De plus, les résultats de la thermographie sont exploitables en temps réel. Par contre, l'analyse des données radar nécessite un traitement préalable des données, engendrant ainsi des délais entre la prise des mesures et l'obtention de résultats exploitables.

Globalement, toutes les anomalies thermiques révélées par la thermographie infrarouge ne se sont pas avérées correspondant à des défauts de mise en place du béton. De même, tous les défauts de mise en place du béton observés sur les carottes prélevées des dalles n'ont pas été détectés par la thermographie. La fiabilité de cette technique est estimée être de l'ordre de 50 %.

## **REMERCIEMENTS**

Nous tenons à remercier le personnel d'Hydro-Québec pour le support financier et la collaboration précieuse dont nous avons bénéficiés sur le site, notamment de la part de messieurs François Baril, Michel Rivest et de Normand Poulin.