

Construction d'un modèle physique de joints de dilatation
pour l'étude de la relation entre la température du béton et la
perméabilité des joints

par

Salma M'NASRI

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE LA MAÎTRISE
AVEC MÉMOIRE EN GÉNIE DE LA CONSTRUCTION

M. Sc. A.

MONTRÉAL, LE 15 DÉCEMBRE 2020

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

©Tous droits réservés

Cette licence signifie qu'il est interdit de reproduire, d'enregistrer ou de diffuser en tout ou en partie, le présent document. Le lecteur qui désire imprimer ou conserver sur un autre media une partie importante de ce document, doit obligatoirement en demander l'autorisation à l'auteur.

PRÉSENTATION DU JURY

CE RAPPORT DE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. François Duhaime, directeur de mémoire
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Michel Baraëhr, président du jury
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Lotfi Guizani, membre du jury
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

ELLE A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 15 DÉCEMBRE 2020

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Un grand merci à mon directeur de recherche, François Duhaime, pour m'offrir l'opportunité de me lancer dans une belle aventure de maîtrise. Merci pour ta confiance, tous tes conseils constructifs, tes encouragements continus et toutes sortes de motivations que tu m'as données durant la réalisation de ce projet surtout durant la période de rédaction. Je tiens également à remercier sincèrement le technicien d'application technologique, Sébastien Ménard, pour ses disponibilités régulières, son aide en tout temps et pour toutes les suggestions qui m'ont beaucoup aidé à bien mener les travaux de recherche de ma maîtrise. Ton aide a été vraiment marquée durant tout le projet. Je souhaite remercier Juan-Mauricio Rios, Khalil El Mekari et Cédric Klotoé, pour l'aide fournie à la réalisation de ce projet de maîtrise. Merci pour votre enthousiasme et votre professionnalisme.

Je remercie particulièrement ma famille et ma belle-famille qui m'ont toujours soutenue tout au long de mon cheminement. Elles sont toujours présentes malgré la distance reliant trois continents. À mes parents Mounaouer et M'barka, mes beaux-parents Azmi et Nijmeh, mes sœurs, mon frère, mes belles-sœurs, mes beaux-frères, mes oncles, ma tante et ma grand-mère, merci énormément ! Mes sincères remerciements s'adressent à mes amis Rihem, Abir, et Sara. Je pense également à tous mes amis hors Montréal, à Québec, à Royn, au Sultanat d'Oman et en Tunisie. Je remercie toute personne ayant contribué de près ou de loin à la réussite de ce projet de maîtrise.

Finalement, je dédie toutes ces années de travail à l'être le plus cher à mon cœur, ma petite fille Bella Amina, et l'amour de ma vie, mon mari Younis, pour qui ces derniers mois auront été aussi durs que pour moi. Ils ont subi mes sautes d'humeurs, ma fatigue, mon manque d'attention, ... et je voudrais qu'ils sachent que je n'y serais jamais arrivée sans leur inconditionnel amour, leurs nombreux câlins et leur aide précieuse à la maison.

Construction d'un modèle physique de joints de dilatation pour l'étude de la relation entre la température du béton et la perméabilité des joints

Salma M'NASRI

RÉSUMÉ

Les infiltrations d'eau par les joints de dilatation représentent un enjeu important pour les tunnels. Pour conserver la compétence structurale des tunnels et prolonger leur durée de vie, la résolution rapide et efficace des problèmes d'infiltration d'eau est d'une importance primordiale. Plusieurs méthodes permettent de caractériser les infiltrations de façon non destructive. La thermographie infrarouge est une de ces méthodes. Par contre, à l'heure actuelle, cette méthode est surtout qualitative : elle permet d'identifier les infiltrations, mais elle ne permet pas de mesurer les débits ou de classer les joints selon leur endommagement.

Ce projet vise à simuler le comportement thermique des joints de dilatation caractérisés par des perméabilités différentes sous des températures différentes à l'intrados et à l'extrados. Un modèle physique en béton comportant quatre types de joints en polystyrène extrudé a été construit. L'intérieur du modèle représente l'extrados du tunnel. Les températures de l'eau à l'intérieur du modèle, de l'eau d'infiltration, de l'air et du béton ont été mesurées avec des thermocouples. La thermographie infrarouge a été utilisée pour mesurer la température de la surface du béton. Ces mesures de températures ont été comparées à des mesures du débit d'infiltration pour chaque joint.

Le joint construit avec des feuilles minces en polystyrène a été le plus perméable avec un débit de fuite moyen de 4,2 L/h. Le joint avec la bande d'arrêt d'eau a été le plus étanche avec un débit de fuite moyen de 0,026 L/h. Un débit moyen de 3,0 L/h a été enregistré pour le joint avec une simple feuille de polystyrène. Le joint en polystyrène scellé avec du silicone a enregistré des débits de fuites plus faibles avec une valeur moyenne de 1,4 L/h. Les résultats montrent que chaque joint suit les mêmes tendances à la suite des changements de température de l'eau infiltrée. Les températures du béton enregistrées montrent que le joint le plus perméable a toujours enregistré les températures les plus élevées par rapport aux autres joints où une température minimale du béton à l'intrados de 15,03°C est enregistrée à une profondeur de 7 cm et à 10 cm du joint pour une température de l'eau à l'extrados de 12,9°C. Les températures les plus faibles ont été enregistrées pour le joint avec la bande d'arrêt d'eau avec une température minimale de 14,17°C enregistrée au même emplacement et pour la même température de l'extrados. Les températures du béton mesurées à une profondeur de 3 cm confirment l'anomalie de la température à la surface du béton montrée par imagerie thermographique.

Les thermographies infrarouges montrent un lien clair entre l'intensité des anomalies de température et le débit mesuré pour chaque joint. Les changements de débits en fonction du temps peuvent être corrélés à l'apparition et la disparition d'anomalies de température à la

surface du béton et au niveau du joint. L'augmentation de l'écart entre les températures de l'air et de l'eau dans le modèle accentue le contraste des thermographies infrarouges.

Mots-clés : infiltration d'eau, joint de dilatation, modèle physique, température du béton, débits de fuite, thermographie infrarouge

Construction of a physical model of expansion joints to study the relationship between concrete temperature and joint permeability

Salma M'NASRI

ABSTRACT

Water infiltration through expansion joints is an important issue for tunnels. To maintain the structural competence of tunnels and extend their service life, the rapid and efficient resolution of water infiltration problems is of paramount importance. Several methods can be used to characterize infiltrations in a non-destructive way. Infrared thermography is one of these methods. However, at present, this method is mainly qualitative: it allows for the identification of infiltrations, but it does not allow for the measurement of flow rates or the classification of joints according to their damage.

This project aims to simulate the thermal behaviour of expansion joints characterized by different permeabilities under different temperatures inside and outside the tunnel. A physical concrete model with four types of extruded polystyrene joints was constructed. The inside of the model represents the outside of the tunnel (extrados). The temperatures of the water inside the model, the water flowing out of the model, air, and concrete were measured with thermocouples. Infrared thermography was used to measure the concrete surface temperature. These temperature measurements were compared to infiltration rate measurements for each joint.

The joint built with thin polystyrene sheets was the most permeable with an average leakage rate of 4.2 L/h. The joint with the waterstop strip was the tightest with an average leakage rate of 0.026 L/h. An average leakage rate of 3.0 L/h was recorded for the joint with a simple polystyrene sheet. The polystyrene joint sealed with silicone recorded a lower leakage rate with an average value of 1.4 L/h. The results show that each joint followed the same trends as a result of changes in the temperature of the infiltrated water. The concrete temperatures show that the most permeable joint always recorded the highest temperatures compared to the other joints with a minimum temperature of the concrete of 15,03°C recorded at a depth of 7 cm and at 10 cm from the joint for a water temperature inside the model of 12,9°C. The lowest temperatures were recorded for the joint with the waterstop with a minimum temperature of 14,17°C recorded at the same location and for the same water temperature. The measured concrete temperatures at a depth of 3 cm confirm the anomaly of the concrete surface temperature shown by thermographic imaging.

Infrared thermographs show a clear link between the intensity of temperature anomalies and the flow rate measured for each joint. Changes in flow rate as a function of time can be correlated with the appearance and disappearance of temperature anomalies at the surface of the concrete and at the joint. The increasing difference between air and water temperatures in the model increases the contrast of the infrared thermography.

Keywords: water infiltration, expansion joint, physical model, concrete temperature, leakage rates, infrared thermography

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
0.1 Contexte et problématique.....	1
0.2 Objectifs.....	2
0.3 Méthodologie.....	2
0.4 Contenu et structuration du mémoire.....	2
 CHAPITRE 1 REVUE DE LITTÉRATURE.....	5
1.1 Impacts des fuites d'eau sur le tunnel.....	5
1.1.1 Impacts sur la structure en béton	5
1.1.2 Impacts de phénomène de gel-dégel.....	6
1.1.3 Impacts généraux	9
1.2 Principales causes d'infiltration d'eau	12
1.2.1 Causes liées à la structure en béton.....	12
1.2.2 Causes liées aux dispositifs de construction	13
1.3 Thermographie infrarouge	14
1.3.1 Principe	15
1.3.2 Traitement des images thermographiques	17
1.3.3 Inspection des fuites d'eau par thermographie infrarouge.....	18
1.3.4 Modèle numérique de joints de dilatation.....	27
1.3.5 Limitations	28
 CHAPITRE 2 MÉTHODOLOGIE.....	28
2.1 Modèle physique et objectifs	28
2.1.1 Objectifs.....	28
2.1.2 Description du modèle	28
2.2 Construction du modèle et matériels.....	32
2.2.1 Béton.....	33
2.2.1.1 Ciment HE.....	34
2.2.1.2 Entraîneur d'air.....	34
2.2.1.3 Superplastifiant.....	35
2.2.2 Coulis ciment-bentonite	35
2.2.3 Joints en polystyrène.....	36
2.2.4 Bande d'arrêt d'eau.....	37
2.2.5 Préparation du modèle réduit	38
2.2.5.1 Construction du modèle.....	39
2.2.5.2 Procédure de la mise en place du béton.....	39
2.2.5.3 Mise en garde et période de cure.....	40
2.3 Essais à l'état frais	42
2.4 Essais à l'état solide.....	43
2.5 Instrumentation par des thermocouples	44

	Page
2.6 Montage expérimental	50
2.6.1 Assemblage du montage	51
2.6.2 Installation pour la thermographie infrarouge.....	52
2.6.3 Mode opératoire	53
CHAPITRE 3 RÉSULTATS ET DISCUSSIONS	57
3.1 Essais préliminaires	57
3.2 Données thermiques.....	64
3.2.1 Cycle d'essai sans glycol	64
3.2.1.1 ETPI.....	65
3.2.1.2 ETFSG.....	68
3.2.2 Cycle d'essai avec glycol.....	70
3.2.2.1 ETPII.....	70
3.2.2.2 ETFAG.....	74
3.3 Débits d'écoulement	75
3.3.1 Cycle d'essai sans glycol	76
3.2.1.1 ETPI.....	76
3.2.1.2 ETFSG.....	79
3.3.2 Cycle d'essai avec glycol.....	81
3.2.1.1 ETPII.....	81
3.2.1.2 ETFAG.....	83
3.4 Thermographie infrarouge	85
3.4.1 Cycle d'essai sans glycol	85
3.2.1.1 ETPI.....	85
3.2.1.2 ETFSG.....	87
3.4.2 Cycle d'essai avec glycol.....	92
3.2.1.1 ETPI.....	92
3.2.1.2 ETFAG.....	93
CONCLUSION	101
RECOMMANDATIONS	103
ANNEXE I IMAGES THERMOGRAPHIQUES POUR L'ETPI.....	105
ANNEXE II IMAGES THERMOGRAPHIQUES POUR L'ETFSG.....	109
ANNEXE III IMAGES THERMOGRAPHIQUES POUR L'ETPII.....	113
ANNEXE IV IMAGES THERMOGRAPHIQUES POUR L'ETFAG.....	117
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	121

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1	Données détaillées sur les quatre fuites représentées dans la figure 2.21..27
Tableau 2.1	Composition du mélange de béton.....34
Tableau 2.2	Recette du coulis ciment bentonite35
Tableau 2.3	Propriétés physiques du béton à l'état frais.....42
Tableau 2.4	Résultats des essais de compression du béton44
Tableau 2.5	Caractérisation du coulis de ciment47
Tableau 2.6	Disposition des instruments au sein du modèle50
Tableau 3.1	Images thermographiques pour l'ETPI90
Tableau 3.2	Images thermographiques pour l'ETFSG91
Tableau 3.3	Images thermographiques pour l'ETPII96
Tableau 3.4	Images thermographiques pour l'ETFAG97

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1	Répartition des tunnels endommagés par type de dégâts.....
Figure 1.2	Écaillage du béton et corrosion des armatures.....
Figure 1.3	Béton altéré par dissolution et lessivage, puis soumis au gel
Figure 1.4	Représentation schématique du modèle des pressions hydrauliques expliquant l'expulsion de l'eau des capillaires lors du gel
Figure 1.5	Représentation schématique du modèle des pressions osmotiques dans le béton.....
Figure 1.6	Humidité et moisissure dans un couloir de tunnel.....
Figure 1.7	Endommagement des équipements électriques suites aux fuites des eaux dans un tunnel à Montréal.....
Figure 1.8	Amas de glace provenant d'un joint et formation du verglas sur le trottoir et la chaussée.....
Figure 1.9	Stalactites formées sur le revêtement du tunnel.....
Figure 1.10	Illustration des différents points de fuites dans un tunnel.....
Figure 1.11	Installations des bandes d'arrêt d'eau avant le bétonnage
Figure 1.12	Illustration du principe de détection d'une image thermographique
Figure 1.13	Utilisation de la méthode de référence spatiale pour améliorer la visibilité des défauts.....
Figure 1.14	Utilisation de la méthode de traitement temporelle ; (a) et (b) deux images thermographiques enregistrées à 3 et 5 s et (c) image soustraite... 18
Figure 1.15	(a) Image thermographique et (b) visuelle d'un mur au niveau d'une voie de circulation dans le Hanging Lake tunnel, les zones bleues remarquées semblent être associées à des tuiles partiellement décollées .. 20
Figure 1.16	Images thermiques d'une surface de fuite verticale après 3 minutes d'écoulement (a) $T_w=30^\circ\text{C}$ et $T_\theta=20^\circ\text{C}$, (b) $T_w=35^\circ\text{C}$ et $T_\theta=20^\circ\text{C}$.. 21

	Page	
Figure 1.17	Distribution de la température non-dimensionnelle le long de la surface verticale de fuite ; (a) $T_w=20^\circ\text{C}$ et $T_\theta=15^\circ\text{C}$, (b) $T_w=30^\circ\text{C}$ et $T_\theta=20^\circ\text{C}$, (c) $T_w=35^\circ\text{C}$ et $T_\theta=20^\circ\text{C}$	23
Figure 1.18	(a) Gradient de température pour toutes les infiltrations de juin à septembre 2014. (b) Comparaison du gradient de température et du débit d'écoulement.....	24
Figure 1.19	Procédure de traitement d'image (a) image infrarouge, (b) image après traitement des gris, (c) image après filtrage et (d) image après binarisation et segmentation de seuil	25
Figure 1.20	Principe de calcul de la surface de fuite d'eau	26
Figure 1.21	Points de fuite : (a) et (b) montrent des fuites qui n'ont pas encore pénétré le mur du tunnel, (c) et (d) montrent des fuites visibles à la surface du tunnel	26
Figure 1.22	Conditions aux frontières appliquées sur le joint..... Tirée de Hounyevou-Klotoé et al. (2018)	28
Figure 2.1	Schéma du modèle physique des joints de dilatation.....	30
Figure 2.2	Garniture (à gauche) et couvercle en plastique (à droite) ancré dans le modèle et scellé avec du silicone	31
Figure 2.3	Modèle physique après le décoffrage	32
Figure 2.4	Coffrage du modèle physique avec le positionnement des joints de dilatation	32
Figure 2.5	Courbes approximatives représentant la relation entre la résistance en compression et le rapport eau/liants.....	33
Figure 2.6	Feuilles de polystyrène extrudé utilisées dans le modèle réduit	36
Figure 2.7	Rouleaux de bande d'arrêt d'eau Sika Greenstreak 702	37
Figure 2.8	Installation de la bande d'arrêt d'eau au niveau du joint	38
Figure 2.9	Caractéristiques de la bande d'arrêt d'eau	38
Figure 2.10	Modèle réduit avec coffrage	4040

	Page	
Figure 2.11	Humidification de l'intérieur du modèle	4141
Figure 2.12	Couverture du modèle réduit	4141
Figure 2.13	Essai de la teneur en air du béton frais	43
Figure 2.14	Emplacement des deux séries de thermocouples au niveau du joint de dilatation	45
Figure 2.15	Instrumentation du joint et emplacement des thermocouples.....	45
Figure 2.16	Calibration des thermocouples à une température pièce de 20,4°C	46
Figure 2.17	Calibration des thermocouples à une température chaude de 50,8°C.....	46
Figure 2.18	Sketch de positionnement des thermocouples	47
Figure 2.19	Coulis de ciment préparé pour le scellement des thermocouples	48
Figure 2.20	Installation des séries de thermocouples.....	48
Figure 2.21	Carte d'acquisition des thermocouples.....	49
Figure 2.22	Montage expérimental	51
Figure 2.23	Mise en place des sections en aluminium et installation de la caméra infrarouge.....	52
Figure 2.24	Bac d'alimentation d'un mélange d'eau et d'éthylène de glycol avec circuit de circulation d'eau.....	54
Figure 2.25	Montage expérimental et acquisition des données.....	55
Figure 2.26	Organigramme du plan expérimental avec le profil de température.....	56
Figure 3.1	Fuites d'eau observées pour les joints 3 (a) et 4 (b) au début de la première phase	58
Figure 3.2	Fuites au niveau du joint 2 (a) et traces d'humidité au niveau de la partie inférieure du joint 1 (b) au début de la première phase	59
Figure 3.3	États des joints durant la deuxième phase de l'essai préliminaire ; pas d'écoulement pour les joints 1, 2 et 3 (respectivement a, b et c) et une petite fuite au niveau du joint 4 (d).....	60

	Page
Figure 3.4	Écoulement d'eau à travers la plaque supérieure 61
Figure 3.5	Variation de la température en fonction du temps durant l'essai préliminaire pour le joint 1 62
Figure 3.6	Variation de la température en fonction du temps durant l'essai préliminaire pour le joint 2 63
Figure 3.7	Variation de la température en fonction du temps durant l'essai préliminaire pour le joint 3 63
Figure 3.8	Variation de la température en fonction du temps durant l'essai préliminaire pour le joint 4 64
Figure 3.9	Variation des températures de l'eau entrante et sortante du modèle et de l'air durant le premier cycle d'essai 66
Figure 3.10	Courbes de température en fonction du temps durant le premier cycle d'essai pour le joint 1 66
Figure 3.11	Courbes de température en fonction du temps durant le premier cycle d'essai pour le joint 2 67
Figure 3.12	Courbes de température en fonction du temps durant le premier cycle d'essai pour le joint 3 67
Figure 3.13	Courbes de température en fonction du temps durant le premier cycle d'essai pour le joint 4 68
Figure 3.14	Variation des températures de l'eau entrante et sortante du modèle et de l'air durant le deuxième cycle d'essai 72
Figure 3.15	Courbes de température en fonction du temps durant le deuxième cycle d'essai pour le joint 1 72
Figure 3.16	Courbes de température en fonction du temps durant le deuxième cycle d'essai pour le joint 2 73
Figure 3.17	Courbes de température en fonction du temps durant le deuxième cycle d'essai pour le joint 3 73

	Page	
Figure 3.18	Courbes de température en fonction du temps durant le deuxième cycle d'essai pour le joint 4	74
Figure 3.19	Variation de débits d'écoulement en fonction du temps durant le premier cycle d'essai.....	76
Figure 3.20	États du joint 3 à 45 minutes (a) et à 5 heures (b) durant l'ETPI	77
Figure 3.21	États du joint 2 à la dernière heure (a) et du joint 4 à 4 heures (b) de l'ETPI	78
Figure 3.22	États des joints C (a), B (b) et D (c) à la quatrième heure de l'ETFSG.....	80
Figure 3.23	Variation des débits d'écoulement en fonction du temps durant le deuxième cycle d'essai	81
Figure 3.24	États des joints C (a), B (b) et D (c) à la quatrième heure de l'ETPII.....	82
Figure 3.25	État du joint 1 à 0 minute (a), à 15 minutes (b) et après 5 heures (c) de l'ETPII	83
Figure 3.26	États des joints C (a), B (b) et D (c) durant la première heure de l'ETFSG	84

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

ETPI	Essai à température pièce I
ETPII	Essai à température pièce II
ETFAG	Essai à température froide avec glycol
ETFSG	Essai à température froide sans glycol
f_{cr}	Résistance
f'_{cr}	Résistance moyenne en compression exigée
PVC	Polychlorure de vinyle

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

°C	Degré Celsius
cm	Centimètre
cm ³ /min	Centimètre cube/minute
L/h	Litre/heure
h	Heure
min	Minute
s	Seconde

INTRODUCTION

0.1 Contexte et problématique :

Les infiltrations d'eau représentent un enjeu critique pour les structures souterraines en générale et pour les tunnels en particulier. Elles peuvent causer des dégâts irrévocables au cours du temps. Les dommages peuvent se produire au niveau du revêtement du tunnel, de la structure en béton ou des équipements.

La présence d'eau dans les tunnels peut engendrer l'érosion et la détérioration de la structure en béton et la corrosion des armatures métalliques. En outre, les fuites d'eau ne peuvent pas être tolérées sous aucune forme dans les endroits à forte sensibilité à l'eau, par exemple les points de contrôle électriques et électroniques (ITA, 2001). Les matières en solutions transportées par les eaux infiltrées, comme les ions chlorures, accélèrent la détérioration du tunnel et de ses composantes (Morin-Morissette, 2016). Les changements d'état de l'eau à l'intérieur de la structure en béton par le phénomène de gel-dégel aggravent les dommages causés par les infiltrations d'eau. Suite au gel, l'eau devient confinée en raison de la congélation rapide ce qui augmente la pression hydraulique dans le béton causant sa dégradation (Mainali et al., 2015).

Le contrôle des infiltrations d'eau dans les tunnels et les structures souterraines est complexe. La résolution des problèmes commence par l'identification des fuites et de leurs causes. Les fuites d'eau se manifestent généralement à travers un défaut de revêtement du tunnel et/ou à travers les dispositifs de construction (CETU, 2015). La faiblesse du système de drainage et son obstruction force l'eau à chercher d'autres plans de déficience comme les fissures ou les joints. Des essais à échelle réduite et à grande échelle ont montré que la défaillance progressive de revêtement des tunnels est initiée par les dommages subis par les joints (Gong et al., 2018).

Les joints de dilatation représentent une source importante de fuites d'eau (Ji et al., 2012). La technologie d'imagerie thermographique est utilisée pour détecter et localiser les fuites d'eau

au niveau des joints. Cette méthode d'investigation se limite à un aspect d'interprétation visuelle.

0.2 Objectifs :

À ce jour, aucune approche quantitative n'a été établie pour quantifier les débits d'infiltration dans les tunnels par thermographie infrarouge. L'objectif de ce projet de recherche est de tester des joints de dilatation avec différentes perméabilités à la suite des infiltrations d'eau et de montrer une corrélation entre la variation de la température de la surface du béton, les débits d'écoulement et la perméabilité de joints à l'aide de la thermographie infrarouge. Les résultats obtenus seront utilisés pour la calibration d'un modèle numérique.

0.3 Méthodologie :

Afin de simuler le comportement des joints à la suite des infiltrations d'eau et des changements de température de l'extrados, un modèle physique a été élaboré dans le Laboratoire de géotechnique et de génie géoenvironnemental (LG2) de l'École de technologie supérieure (ETS). Ce modèle représente un modèle réduit de joints de dilatation dans un tunnel. Le modèle est d'une forme prismatique rectangulaire. Il comporte quatre types de joint formés à partir de feuilles de polystyrène extrudé. Les joints ont été conçus de manière à présenter différentes perméabilités. L'intérieur du modèle représente l'extrados du tunnel. Les faces extérieures du modèle représentent l'intrados du tunnel où les fuites d'eau seraient normalement détectées. La localisation des fuites d'eau et le suivi des changements de température autour des joints et à la surface du béton du modèle réduit ont été assuré par thermographie infrarouge et à l'aide de thermocouples.

0.4 Contenu et structuration du mémoire :

Le présent mémoire s'articule en trois principaux chapitres en plus de la présente introduction et d'une conclusion générale. Le premier chapitre présente une revue de la littérature sur les dégâts causés par l'eau souterraine dans les tunnels ainsi que la détection des infiltrations à

l'aide de thermographie infrarouge. La deuxième section présente la méthodologie suivie pour réaliser ce projet de recherche. Le dernier chapitre comporte les résultats obtenus et leur discussion.

CHAPITRE 1

REVUE DE LITTÉRATURE

Dans les régions nordiques, les infiltrations d'eau représentent la cause principale d'endommagement dans les tunnels. Yuan et al. (2011) ont recensé les différents types de dégâts qui peuvent affecter les tunnels en inspectant 226 tunnels à Shenyang, en Chine. La figure 1.1 montre que les détériorations engendrées par les fuites d'eau sont rencontrées plus souvent que les autres types de dégâts.

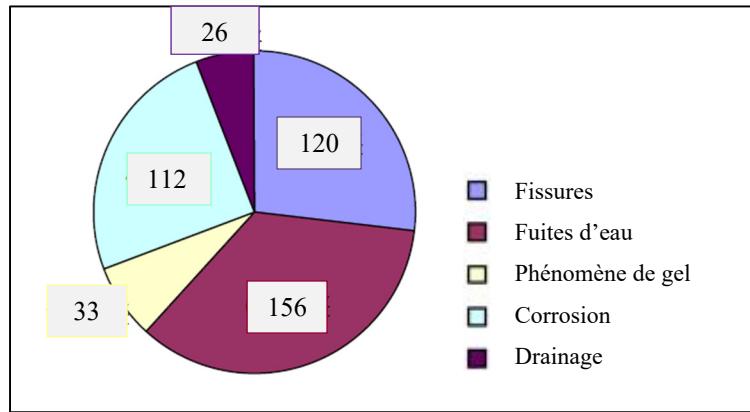


Figure 1.1 Répartition des tunnels endommagés par type de dégâts
Adaptée de Yuan et al. (2011)

1.1 Impacts des fuites d'eau sur le tunnel

Différents dégâts peuvent se produire au niveau du revêtement du tunnel, sa structure en béton et même ses accessoires.

1.1.1 Impacts sur la structure en béton

Les fuites d'eau peuvent affecter la structure en béton du tunnel de différentes manières. Elles peuvent engendrer en premier lieu l'érosion de la structure interne du tunnel. Les mouvements des eaux infiltrées provoquent au cours du temps l'érosion et la corrosion des éléments

métalliques après la détérioration agressive du mortier de ciment présent dans les structures en béton (figure 1.2). En outre, ces eaux ruisselées transportent des particules solides qui participent à l'érosion de la matrice en béton causant la formation des vides derrière le revêtement. Ces dommages entraînent notamment la régression de la force et de l'intégrité du revêtement du tunnel (ITA, 2001).



Figure 1.2 Écaillage du béton et corrosion des armatures
Tirée de CETU (2015)

La conductivité hydraulique du béton est une propriété primordiale liée à la facilité d'entretien et à la durabilité des structures en béton trouvées dans des environnements agressifs. L'eau agit comme le facteur principal responsable de la détérioration du béton. Elle représente l'agent transporteur des espèces agressives de différentes origines telles que les ions chlorure ou sulfate (Yang et al., 2018).

1.1.2 Impacts de phénomène de gel-dégel

L'augmentation du taux d'infiltration d'eau dans le tunnel cause une augmentation des dommages liés au phénomène de gel-dégel. Les cycles de gel-dégel engendrent l'écaillage de

la surface du béton et une fissuration interne qui se manifeste par l'apparition d'une intense microfissuration diffusée sur la matrice interne du béton.

L'infiltration d'eau entraînent la saturation partielle ou totale des pores du béton. Après la chute de température, l'eau gèle dans le matériau et subit une expansion volumétrique d'environ 9% en raison du changement de phase de l'état liquide à l'état solide. À la suite de ce phénomène, l'eau devient confinée en raison de la congélation rapide ce qui augmente la pression hydraulique dans le béton causant sa dégradation (figure 1.3) (Mainali et al., 2015).

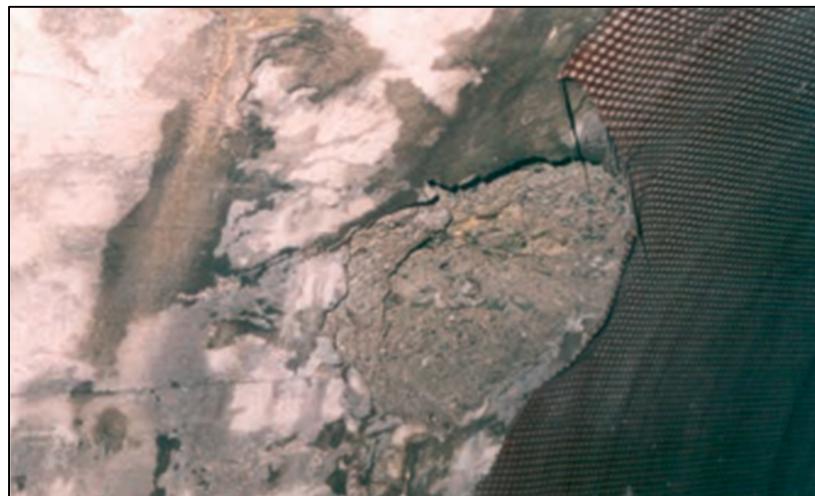


Figure 1.3 Béton altéré par dissolution et lessivage, puis soumis au gel
Tirée de CETU (2015)

L'intensité de la pression hydraulique varie selon la perméabilité du béton et la longueur du trajet séparant le pore qui gèle et celui qui peut accueillir l'eau expulsée (figure 1.4) (Morin-Morissette, 2016). Des pressions osmotiques s'ajoutent en raison de la présence des ions Na^+ et K^+ dans les eaux de ruissellement influencées par les opérations de salage des routes pour prévenir la formation de glace (figure 1.5). En outre, les ions chlorures peuvent s'infiltrer dans les structures en béton adjacentes et accélèrent la vitesse de corrosion de l'acier d'armature, ce qui peut entraîner l'effritement du béton et l'augmentation du nombre de nids de poule. Ces pressions attaquent la surface extérieure du béton où la concentration en sel est plus importante provoquant son écaillage (Morin-Morissette, 2016).

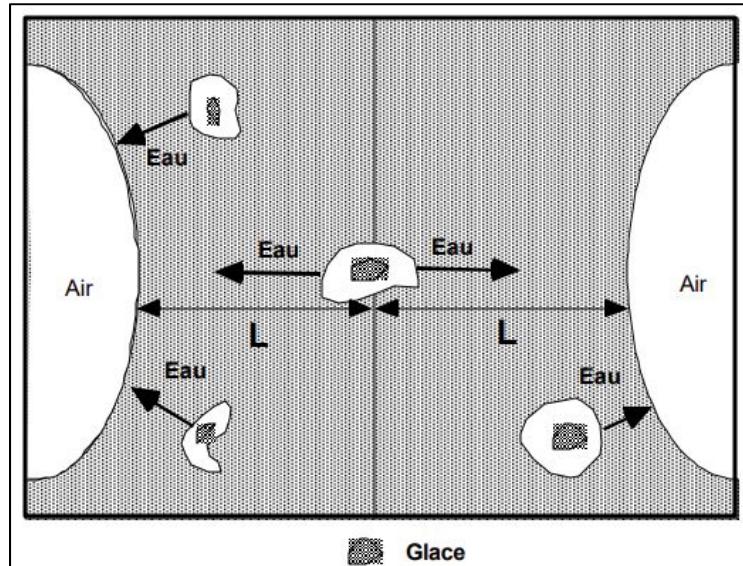


Figure 1.4 Représentation schématique du modèle des pressions hydrauliques expliquant l'expulsion de l'eau des capillaires lors du gel

Tirée de Morin-Morissette (2016)

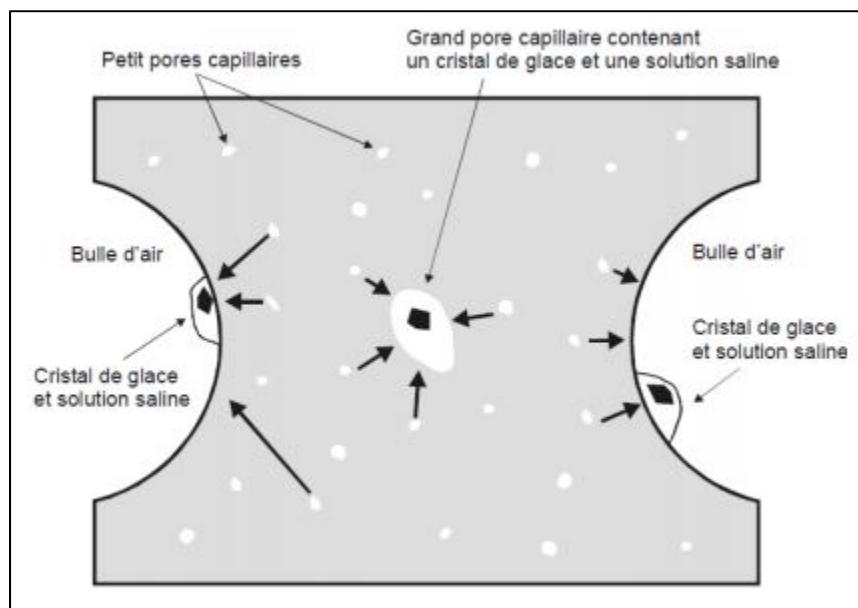


Figure 1.5 Représentation schématique du modèle des pressions osmotiques dans le béton

Tirée de Morin-Morissette (2016)

Il est à noter que plusieurs anciens tunnels en Amérique du Nord ont été construits avant 1950. Pour ces tunnels, le béton était généralement produit sans adjuvant entraîneur d'air. L'entraînement naturel de l'air dans ce béton est considéré insuffisant pour résister d'une façon adéquate aux dommages causés par les cycles répétitifs de gel-dégel (TOMIE, 2015).

1.1.3 Impacts généraux

La présence d'une humidité élevée au niveau du tunnel affecte le fonctionnement et la durabilité des équipements présents dans le tunnel (figures 1.6 et 1.7).



Figure 1.6 Humidité et moisissure dans un couloir de tunnel au Québec



Figure 1.7 Endommagement des équipements électriques suites à des infiltrations d'eau dans un tunnel au Québec

Le transport des solides par les eaux ruisselées provoque l'obstruction des drainages. Durant les périodes hivernales, ces drainages peuvent être colmatés par la formation de glace (figure 1.8). Dans ce cas, les eaux trouvent d'autres chemins préférentiels d'écoulement à travers le revêtement du tunnel. La congélation des eaux infiltrées au plafond du tunnel entraîne la formation des stalactites dont la chute représente un grand danger pour les usagers des tunnels (CETU, 2015) (figure 1.9). Dans le cas des tunnels routiers, la présence d'eau sur les chaussées engendre la formation de plaques de glace quand les températures sont faibles. La circulation dans ces conditions présente des risques pour les usagers du tunnel (ITA, 2001).



Figure 1.8 Amas de glace provenant d'un joint et formation
du verglas sur le trottoir et la chaussée
Tirée de CETU (2015)

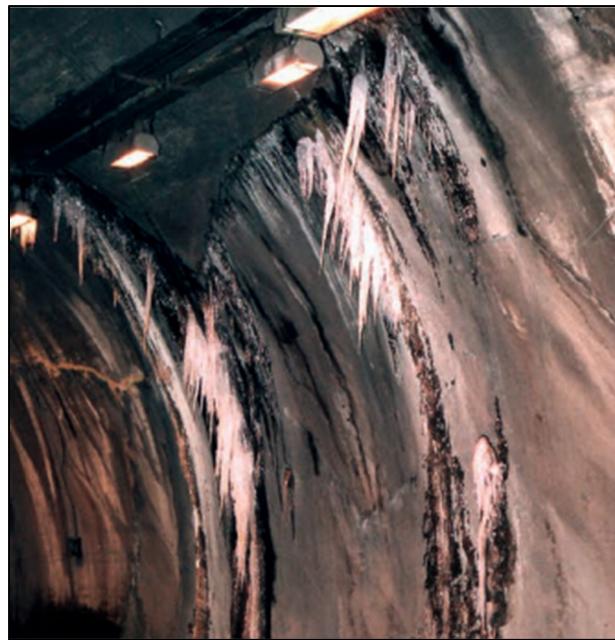


Figure 1.9 Stalactites formées sur le revêtement du tunnel
Tirée de CETU (2015)

Les fuites d'eau engendrent non seulement des dégâts sur la structure et les équipements du tunnel, mais aussi sur l'environnement et les autres structures tout autour du tunnel. Les infiltrations d'eau peuvent entre autres mener à une diminution du niveau de la nappe. Cette diminution se traduit par la consolidation et le tassement du sol. Le changement d'état du sol affecte par conséquence les structures adjacentes au tunnel et peut même causer sa fermeture (ITA, 2001).

1.2 Principales causes d'infiltration d'eau

Des investigations ont été faites par l'ITA (2001) pour une centaine de tunnels partout dans le monde pour identifier les différentes causes des infiltrations d'eau. Les fuites d'eau se manifestent généralement à travers un défaut de revêtement du tunnel et/ou à travers les joints de construction et de dilatation (CETU, 2015).

1.2.1 Causes liées à la structure en béton

La faiblesse du système de drainage est un des principales causes d'infiltration d'eau à travers la structure en béton du tunnel. Pour tout type d'ouvrage, un plan de drainage est obligatoire dans la conception. Les drains assurent la circulation des eaux ruisselées et la décharge de la pression hydraulique. L'obstruction des drainages augmente la pression hydraulique subie par la structure du tunnel et force l'eau à chercher d'autres plans de défécience pour s'écouler dans le tunnel. Les fissures présentent des chemins préférentiels pour les eaux ruisselées (figure 1.10). La présence des fissures peut être aggravée par l'effet des cycles de gel-dégel. Des déficiences au niveau de la membrane d'étanchéité peuvent aussi être des facteurs d'évolution des fuites. Ces défauts sont généralement dû à des dommages produits pendant la période de construction et d'exploitation (Ji et al., 2012). Une conduite d'eau qui fuit ou un réservoir de stockage souterrain peuvent aussi être responsable des fuites d'eau (ITA, 2001). Les analyses chimiques et biologiques des eaux d'écoulement permettent d'établir leur origine.

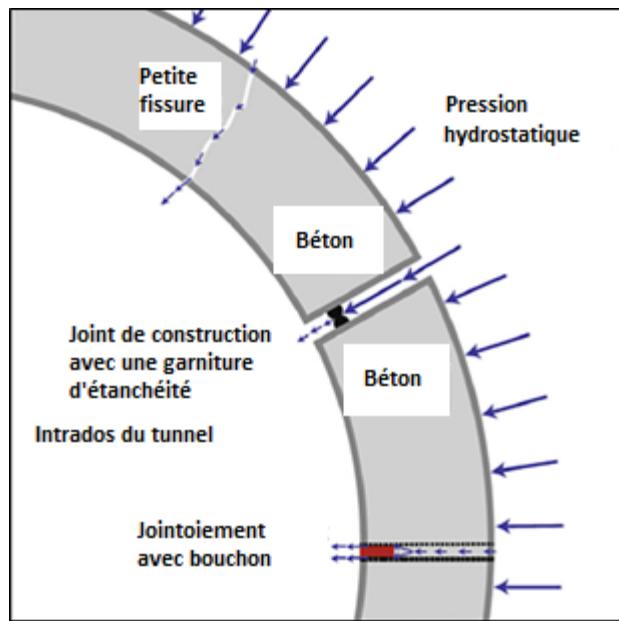


Figure 1.10 Illustration des différents points de fuites dans un tunnel
Adaptée de Gong et al. (2018)

1.2.2 Causes liées aux dispositifs de construction

Les joints de construction et de dilatation sont une des sources principales de fuites d'eau (figure 1.10) (Ji et al., 2012). En pratique, il n'est pas possible de placer le béton en continuité lors de la construction des ouvrages. Des joints de construction sont donc nécessaires pour la mise en place du béton en séquence sans nuire à la structure (Nawy, 2008). Certains joints de construction comportent une ou plusieurs bandes d'arrêt d'eau qui forme un diaphragme étanche pour empêcher le passage d'eau à travers le joint. Ces bandes d'arrêt d'eau sont généralement fabriquées en polychlorure de vinyle (PVC). Les infiltrations d'eau pour les joints avec des bandes d'arrêt d'eau peuvent être associées au mauvais compactage du béton autour de la bande d'arrêt d'eau (figure 1.11) (ITA, 2001).

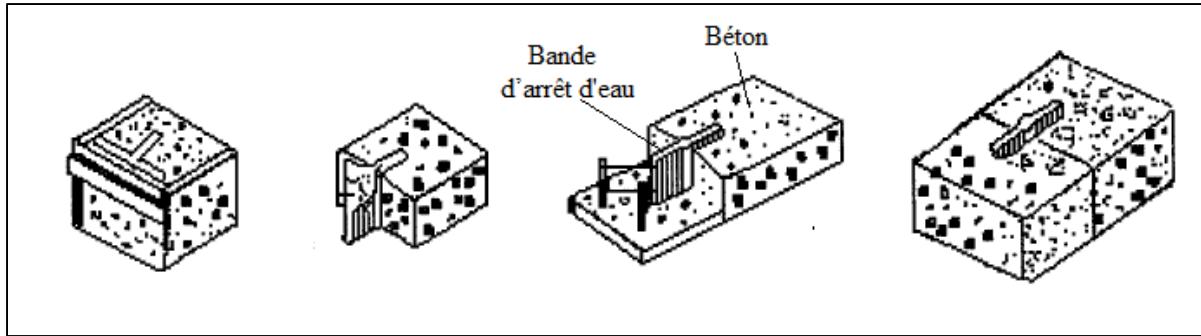


Figure 1.11 Installations des bandes d'arrêt d'eau avant le bétonnage

Adaptée de U. S. Army Corps of Engineers (1995)

Le joint de dilatation permet de limiter les forces générées par les changements de volume sous l'effet des variations de température (Nawy, 2008). À l'aide de ce type de joint, le béton peut se dilater et se contracter librement sans générer des fissures (Doig, 1935). Une vibration de béton non suffisante lors de la mise en place et le changement de la charge externe appliquée sur le joint sont les causes derrière les déficiences présentées par les joints (Ji et al., 2012).

Les dégâts causés par les infiltrations d'eau et la progression de ces dégâts peuvent parfois être visibles à l'œil nu lors de l'investigation. Par contre, ce n'est pas toujours le cas (CETU, 2015). De ce fait, différentes méthodes d'investigation ont été établies pour l'inspection des structures en béton. Des méthodes destructives, comme les forages, apportent des changements sur les ouvrages inspectés. Les méthodes d'inspection non destructives sont nombreuses, par exemple la tomographie par ultrasons, le géoradar, la thermographie infrarouge, etc. Ce type d'inspection assure l'évaluation de l'état des ouvrages sans imposer de variations sur la structure des ouvrages. La thermographie infrarouge est la méthode d'inspection non destructive la plus populaire pour la caractérisation des infiltrations d'eau (Kylili et al., 2014).

1.3 Thermographie infrarouge

La thermographie infrarouge est une méthode d'inspection non destructive caractérisée par l'observation à distance, l'acquisition rapide de données à une grande échelle, la facilité d'utilisation, et l'économie d'énergie et de coûts qu'elle permet de réaliser.

1.3.1 Principe

La thermographie infrarouge consiste à analyser les radiations thermiques émises par une surface ciblée. Cette technique d'enregistrement permet de visualiser la distribution des températures sur une surface (figure 1.12). Cette distribution de température est influencée par le flux thermique à travers cette surface. Ce flux thermique varie entre autres avec la conductivité thermique du milieu traversé (Haack et al., 1995).

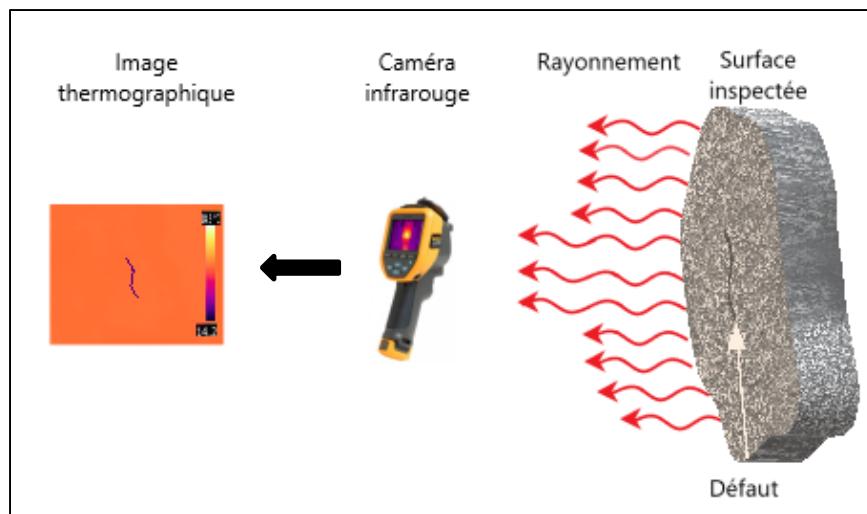


Figure 1.12 Illustration du principe de détection d'une image thermographique

La thermographie infrarouge dépend de certaines caractéristiques de l'objet étudié. L'émissivité ϵ est la capacité d'un objet à émettre de l'énergie par rayonnement définie par rapport à l'énergie rayonnée par un corps noir de référence porté à la même température. Un corps noir est un corps idéal capable d'absorber toute l'énergie électromagnétique qu'il reçoit. Cette absorption d'énergie crée de l'agitation thermique au sein du corps noir qui réemet un rayonnement thermique. Dans le cas d'un objet réel, l'absorbance de l'énergie électromagnétique est limitée donc une partie seulement sera rayonnée par la surface de l'objet d'où son émissivité inférieure à l'émissivité du corps noir. La loi de Planck décrit le spectre du rayonnement du corps noir pour une température donnée. Elle est définie par l'équation 1.1 où \hbar est la constante de Planck, c est la vitesse de la lumière, k est la constante de Boltzmann, λ est la longueur d'onde du rayonnement émis et T est la température du corps noir (Maldague,

1992). Le rayonnement émis par un objet réel (N_λ) dépend donc de l'émissivité de l'objet et le rayonnement du corps noir théorique ($N_{\lambda,b}$) comme montré dans l'équation 1.2 (Maldague, 1992).

$$N_{\lambda,b} = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda KT} - 1\right)} \quad (1.1)$$

$$N_\lambda = \epsilon N_{\lambda,b} (\lambda, T) \quad (1.2)$$

L'émissivité d'un objet dépend généralement de la nature de l'objet, de l'angle de vue θ à partir duquel l'image thermographique a été prise, de la température T et de la longueur d'onde du rayonnement émis λ .

La thermographie infrarouge a été appliquée dans des différentes domaines. Elle représente un outil de premier plan pour détecter l'énergie infrarouge sur les surfaces des objets. Pour les bâtiments, l'imagerie infrarouge permet de détecter les irrégularités thermiques, les fuites d'air et même les anomalies d'humidité sur les enveloppes des bâtiments (Kirimtak & Krejcar, 2018). Cette méthode non destructive permet aussi de visualiser et analyser les défauts cachés sur les enveloppes des bâtiments afin d'améliorer leur efficacité énergétique. Dans le domaine d'hydrologie, la thermographie infrarouge est utilisée pour caractériser la réponse des aquifères rocheux fracturés à de fortes précipitations. L'utilisation de la chaleur comme traceur est un moyen d'étudier les processus des eaux souterraines dans les environnements de décharge (Rathay et al., 2018). En outre, la thermographie examine les rejets discrets d'eaux souterraines, les interactions entre les eaux de surface et les eaux souterraines et même le rejet des eaux souterraines sous-marines (Hare et al., 2015 ; Rooper et al., 2014).

La thermographie infrarouge est également utilisée pour caractériser l'ampleur des déficiences des éléments structurels ainsi que pour surveiller l'évolution des défauts dans le temps. Elle représente un outil puissant pour la détection des fuites d'eau, de l'humidité et d'autres caractéristiques liées à la température notamment les pertes de chaleur (Lerma et al., 2011).

Cette méthode d'investigation sans contact est largement utilisée pour le diagnostic des tunnels grâce à sa caractéristique de manipulation à distance. Les images thermographiques nécessitent des traitements d'image afin de mieux localiser les défauts ainsi d'optimiser les interprétations.

1.3.2 Traitement des images thermographiques

Des techniques d'amélioration des images thermographiques, spatiale et temporelle, peuvent être utilisées afin d'identifier les défauts et visualiser leur ampleur (Maldague, 1992). La technique de traitement spatial consiste à comparer la thermographie de l'échantillon examiné avec la thermographie d'un échantillon de référence sain (Mont & Mannara, 1985). Un faible contraste peut camoufler des points de défauts. Ce problème peut être résolu par soustraction du bruit à partir de l'image infrarouge originale. La figure 1.13 montre l'utilisation de la méthode de traitement spatial. L'image à gauche représente l'image thermographique brute. L'image au milieu représente l'image de référence prise au-dessus d'une zone saine. L'image à droite est le résultat de la soustraction du bruit à partir de l'image brute. Cette image thermographique délimite plus clairement la zone de défaut.

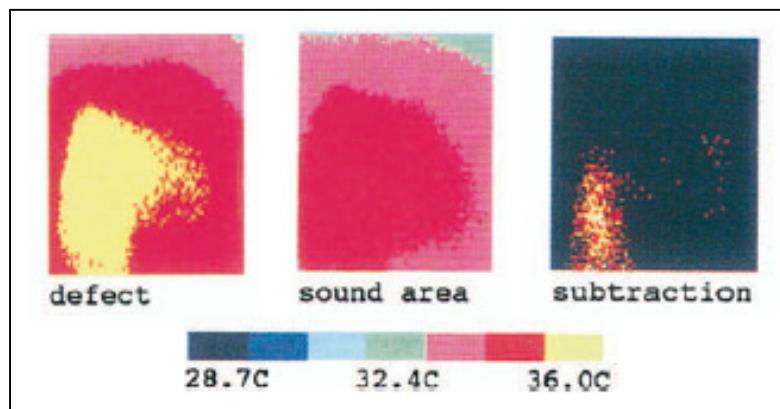


Figure 1.13 Utilisation de la méthode de traitement spatial pour améliorer la visibilité des défauts
Tirée de Maldague (1992)

La technique temporelle de traitement de l'image peut être utilisée lorsque l'émissivité de la surface étudiée change d'une manière imprévisible ou lorsque la surface étudiée peut subir des

changements thermiques inconnus. Cette technique est liée aux propriétés de propagation thermique de la surface étudiée (Maldague, 1992). Elle vise à montrer l'évolution thermique de la zone de défaut entre deux temps d'observation. La figure 1.14 montre l'utilisation de la technique de traitement temporel sur une surface d'époxy de graphite où un défaut artificiel en téflon a été inséré à 0,5 mm de la surface. Maldague (1992) explique le motif diagonal présent dans les deux images brutes par la différence de réflexion de la surface de ce composant tissé. Comme la texture est la même dans les deux images thermographiques, le bruit peut être supprimé par soustraction des deux images. L'image soustraite des deux images enregistrées à 3 et 5 s après le début de réchauffement de la surface investiguée offre une meilleure visibilité de défaut (figure 1.14). Les techniques de traitement spatial et temporel ne peuvent être utilisées que si une image de référence est disponible (Maldague, 1992).

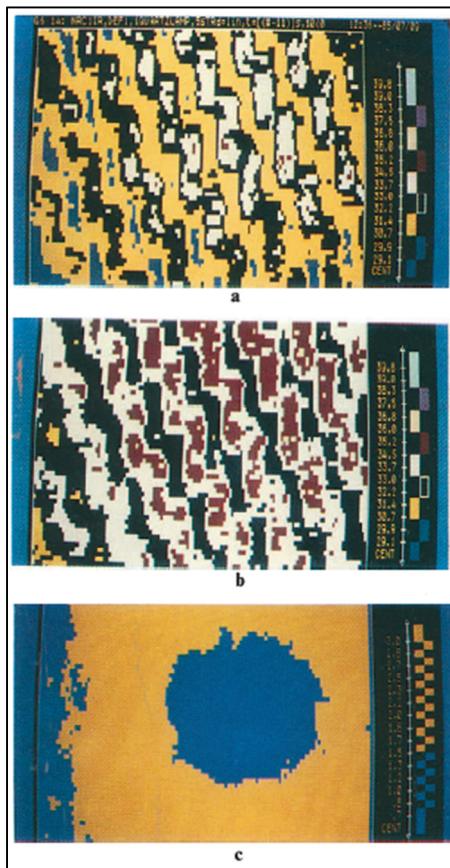


Figure 1.14 Utilisation de la méthode de traitement temporel ; (a) et (b) deux images thermographiques enregistrées à 3 et 5 s et (c) image soustraite
Tirée de Maldague (1992)

1.3.3 Inspection des fuites d'eau par thermographie infrarouge

La température autour d'un plan de fuite est généralement différente de la température environnante. Le suivi de la variation de température est d'une importance primordiale lors de la vérification des fuites. La thermographie met en valeur la distribution verticale et latérale de la température le long du plan d'infiltration. La distribution de température sur la surface du béton est régie par le flux thermique et la conductivité thermique à travers le béton.

L'imagerie infrarouge peut notamment détecter des points de fuites qui ne sont pas visibles à l'œil nue (figure 1.15). Par échange de chaleur, la température de l'eau de fuite augmente progressivement pour créer un équilibre avec la température de surface de la structure (Inagaki & Okamoto, 1997). Cette tendance est plus marquée lorsque le débit de fuite est plus grand. En régime permanent, quand la différence entre la température de l'eau de fuite et la température de la structure est faible, le flux thermique est faible ainsi les défauts ne peuvent pas être facilement détectés. La différence de température entre deux milieux doit être d'une valeur minimale de 2°C pour que les résultats présentés par thermographie infrarouge soient fiables (Haack et al., 1996).

En régime transitoire, quand la différence entre la température de l'eau de fuite et la structure est importante, l'augmentation de débits amplifie le flux thermique et engendre une distribution de température à la surface investiguée. La présence des contrastes thermiques importants à l'intérieur d'une structure permet d'obtenir une meilleure détection des défauts (Maldague, 1992). D'autre part, l'imagerie thermographique permet aussi de détecter les zones les plus humides qui peuvent être transformées à des endroits de fuites plus tard quand l'écoulement apparaît à la surface (Haack et al., 1996). L'humidité peut être associée à des surfaces qui présentent des températures plus faibles que les régions avoisinantes (Lerma et al., 2011).

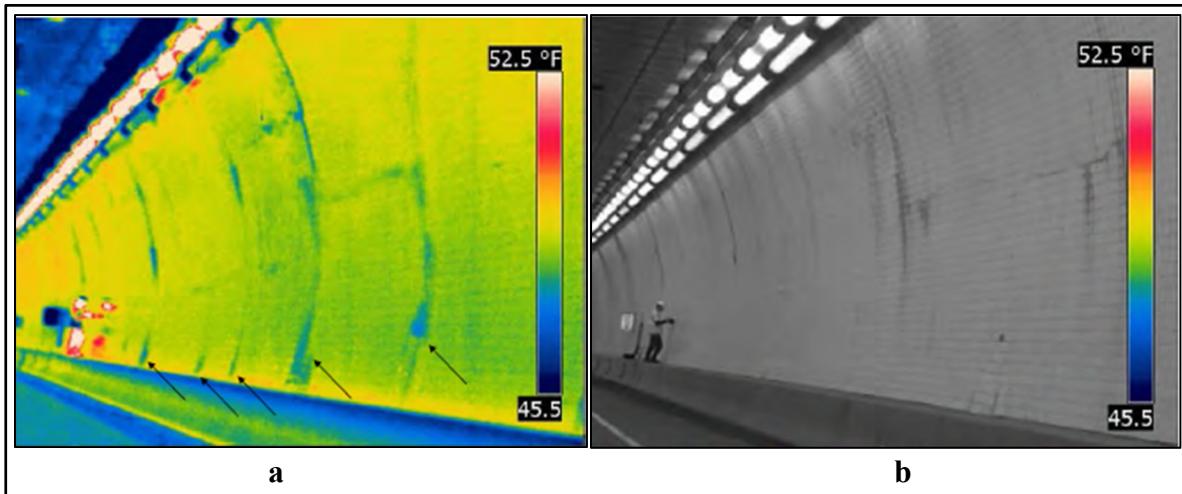


Figure 1.15 (a) Image thermographique et (b) visuelle d'un mur au niveau d'une voie de circulation dans le Hanging Lake tunnel, les zones bleues remarquées semblent être associées à des tuiles partiellement décollées

Tirée de Wimsatt et al. (2013)

L'étude faite par Inagaki & Okamoto (1997) montre des images thermographiques qui ont été prises en fonction de débit d'écoulement et de la température de la surface du mortier (T_w) et de l'eau infiltrée (T_θ). La figure 1.16 met en évidence la distribution des températures autour du plan de fuite en fonction de débit de fuite et la température du mortier et de l'eau sortante. Le champ de température à la surface du mortier varie d'une façon remarquable si la température du mortier change tout en gardant le débit de fuite et la température de l'eau de fuite constants. Les images thermographiques montrent que l'écart de température entre la structure et l'eau infiltrée agit d'une façon remarquable sur la répartition de température à la surface du mortier. En outre, l'influence de l'augmentation du débit sur la répartition de température à la surface est très claire. La largeur de l'anomalie de température augmente progressivement avec l'augmentation du débit et de la distance verticale X à partir du centre de l'écoulement (figure 1.16).

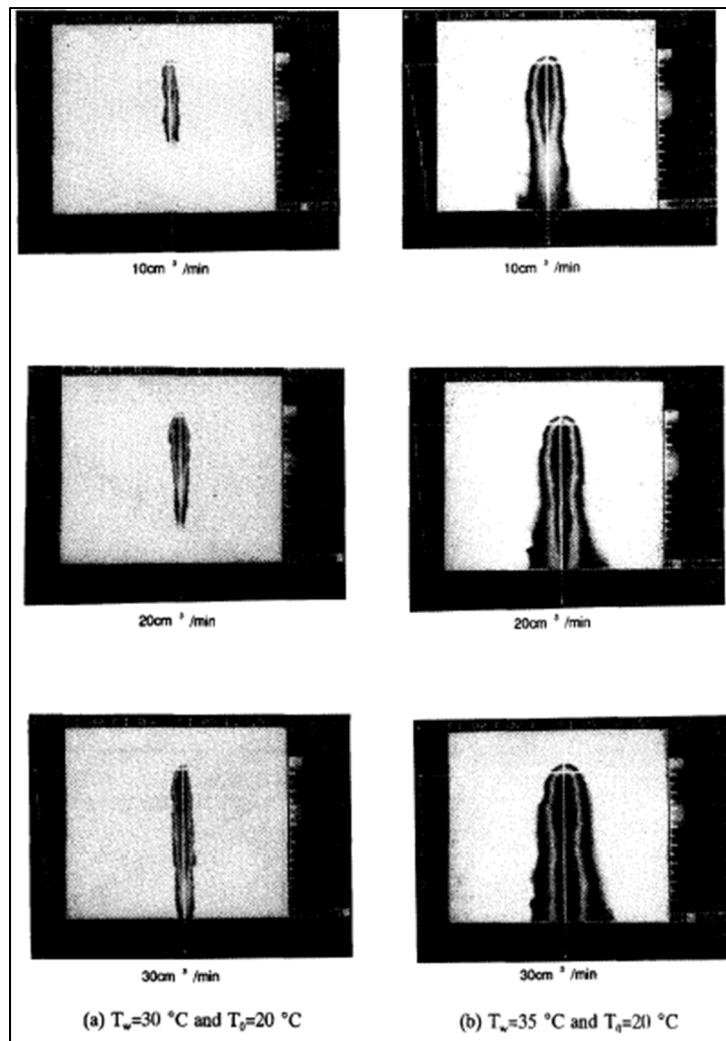


Figure 1.16 Images thermiques d'une surface de fuite verticale après 3 minutes d'écoulement

(a) $T_w=30^\circ\text{C}$ et $T_\theta=20^\circ\text{C}$, (b) $T_w=35^\circ\text{C}$ et $T_\theta=20^\circ\text{C}$

Tirée de Inagaki & Okamoto (1997)

Pour analyser la répartition des températures, la distribution verticale de température le long de la surface de fuite a été mesurée et normalisée par la différence de température T_w-T_θ . Une température non dimensionnelle θ a été définie par Inagaki & Okamoto (1997) afin de présenter une valeur de température liant la température de la surface du mortier, de l'eau infiltrée, et de la surface de fuite (T_x) où $\theta=(T_x-T_\theta)/(T_w-T_\theta)$. L'influence de l'écart entre la température de l'eau infiltrée et de la structure sur la température de la surface est bien représentée dans la figure 1.17.

La distribution de température à la surface montre que dans tous les cas la température augmente en éloignant du centre de fuite. Les températures enregistrées pour un faible débit sont toujours les plus élevées. L'écart entre les températures enregistrées pour les différents débits augmente en s'éloignant du centre de fuite (figure 1.17). Dans le cas d'un écart entre la température de la structure et la température de l'eau infiltrée de 5 et 10°C, et pour un débit faible à moyen, de 10 et 20 cm³/min, l'écart entre les températures enregistrées est généralement plus faible par rapport à celui enregistré avec les températures pour un débit élevée de 30 cm³/min. Ces températures sont plus proches pour un écart de température de 10°C. Dans le cas d'un écart de température de 15°C, cette observation n'est plus valide. L'écart entre les températures enregistrées avec des différents débits demeure presque uniforme en s'éloignant du centre de fuite. Une augmentation des températures pour les débits de 10 et 20 cm³/min est remarquée pour cet écart de température. Pour un écart de température de 5 et 10°C entre la structure et l'eau infiltrée, la distribution de la température à la surface autour de la fuite est généralement similaire pour les différents débits (figure 1.17).

Une étude a été faite par Mundy et al. (2017) sur les possibilités et les limitations de quantifier les écoulements d'eaux souterraine à partir des infiltrations discrètes par la thermographie infrarouge. Cette étude se caractérise par l'identification des endroits des fuites actives pendant la saison d'hiver et la quantification des débits de fuite pendant la saison d'été en se basant sur le gradient thermique de l'eau le long de la fuite. De 20 à 31 écoulements d'eau, dans la région de Saint Dominique, Québec, ont été étudiés (figure 1.18). L'eau sortante est considérée à une température plus faible que la température de l'air. Les résultats montrent que les débits de fuite les plus importants possèdent généralement un gradient thermique vertical plus faible et l'inverse est vrai pour un faible débit de fuite. Ceci signifie que le réchauffement de la surface de fuite est moins grand pour des débits de fuite élevés et est plus significatif pour des faibles débits de fuite.

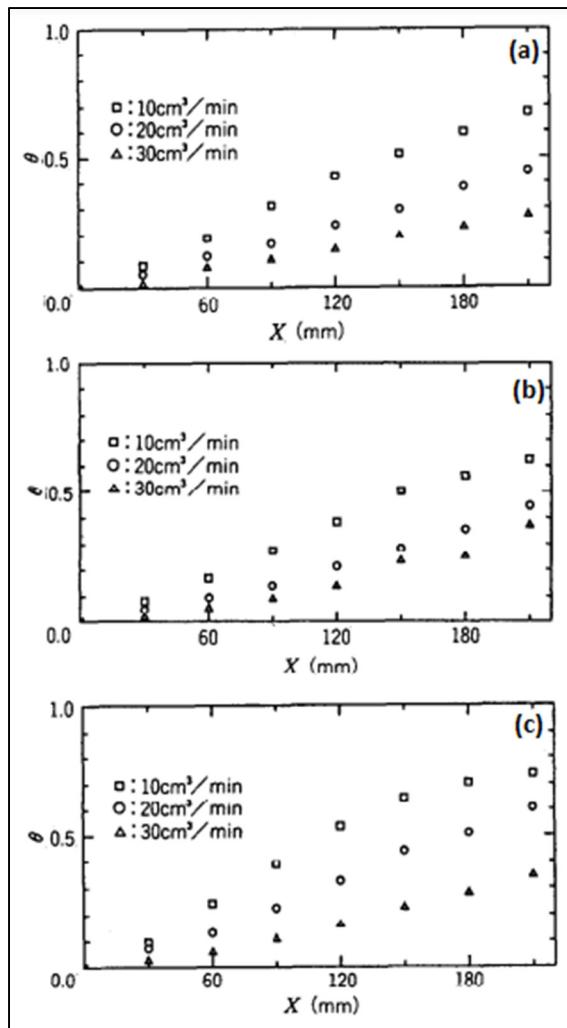


Figure 1.17 Distribution de la température non-dimensionnelle le long de la surface verticale de fuite ; (a) $T_w=20^\circ\text{C}$ et $T_\theta=15^\circ\text{C}$, (b) $T_w=30^\circ\text{C}$ et $T_\theta=20^\circ\text{C}$, (c) $T_w=35^\circ\text{C}$ et $T_\theta=20^\circ\text{C}$
Adaptée de Inagaki and Okamoto (1997)

La thermographie infrarouge a été utilisée pour la détection automatique des fuites d'eau à l'aide d'un système robotique dans un tunnel de câbles (Lu et al., 2019). En plus de la localisation, l'enregistrement des informations de l'image originale de fuite et les données de télémétrie par ultrasons, ce système d'inspection thermographique engendre aussi une analyse quantitative de la surface de fuite.

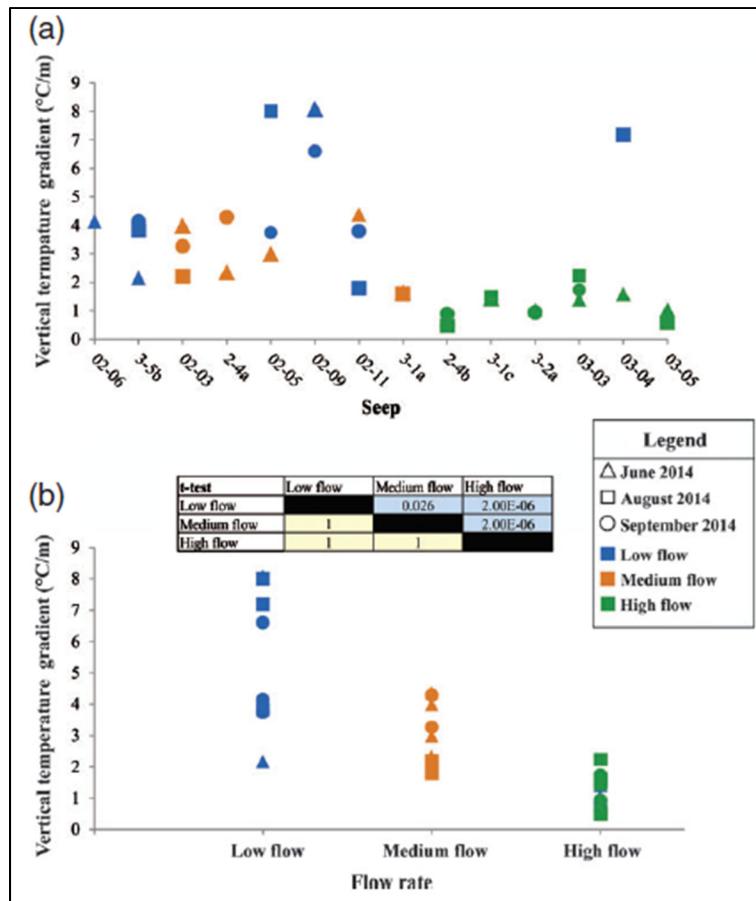


Figure 1.18 (a) Gradient de température pour toutes les infiltrations de juin à septembre 2014.
 (b) Comparaison du gradient de température et du débit d'écoulement
 Tirée de Mundy et al. (2017)

Le calcul de la surface de fuite se base sur les étapes de traitement des images thermographiques ; traitement des gris, de filtrage pour supprimer le bruit de l'image, de binarisation et de segmentation de seuil pour extraire l'image traitée (figure 1.19).

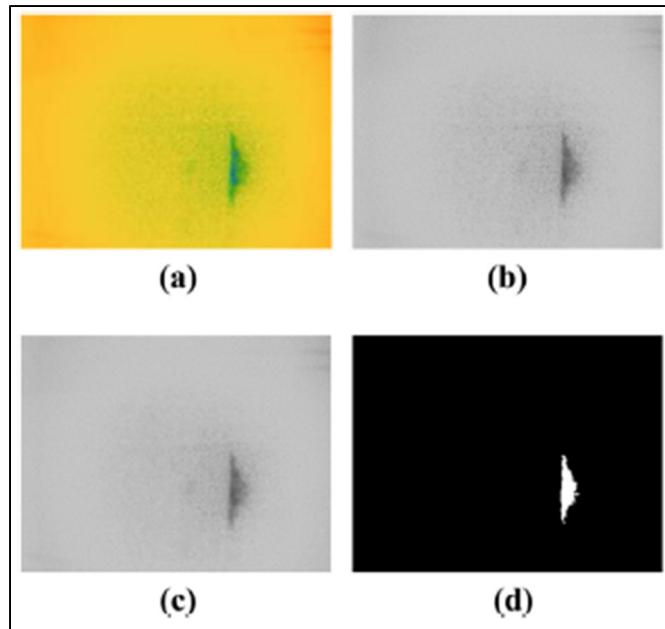


Figure 1.19 Procédure de traitement d'image (a) image infrarouge, (b) image après traitement des gris, (c) image après filtrage et (d) image après binarisation et segmentation de seuil
Tirée de Lu et al. (2019)

Un algorithme est utilisé pour extraire les zones de fuite et les zones sans fuite dans l'image thermographique. L'image de la zone de fuite est la seule à conserver par l'algorithme. La surface entière de l'image thermographique A_0 est calculée au premier lieu selon l'équation 1.3 où d est la distance entre la caméra infrarouge et le mur de tunnel, α est l'angle de vue horizontal de la caméra infrarouge et β est l'angle de vue vertical de la caméra infrarouge (figure 1.12). Ensuite, la surface de fuite A_L est calculée selon l'équation 1.4 où η est la proportion de pixels dans la zone de fuite par rapport à l'image thermique entière (figure 1.20).

$$A_0 = 4d^2 \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) \cdot \tan\left(\frac{\beta}{2}\right) \quad (1.3)$$

$$A_L = A_0 \times \eta \quad (1.4)$$

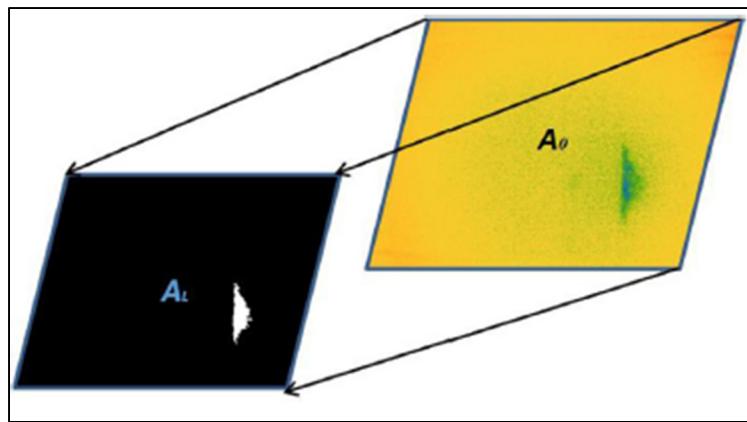


Figure 1.20 Principe de calcul de la surface de fuite d'eau
Tirée de Lu et al. (2019)

Un exemple de calcul de la surface de fuite a été donné par Lu et al. (2019). La figure 1.21 présente les 4 cas de fuites détectées par thermographie infrarouge. Les détails de calcul des surfaces de fuite sont représentés dans le tableau 3.1.

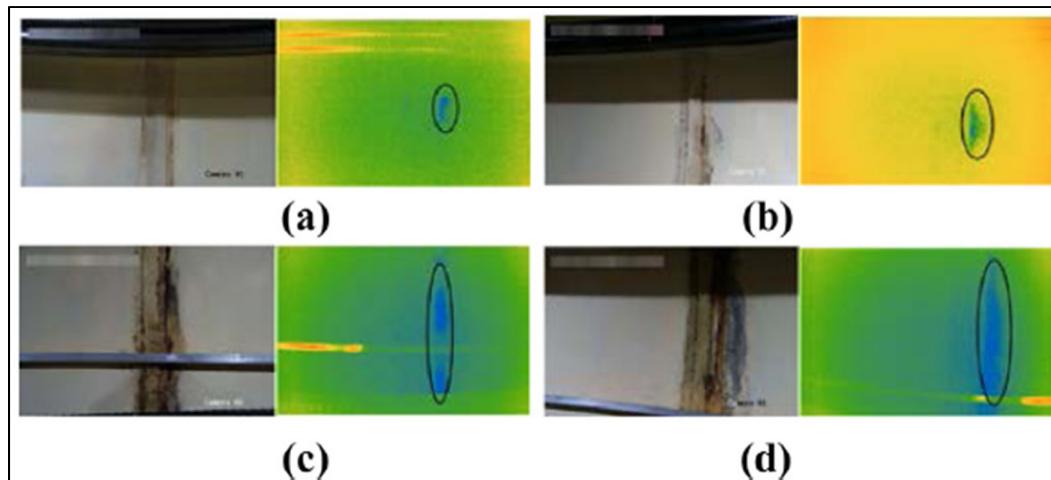


Figure 1.21 Points de fuite : (a) et (b) montrent des fuites qui n'ont pas encore pénétré le mur du tunnel, (c) et (d) montrent des fuites visibles à la surface du tunnel
Tirée de Lu et al. (2019)

Tableau 1.1 Données détaillées sur les quatre fuites représentées dans la figure 1.21

Numéro	Position de fuite (m)	Azimut de fuite (°)	Distance de détection (mm)	Surface de fuite (mm ²)	Degré de fuite
1	115,038	0	1006	3388	Léger
2	278,076	0	1167	9846	Léger à moyen
3	369,248	-9	846	10979	Moyen
4	315,762	0	953	35836	Important

1.3.4 Modélisation numérique de joints de dilatation

Une étude faite par Hounyevou-Klotoé et al. (2018) consiste à développer un modèle numérique 2D du tunnel routier avec la modélisation des joints de dilation à l'aide du programme COMSOL Multiphysics. Le modèle vise à simuler les phénomène thermo-hydrauliques qui contrôlent les infiltrations d'eau et le changement de la phase eau/glace au niveau des joints de dilatation de différentes perméabilités (p. ex. le transfert de chaleur et le débit de fuites). Des conditions aux frontières à l'intrados et à l'extrados du tunnel sont appliquées au modèle numérique. (figure 1.22) (Hounyevou-Klotoé et al., 2018). Les équations de transfert de chaleur et de conductivité hydraulique établies dans cette étude permettent d'évaluer les champs de température et de pression autour de chaque joint durant les saisons estivale et hivernale.

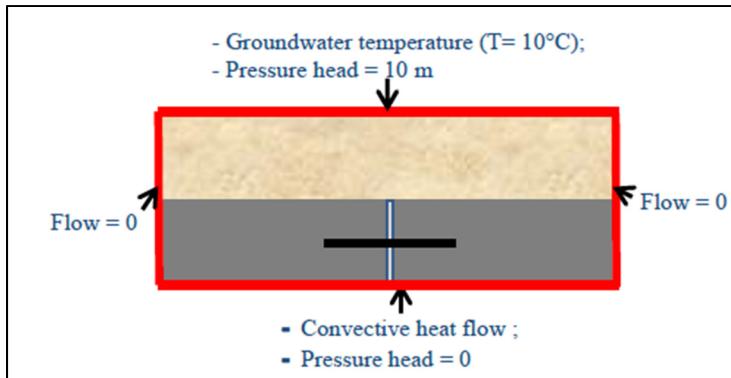


Figure 1.22 Conditions aux frontières appliquées sur le joint
Tirée de Hounyevou-Klotoé et al. (2018)

1.3.5 Limitations

Comme toutes autres méthodes d'investigation, la thermographie infrarouge a des limites d'application. Les conditions environnementales influencent les images thermographiques obtenues et parfois les rendre difficile à réaliser. Citant l'exemple de la quantification des débits d'écoulements des eaux souterraines qui n'est pas réalisable pendant la période hivernale parce que les couches de glace formées modifient et altèrent le chemin d'infiltration des eaux (Mundy et al., 2017). Les images thermographiques obtenus nécessitent des traitements pour différents paramètres comme l'émissivité, la chaleur spécifique et l'humidité (Lerma et al., 2011). En outre, la texture de la surface traitée peut parfois affecter les mesures de la températures (Wimsatt et al., 2013). Une combinaison de différentes méthodes d'investigation non destructives avec la thermographie infrarouge est souhaitable dans certaines circonstances afin de mieux inspecter les dégâts et leur gravité.

La construction des modèles physiques du tunnel dans le but d'étudier les infiltrations d'eau est un axe de recherche qui n'est pas encore développée dans la littérature. Ce projet de recherche présente une première tentative de caractérisation des fuites d'eau au sein d'un modèle réduit du tunnel construit en suivant un protocole développé dans la présente étude.

CHAPITRE 2

MÉTHODOLOGIE

Ce chapitre explique les étapes réalisées pour construire, tester et faire fonctionner le modèle physique des joints.

2.1 Modèle physique et objectifs

Le modèle physique a été élaboré dans le laboratoire de géotechnique de l'ÉTS. Ce modèle présente un modèle réduit des joints de dilatation du tunnel Ville-Marie. Ce dernier est une partie de l'Autoroute Ville-Marie située au centre-ville de Montréal-Canada. Les travaux de construction ont commencé en 1965 et le tunnel a été mis en service en 1974 (Noppen, 2001).

2.1.1 Objectifs

L'objectif principal de la construction du modèle est de tester différents types de joints avec différentes valeurs de perméabilité dans le but de simuler le comportement thermique des joints de dilatation face aux changements de la température (vis-à-vis l'infiltration des eaux). Il vise aussi à développer une corrélation entre l'anomalie de température à la surface du béton, la perméabilité des joints et les débits de fuites à partir des images thermographiques.

2.1.2 Description du modèle

Le montage a la forme d'un prisme rectangulaire. Il est constitué de béton non armé avec un dosage calculé selon la méthode de Kosmatka (2011). Le modèle a une épaisseur de 10 cm, une longueur et largeur de 45 cm et une hauteur de 60 cm. Chaque côté du montage présente un joint d'une épaisseur de 2,54 cm (figure 2.1).

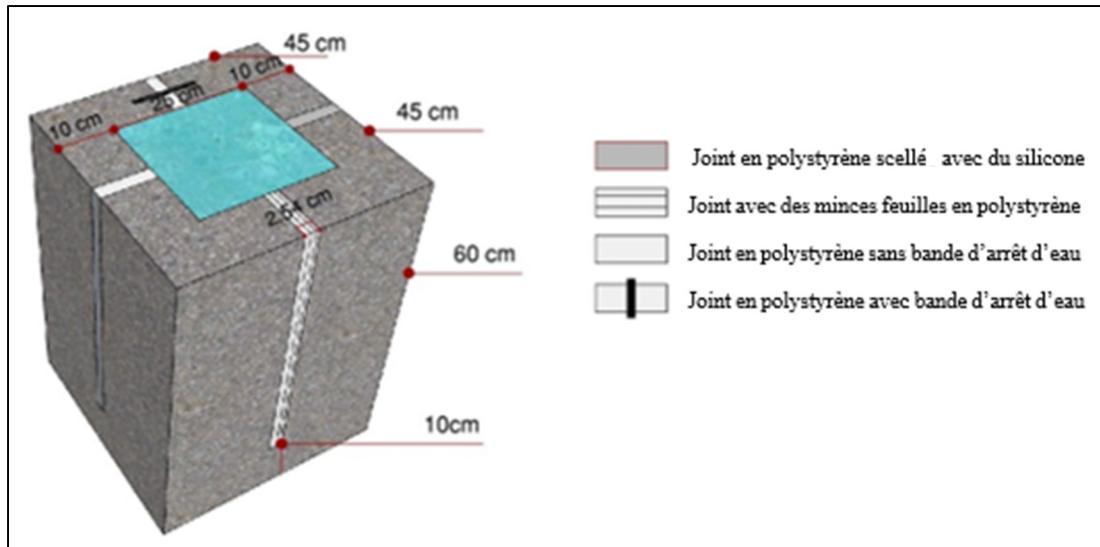


Figure 2.1 Schéma du modèle physique des joints de dilatation

L'étanchéité de la partie supérieure du modèle a été réalisée à l'aide d'un couvercle en polychlorure de vinyle (PVC) et une garniture mise à une profondeur de 2 cm de la surface supérieure du béton pour garantir le scellement du montage. Le couvercle a été ancré dans le béton à l'aide de vis (figure 2.2). Le scellement de l'interface séparant la garniture, le couvercle et le béton a été effectué avec du silicone. Le couvercle comporte deux ouvertures dans sa partie centrale pour permettre la recirculation de l'eau à l'intérieur du modèle réduit. La partie centrale du montage est remplie d'eau. Le montage permettre de contrôler les températures de l'eau et du béton pour simuler la variation de ces paramètres dans l'eau souterraine à l'extrados d'un tunnel.



Figure 2.2 Garniture (à gauche) et couvercle en plastique (à droite) ancré dans le modèle et scellé avec du silicone

Le modèle contient quatre joints différents. Le joint de référence est constitué d'une feuille de polystyrène avec une bande d'arrêt d'eau en PVC. Le deuxième joint est de même nature que le précédent, mais sans bande d'étanchéité. Le troisième joint est formé par des feuilles minces en polystyrène extrudé d'une épaisseur totale de 2,54 cm dans le but de créer des plans d'écoulement préférentiels au sein du joint. Le dernier joint a été rempli d'un coulis ciment-bentonite remplacé par une feuille de polystyrène scellée avec du silicone après sa perte lors des essais préliminaires (figure 2.3). Le but d'utiliser le coulis ciment-bentonite était de construire un joint avec une valeur de perméabilité plus élevée que le polystyrène pour simuler un joint plus perméable.

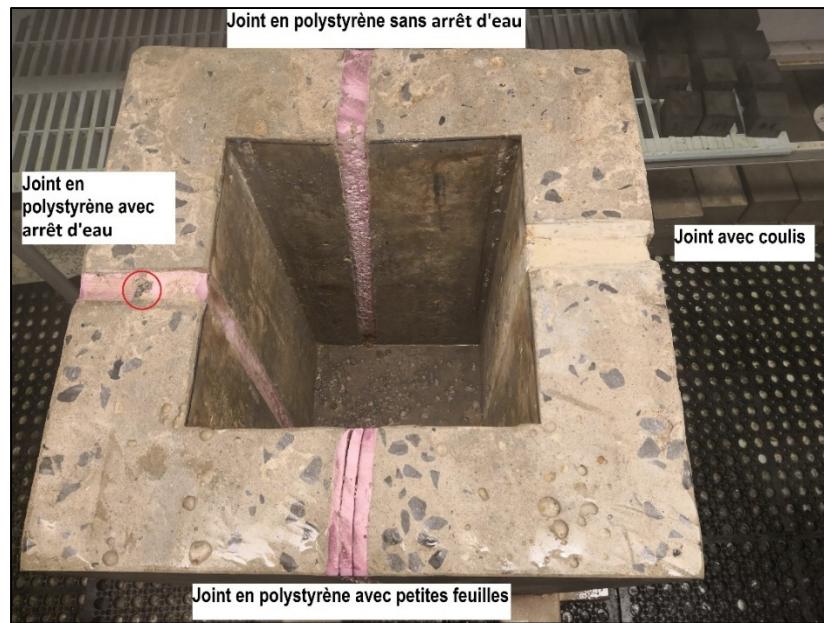


Figure 2.3 Modèle physique après le décoffrage

2.2 Construction du modèle et matériaux

La préparation du modèle a débuté par la construction d'un coffrage en bois fait sur mesure. Ce coffrage a été lubrifié trois à quatre fois quotidiennement sur une période de quatre jours pour faciliter le manœuvre de décoffrage après la période de séchage (figure 2.4).



Figure 2.4 Coffrage du modèle physique avec le positionnement des joints de dilatation

2.2.1 Béton

Le dosage de béton a été calculé selon la méthode de Kosmatka (2011) pour le volume total du modèle réduit. Afin d'empêcher la détérioration du béton, le modèle devait être résistant au gel et dégel de l'eau. Les calculs ont été faits afin d'obtenir une résistance à air entraîné f_{cr} de 30 MPa à 28 jours de cure avec un affaissement minimal de 25 mm et maximal de 75 mm. La résistance moyenne en compression exigée f'_{cr} calculée suite de l'absence d'un écart type est donc de 38,5 MPa. En se basant sur la figure 2.5 et par interpolation, le rapport massique eau/liant (E/C) obtenu est de 0,355. Ce rapport d'eau/liant définit un béton de catégorie F1 avec un intervalle de teneur en air de 5 à 8 %. Un pourcentage de 5 % de chaque élément a été ajouté au mélange pour remplacer la perte de masse lors du malaxage. Les proportions du mélange sont résumées dans le tableau 3.1.

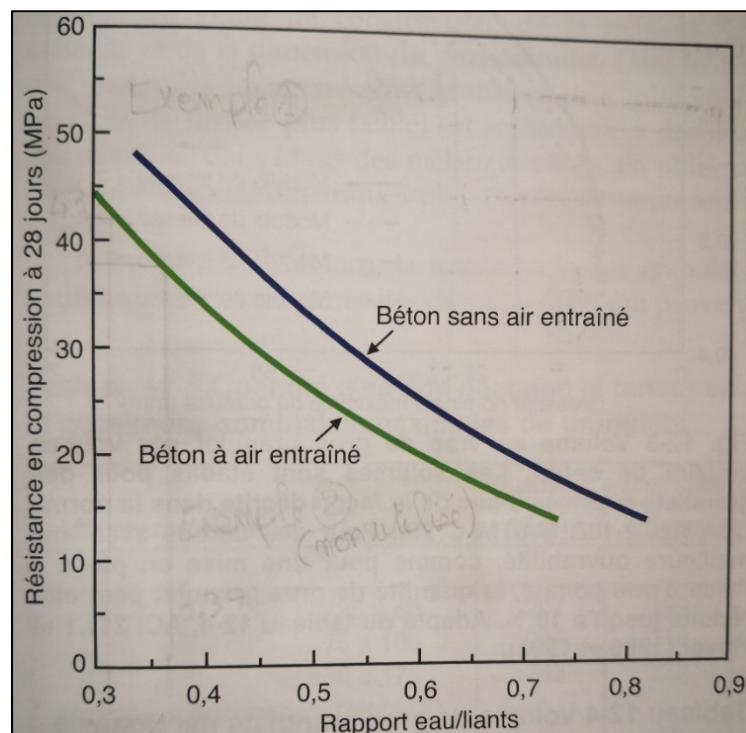


Figure 2.5 Courbes approximatives représentant la relation entre la résistance en compression et le rapport eau/liants
Tirée de Kosmatka (2011)

Tableau 2.1 Composition du mélange de béton

Constituants (unités)	Ratio	Quantité
Eau (kg)	E/C=0,345	22,22
Ciment HE (kg)		65,05
Gros Granulats 0-10 mm (kg)	-	97,95
Granulats fin 0-1.25mm (kg)	-	100,87
Entraîneur d'air (ml/100 kg de liant)	8%	177,59
Superplastifiant (ml/100 kg de liant)	-	520,384

2.2.1.1 Ciment HE

Le ciment utilisé dans le mélange est un ciment hydraulique à haute résistance initiale (HE). Le but d'utiliser ce type de ciment était de procurer une haute résistance en peu de temps et décoffrer le modèle le plutôt possible. Sa formule chimique et son comportement physique sont semblables au ciment à usage général (GU), usuellement utilisé dans la construction des tunnels (Ciment Québec, 2018). Ses caractéristiques permettent de raccourcir la période de cure.

2.2.1.2 Entraîneur d'air

Le EUCON AIR MAC₁₂ a été utilisé dans la recette du béton comme un adjuvant entraîneur d'air selon l'ASTM C260/C233. Il est conçu pour réduire la quantité d'eau de gâchage requise par mètre cube de béton. Il sert à produire des bulles d'air caractérisées par une taille et un espacement approprié formant un réseau de bulles d'air stable. Ce réseau de bulles d'air favorise la résistance du béton face aux cycles gel-dégel répétitifs et aux sels déglaçant et améliore la maniabilité du mélange.

2.2.1.3 Superplastifiant

Le superplastifiant EUCON 37 joue le rôle d'un adjuvant à haut degré de réduction d'eau. Pour un béton avec un faible rapport eau/liant, le superplastifiant est ajouté afin d'améliorer les caractéristiques physiques du mélange (viscosité, fluidité) tout en gardant une résistance envisagée.

2.2.2 Coulis ciment-bentonite

Le coulis ciment-bentonite est un mélange de ciment à usage général et de bentonite de type Opta-Mineral avec un rapport massique bentonite/ciment (B/C) de 0,9. La recette présentée dans le tableau 3.1 est basée sur les essais réalisés par M'nasri (2017). Les ratios calculés servent à réaliser un coulis caractérisé par une perméabilité plus importante que le polystyrène de l'ordre de $1,09 \times 10^{-6}$ m/s.

Tableau 2.2 Recette du coulis ciment bentonite

Type de bentonite	Bentonite Opta-Mineral
Type de ciment	GU
Ratio E/C	6,67
Ratio B/C	0,9
Quantité d'eau (g)	6000
Quantité de ciment (g)	916
Quantité de bentonite (g)	824,4
Température du mélange après mélange (°C)	17,1

Ce coulis a été perdu après les essais préliminaires. Cette perte peut être expliquée par différentes hypothèses. La volatilité de la bentonite est une des causes les plus raisonnables. Le sac de bentonite utilisé est daté de mai 2017 et n'a pas été bien conservé contre l'humidité du laboratoire. La bentonite Opta-Mineral n'est plus disponible sur le marché ce qui impose l'obligation d'utiliser la quantité disponible au laboratoire. Durant les essais préliminaires, le joint en coulis a été laissé à l'air libre sans humidification pour une période de trois jours afin de faire sécher le silicone ce qui a engendré la dessiccation du joint. Il a été remarqué que la bentonite a perdu ses caractéristiques en comparant les caractéristiques du coulis obtenu avec les données présentées par M'nasri (2017).

2.2.3 Joints en polystyrène

Le matériel utilisé pour construire les joints dans le modèle physique est le polystyrène extrudé de type FOAMULAR (figure 2.6). C'est un polystyrène rigide qui résiste à la compression et qui peut aussi jouer le rôle d'un isolant thermique dans les fondations.



Figure 2.6 Feuilles de polystyrène extrudé utilisées dans le modèle réduit

2.2.4 Bande d'arrêt d'eau

Une bande d'arrêt d'eau est une bande en PVC avec des spécifications utilisée pour assurer l'étanchéité des joints de construction et de dilatation dans des différentes structures comme les tunnels, les barrages et les ouvrages en béton (figure 2.7).

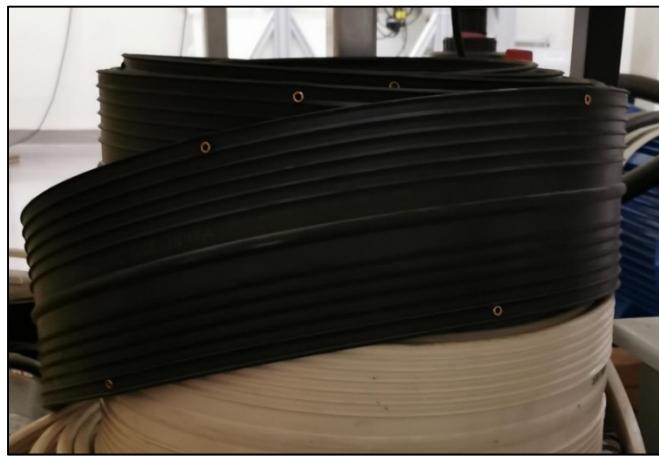


Figure 2.7 Rouleaux de bande d'arrêt d'eau
Sika Greenstreak modèle 702

La bande d'arrêt d'eau incorporée dans le modèle physique est de type Sika Greenstreak modèle 702. Elle sert à empêcher le passage d'eau par le joint (figure 2.8). Elle est formée d'un diaphragme en PVC présentant des nervures sur ses deux faces et centré par un bulbe (figure 2.9). La présence du bulbe assure la capacité de suivre les mouvements latéraux, transversaux et de cisaillement subis par le joint de dilatation.

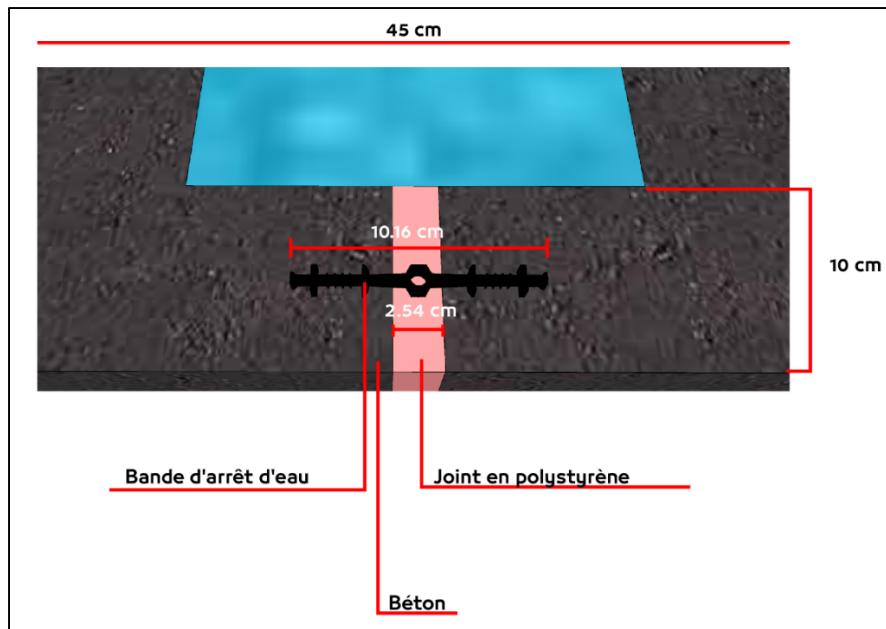


Figure 2.8 Installation de la bande d'arrêt d'eau au niveau du joint

NO.	STD. WT.	HEAD PRESS.
702	0.74 lb/ft (1.10 kg/m)	65' (194 KPa)

Figure 2.9 Caractéristiques de la bande d'arrêt d'eau
Tirée de Sika (2015)

2.2.5 Préparation du modèle réduit

Cette section présente les différentes étapes suivies pour la réalisation du modèle physique.

2.2.5.1 Construction du modèle

La procédure de construction du modèle débute par la préparation des constituants. La première étape de mélange consiste à introduire les granulats dans le mélangeur à béton accompagné d'une petite quantité d'eau de gâchage. Ensuite, l'agent entraîneur d'air EUCON Air Max₁₂ a été ajouté après avoir été mélangé avec une quantité minimale d'eau. L'adjuvant entraîneur d'air est ajouté avec les granulats parce que c'est le composant le plus absorbant dans le mélange.

La deuxième étape sert à introduire le ciment suivi du sable. L'eau de gâchage est ajoutée au mélange en deux étapes. Chaque étape nécessite une durée minimale de malaxage de 3 minutes. Le superplastifiant EUCON 37 est incorporé au mélange avec la portion finale d'eau. La durée finale de malaxage est de 5 minutes pour bien intégrer le superplastifiant au mélange. À cause de la grande quantité de béton à produire, cette procédure est faite deux fois avec des quantités égales de constituants.

2.2.5.2 Procédure de la mise en place du béton

La phase de mise en place du béton commence après la préparation du béton. Le béton frais a été coulé dans le coffrage en 3 étapes. La répartition du mélange dans les coins du modèle est assurée par un vibrateur pendant le coulage. À cause de l'effet de vibration, les joints ont bougé parce qu'ils n'ont pas été encastrés dans le coffrage. Leur partie supérieure a été fixée après la première phase de coulage avec des bouts de bois (figure 2.10).



Figure 2.10 Modèle réduit avec coffrage

Des échantillons de béton ont été préparés pour déterminer les caractéristiques de béton après la période de cure, notamment par des essais de compression et de perméabilité. Après 24 heures, les échantillons ont été démoulés et mis dans la chambre humide pour une période de cure minimale de 28 jours.

2.2.5.3 Mise en garde et période de cure

Après le compactage de béton, l'intérieur du modèle a été rempli d'eau afin de favoriser son humidification (figure 2.11). Le modèle a été couvert par des tissus et une bâche en plastique pour empêcher l'évaporation d'eau et la perte d'humidité (figure 2.12). Le modèle a été humidifié trois fois par jour durant cinq jours pour assurer le suivi de la réaction d'hydratation. Cinq jours après la construction, la partie extérieure du modèle a été décoffrée et le modèle a été placé dans la chambre humide. Le décoffrage de la partie intérieure a été fait 60 jours après la construction.



Figure 2.11 humidification de l'intérieur du modèle



Figure 2.12 Couverture du modèle réduit

2.3 Essais à l'état frais

Trois types d'essai ont été réalisés sur les échantillons de béton frais afin de déterminer les caractéristiques du mélange. La masse volumique du béton a été calculée à l'aide d'une tare de référence d'un diamètre de 20,32 cm. Un essai d'affaissement de béton a été effectué selon la norme ASTM C143M. l'objectif de cet essai est de valider la maniabilité du béton frais et d'établir sa consistance. La teneur en air du béton fraîchement mélangé a été aussi déduite selon la norme ASTM C231 (figure 2.13). Les résultats enregistrés à la suite des essais accomplis sur le béton frais sont présentés dans le tableau 2.3.

Tableau 2.3 Propriétés physiques du béton à l'état frais

Propriétés physiques	
Affaissement (mm)	70
Masse volumique_(béton) (kg/m³)	2350
Masse_(modèle réduit en béton) (kg)	197,4
Teneur en air (%)	6
Température (°C)	19,1



Figure 2.13 Essai de la teneur en air du béton frais

2.4 **Essais à l'état solide**

Des essais de matériaux ont été effectués sur le béton afin de déterminer ses propriétés hydraulique et mécanique. Des essais de perméabilité ont été réalisés sur deux échantillons de béton de 4" de diamètre selon la méthode C de la norme ASTM D5084-16a. La conductivité hydraulique du béton a été mesurée de l'ordre de $4,2 \cdot 10^{-12}$ m/s.

Les essais de compression de béton ont été réalisés selon la norme ASTM C39/39M-18. Deux échantillons de béton en total ont été testé à 14 et 28 jours de période de cure. Les résultats obtenus sont représentés dans le tableau 2.4.

Tableau 2.4 Résultats des essais de compression du béton

		Test de compression	
		Après 14 jours de cure	Après 28 jours de cure
Charge maximale (kN)		318,16	330,70
Contrainte maximale (MPa)		40,5	42,1

2.5 Instrumentation par des thermocouples

Des thermocouples de type T ont été installés sur les quatre faces du modèle réduit. Ces thermocouples se caractérisent par une plage de température qui varie de -200°C jusqu'à 350°C avec une marge d'erreur de $\pm 0,1^\circ\text{C}$.

Après la période de cure, le modèle est prêt à installer les thermocouples. L'installation de ces derniers nécessite le forage de trous à des distances de 5 et 10 cm de part et d'autre du joint (figure 2.14). Chaque trou comporte deux thermocouples superposés de façon à avoir une mesure de température à 3 cm de profondeur et une autre à 7 cm de profondeur par rapport à la surface extérieure du béton (figure 2.15). L'objectif de cette instrumentation est de suivre la variation de la température le long de l'épaisseur du béton.

Les thermocouples ont été soudés et calibrés avant d'être installés sur le modèle. La calibration consiste à plonger les thermocouples dans l'eau à différentes températures et dans la glace (50, 20 et -10°C) (figures 2.16 et 2.17).

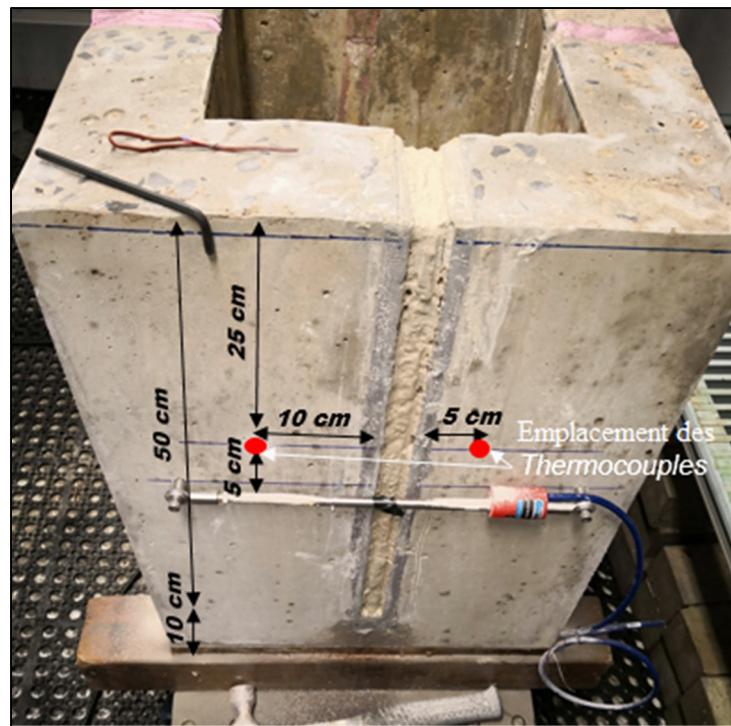


Figure 2.14 Emplacement des deux séries de thermocouples au niveau du joint de dilatation

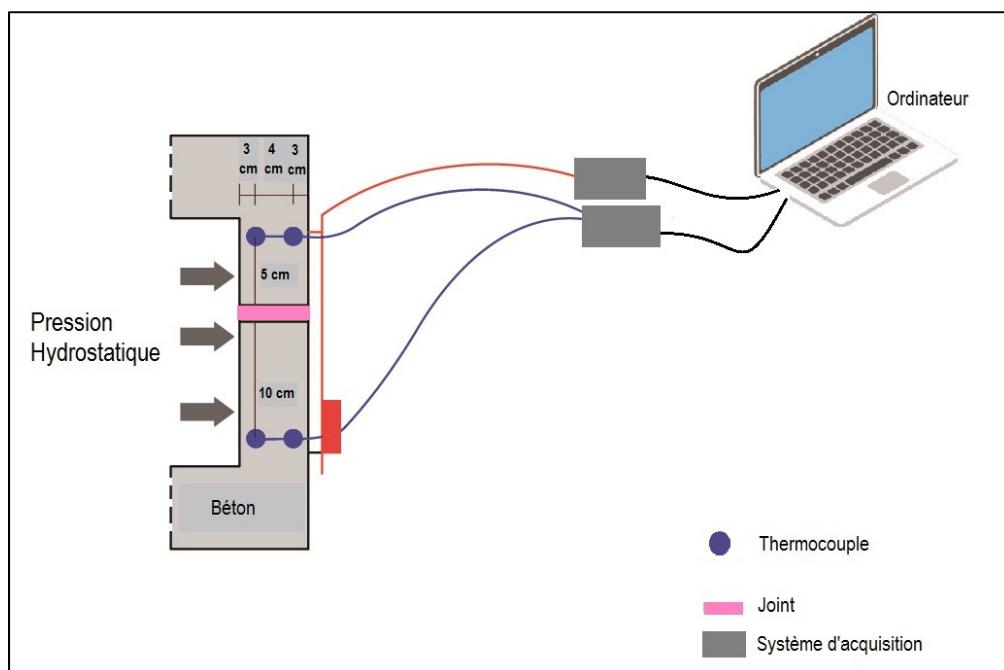


Figure 2.15 Instrumentation du joint et emplacement des thermocouples



Figure 2.16 Calibration des thermocouples
à une température pièce de 20,4°C



Figure 2.17 Calibration des thermocouples
à une température chaude de 50,8°C

Après être calibrés, les thermocouples ont été nommés et regroupés deux par deux au moyen de gaines thermo-rétractables. Chaque série comporte deux thermocouples superposés et décalés à une distance de 4 cm. Le thermocouple inférieur (n) est donc placé à une profondeur de 7 cm à partir de la surface extérieure du béton. Le thermocouple supérieur (n+1) est placé à une profondeur de 3 cm (figure 2.18). Chaque joint est instrumenté avec deux séries de thermocouples placés à 5 cm et à 10 cm de part et d'autre du joint.

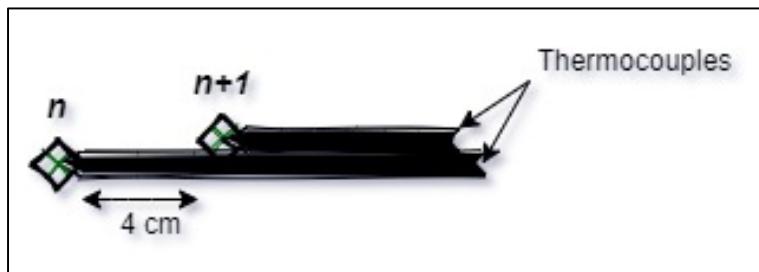


Figure 2.18 Sketch de positionnement des thermocouples

L'installation des séries de thermocouples est assurée à l'aide d'un coulis de ciment dont les caractéristiques sont présentées dans le tableau 3.1. Le ratio eau/ciment du coulis est le même que pour le béton afin de rapprocher sa valeur de conductivité thermique à celle du béton (figure 2.19). Des trous de diamètre de 6 mm ont été forés dans les endroits désirés. Une petite quantité de coulis de ciment a été introduite dans les trous à l'aide d'une seringue. Ensuite, les thermocouples ont été mis en place et le vide restant a été garni en coulis de ciment (figure 2.20).

Tableau 2.5 Caractérisation du coulis de ciment

Constituants	Ratios	Quantité
Eau	E/C = 0,35	1000 g
Ciment HE		2857 g
Superplastifiant (taux de 647,5 ml/100 kg)	-	18,5 ml



Figure 2.19 Coulis de ciment préparé pour le scellement des thermocouples



Figure 2.20 Installation des séries de thermocouples

L'enregistrement des données thermiques se fait à l'aide d'une carte d'acquisition et d'un programme LabView ayant une capacité allant jusqu'à 18 canaux (figure 2.21). Un nombre total de 16 thermocouples est intégré dans le modèle physique. La disposition et la désignation des thermocouples sont illustrés dans le tableau 2.6. L'acquisition des données a été faite aussi pour deux autres thermocouples, un plongé dans l'eau à l'intérieur du modèle et l'autre placé à l'air libre à côté du montage. La température de l'eau du refroidisseur a été prise manuellement.



Figure 2.21 Carte d'acquisition des thermocouples
International Instruments

Tableau 2.6 Disposition des instruments au sein du modèle

Joint	Emplacement (cm)		Thermocouples
	Série (cm)	Distance (cm)	
1 (avec bande d'arrêt d'eau)	5	3	TH16
		7	TH15
	10	3	TH14
		7	TH13
2 (sans bande d'arrêt d'eau)	5	3	TH12
		7	TH11
	10	3	TH10
		7	TH09
3 (feuilles minces)	5	3	TH04
		7	TH03
	10	3	TH02
		7	TH01
4 (coulis C-B remplacé par une feuille de polystyrène)	5	3	TH06
		7	TH05
	10	3	TH08
		7	TH07

2.6 Montage expérimental

Cette section décrit les installations faites et les étapes suivies afin d'établir un montage expérimental permettant de suivre le comportement des différents types de joints face au changement de la température et de l'eau circulante à l'intérieur du modèle réduit.

2.6.1 Assemblage du montage

Plusieurs installations ont été faites afin de réaliser le montage expérimental. La préparation du montage a débuté par l'installation des tuyaux en PVC liant deux bassins d'eau au modèle physique. Ces deux bassins servent à contenir les eaux entrantes et sortantes du modèle. Un refroidisseur a été monté sur le bassin 1 dans le but de refroidir l'eau et la garder à la température désirée durant les essais. Le mouvement des eaux à travers les bassins est contrôlé par des valves en plastique. Une pompe péristaltique est installée sur le même bassin 1. Cette pompe sert à faire circuler l'eau du bassin 1 vers l'intérieur du modèle physique. L'ensemble du montage est montré dans la figure 2.22.

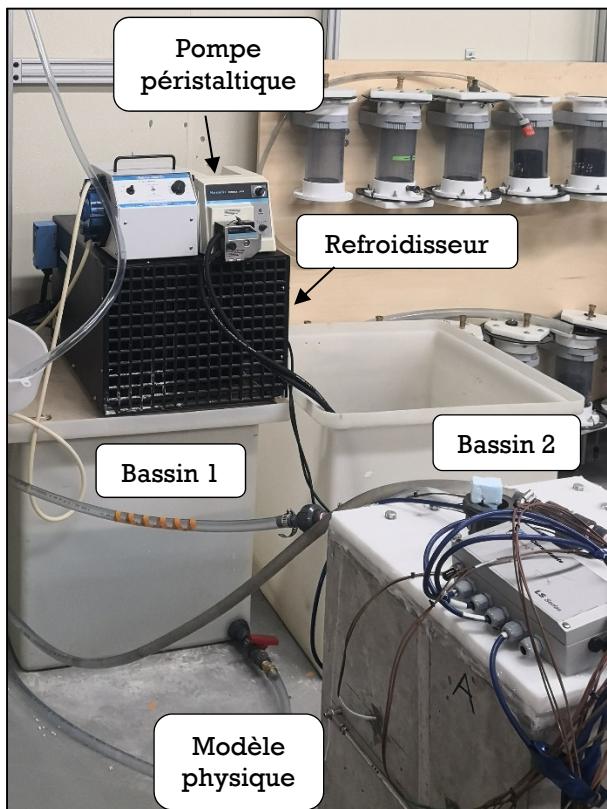


Figure 2.22 Montage expérimental

Au niveau des quatre joints du modèle, des sections d'aluminium en forme de U sont installées en vue de drainer les eaux de fuites. Ces eaux seront récupérées et pesées pour estimer le débit de fuite pour chaque joint (figure 2.23).

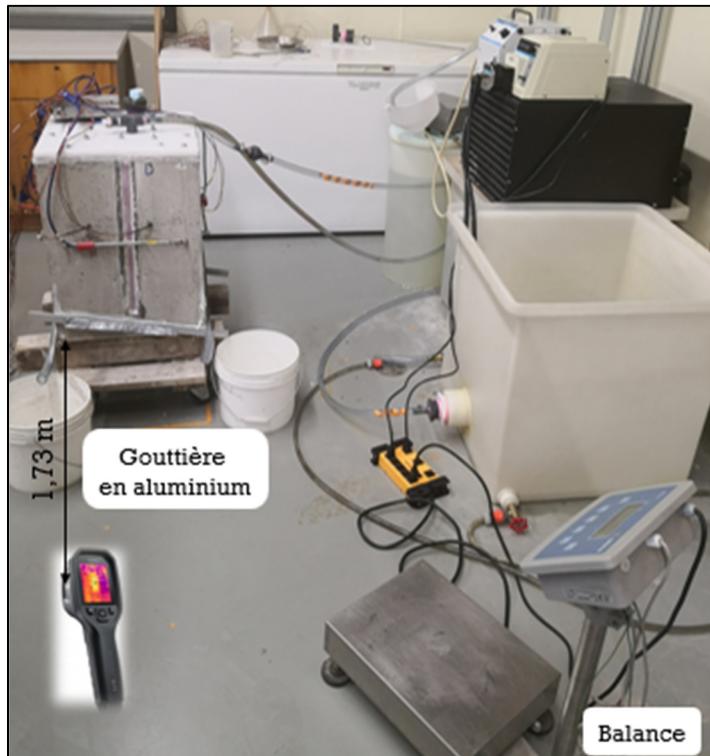


Figure 2.23 Mise en place des sections en aluminium et installation de la caméra infrarouge

En termes d'acquisition des données, les thermocouples installés sur le modèle réduit sont connectés à une carte d'acquisition gérée par un ordinateur via le programme LabVIEW.

2.6.2 Installation pour la thermographie infrarouge

L'installation d'une caméra infrarouge modèle FLIR-E64501 a été réalisée en face de chaque joint. La caméra a été placée à une distance de 1,73 m du joint (figure 2.23). Cette distance est gardée constante pour les différents joints du modèle afin de prendre des images thermographiques sous les mêmes conditions. La caméra infrarouge utilisée se caractérise par

une résolution infrarouge de 320×240 pixels. La plage de température de l'objet qu'elle peut mesurée est de -20 à 650°C avec une sensibilité thermique inférieur à 0,05°C à 30°C. La gamme spectrale de la caméra est de 7,5 à 13 μm . Une série de thermographies infrarouges a été prise pour chaque joint aux 15 minutes pendant la première heure de chaque cycle de six heures, puis chaque heure pour le reste du cycle.

2.6.3 Mode opératoire

Beaucoup de difficultés ont été survenues afin de sceller la partie supérieure du modèle physique. Après réussir à sceller le modèle et la mise en place du montage expérimental vient l'étape de le faire fonctionner. L'essai désiré consiste à suivre les réponses des joints de dilatation vis-à-vis le changement brusque de la température de l'eau circulante à l'intérieur du modèle qui représente l'intrados du tunnel.

Après plusieurs tentatives de faire fonctionner le montage expérimental, des essais préliminaires ont été réalisés afin de tester la fonctionnalité du modèle physique. Des essais principaux ont été effectués sur le montage dont le plan expérimental est présenté dans la figure 2.26. Chaque essai comporte deux phases. La durée de chaque phase est de six heures. La première phase est faite à température pièce (aux alentours de 20°C) et la deuxième est réalisée à une température plus froide sans que l'eau se gèle dans le bassin. La différence entre les deux cycles est l'utilisation du glycol lors de la deuxième phase afin d'empêcher l'eau de se geler dans le bassin. Une quantité de 4 L d'éthylène de glycol a été ajoutée au début de l'essai, ensuite une quantité de 8 L au milieu et 12 L pendant la dernière heure de l'essai. La durée pour changer les conditions de l'essai entre les deux phases a été estimée d'environ 30 minutes. Un bac a été utilisé comme un bassin d'alimentation dans le but de favoriser la quantité de glycol par rapport à celle de l'eau et faciliter la prise de la température de l'eau à l'intérieur (figure 2.24).

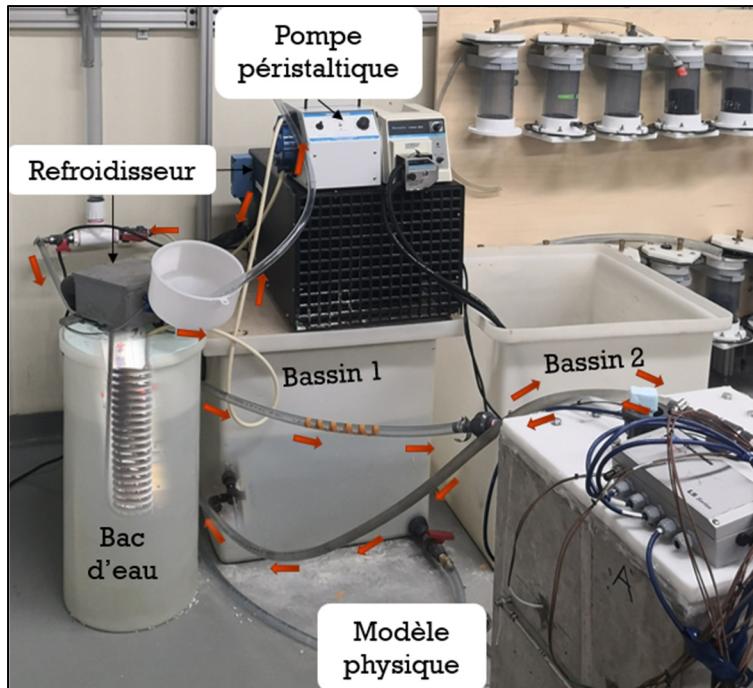


Figure 2.24 Bac d'alimentation d'un mélange d'eau et d'éthylène de glycol avec circuit de circulation d'eau

Le trajet de circulation de l'eau commence par le bassin 1 à l'aide d'une pompe péristaltique puis elle rentre dans le modèle physique en sortant à la fin vers le bassin 2 (figure 2.24). L'eau froide est plus dense que l'eau chaude ce qui signifie que durant la deuxième phase de l'essai l'eau chaude est expulsée rapidement par la sortie du modèle vers le bassin 2.

L'acquisition des données thermiques commence même avant de faire circuler l'eau pour enregistrer les changements brusques de la température (figure 2.25). Des débits de fuites ont été pris à toutes les 15 minutes durant la première heure de chaque phase, puis chaque heure pendant le reste de l'essai.

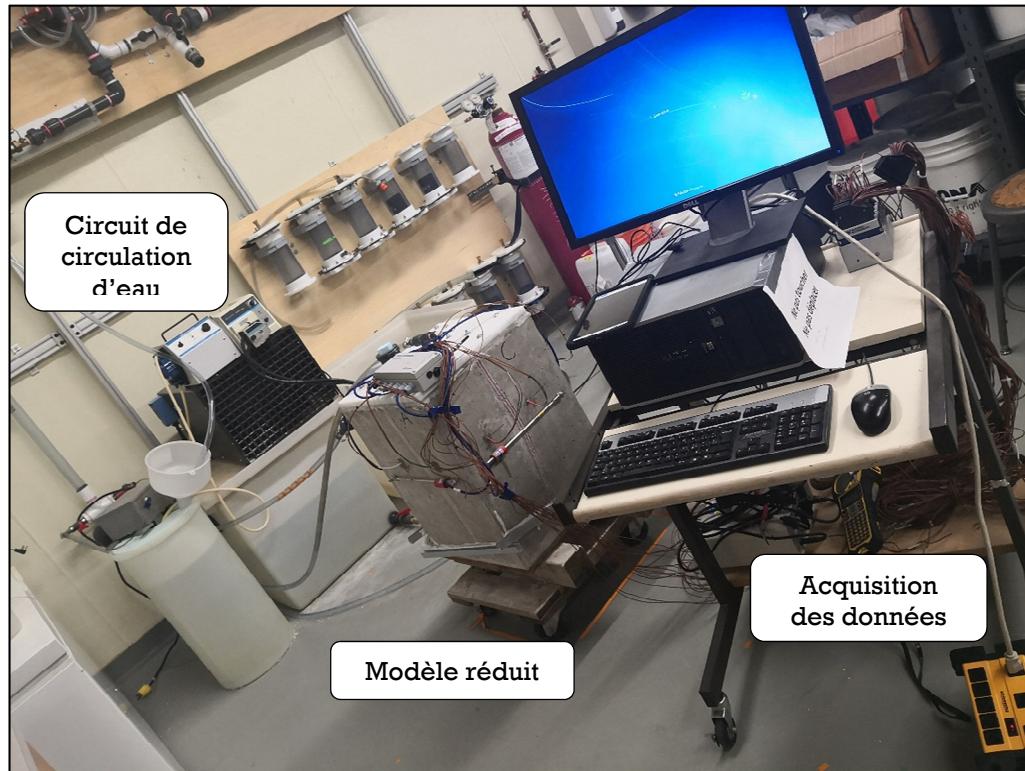


Figure 2.25 Montage expérimental et acquisition des données

Des fuites incontrôlables ont été survenues durant les essais préliminaires sur le modèle physique. Par suite de ces fuites, le niveau d'eau a été fixé au niveau supérieur du montage et donc un trou a été foré au niveau du couvercle afin de contrôler l'élévation de l'eau à l'intérieur du modèle.

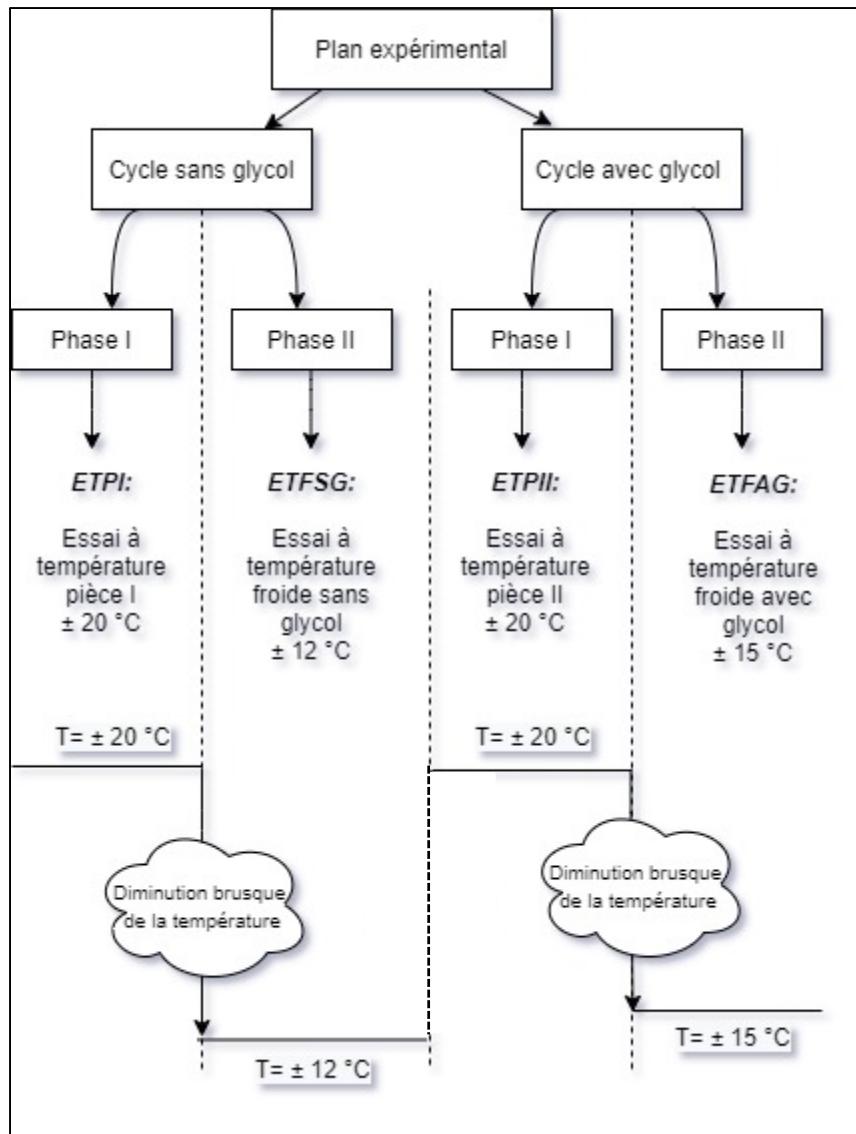


Figure 2.26 Organigramme du plan expérimental avec le profil de température

CHAPITRE 3

RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

L'objectif de ce chapitre est de présenter la variation des températures et des débits mesurés pour le modèle physique de joints. La température de l'eau à l'intérieur du montage et la température du béton ont été mesurées avec des thermocouples. La température à la surface du béton a été mesurée par thermographie infrarouge. Ce chapitre compare les variations dans le temps des températures et des débits pour chaque joint.

3.1 Essais préliminaires

Un essai préliminaire a été fait sur deux phases avec une durée d'une semaine pour chaque phase. La première phase a été lancée avec une température de l'eau de 8°C dans le refroidisseur et de 10,4°C à l'intérieur du modèle. Après 17 minutes de circulation de l'eau, les premières fuites ont commencé à apparaître à travers les joints. Les joints 3 et 4 sont les joints les plus perméables (figure 3.1). Le joint 2 montre de petites fuites au niveau de la partie inférieure alors que le joint 1 ne présente pas de fuite, mais des traces d'humidité sur la surface du béton aux alentours de la partie supérieure du joint (figure 3.2). Des petites fuites contrôlables ont été observées à l'interface entre la plaque en plastique et la surface supérieure du béton. Après deux heures d'essai, les fuites sont de moins en moins présentes au niveau des joints.

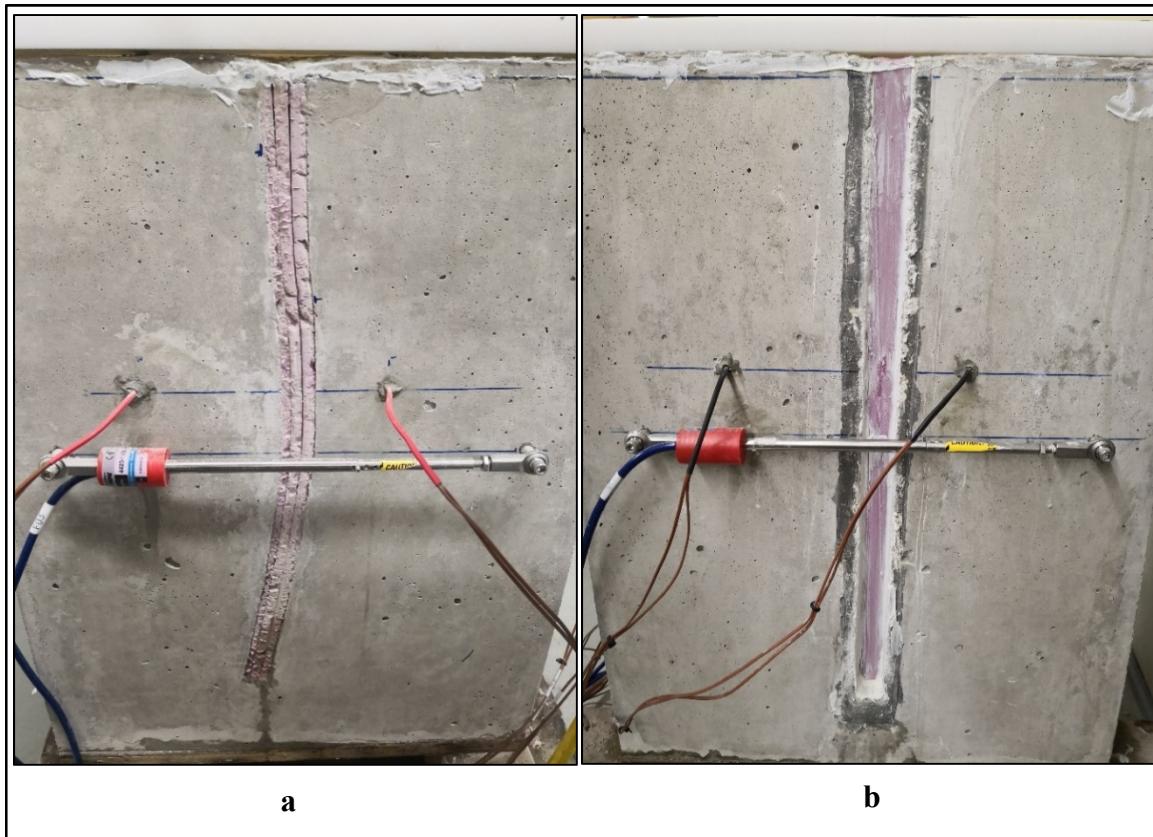


Figure 3.1 Fuites d'eau observées pour les joints 3 (a) et 4 (b) au début de la première phase

La température du refroidisseur a été fixée à 22°C pour la deuxième phase de l'essai. La température du laboratoire était de 20°C. Le temps pris pour le changement de l'eau dans le bassin était de 10 minutes. Après 52 minutes de circulation de l'eau à travers le modèle, la température de l'eau à l'intérieur du modèle était de 14,5°C. À la fin de cette phase de l'essai, les écoulements sont absents dans les différents joints, sauf le joint 4 qui présente une petite fuite due au scellement après avoir remplacé le coulis de ciment-bentonite par une feuille de polystyrène (figures 3.3).

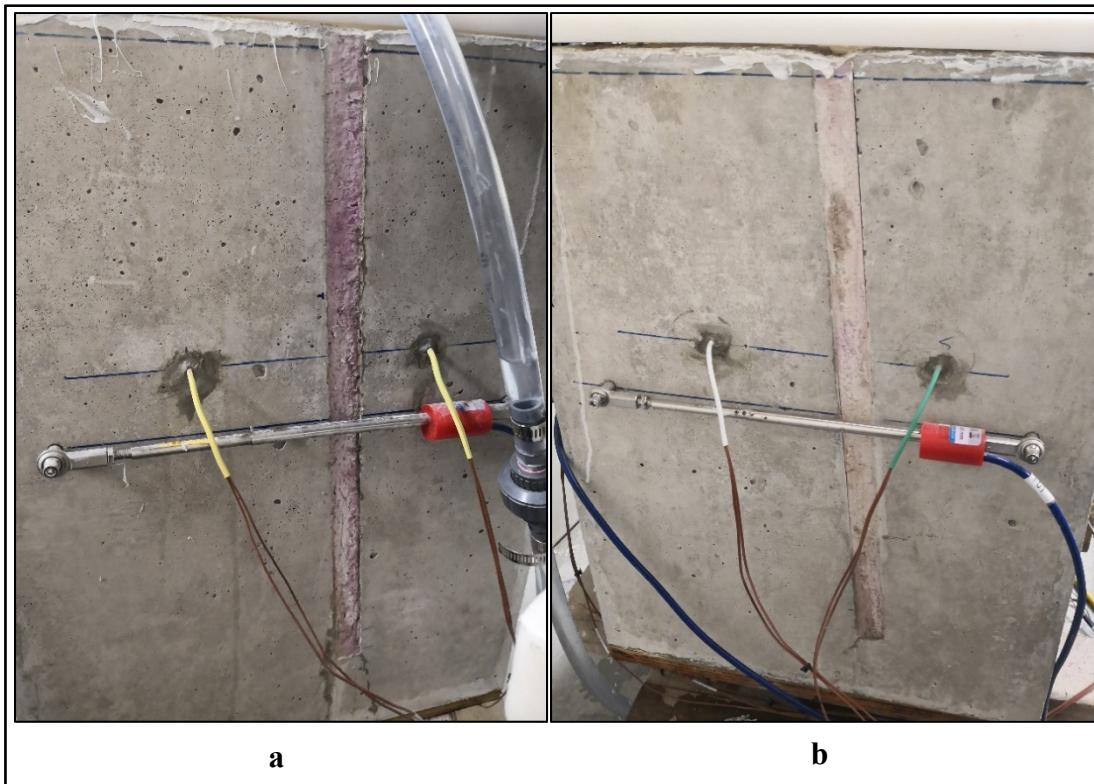


Figure 3.2 Fuites au niveau du joint 2 (a) et traces d'humidité au niveau de la partie inférieure du joint 1 (b) au début de la première phase

Les enregistrements des thermocouples montrent la variation de la température en fonction du temps durant l'essai. Ces données sont représentées dans les figures 3.5 à 3.8. D'après les courbes de variation de la température en fonction du temps, on peut remarquer que durant la première phase de l'essai, il existe des écarts entre les enregistrements des différentes séries de thermocouples. En effet, pour les quatre joints, les courbes de la température enregistrée par les thermocouples installés à une profondeur de 7 cm pour les deux séries de thermocouples (à 5 cm et 10 cm) sont parfaitement confondues. Ces températures sont plus basses d'environ $\pm 2^{\circ}\text{C}$ que celles enregistrées par les thermocouples installés à une profondeur de 3 cm.

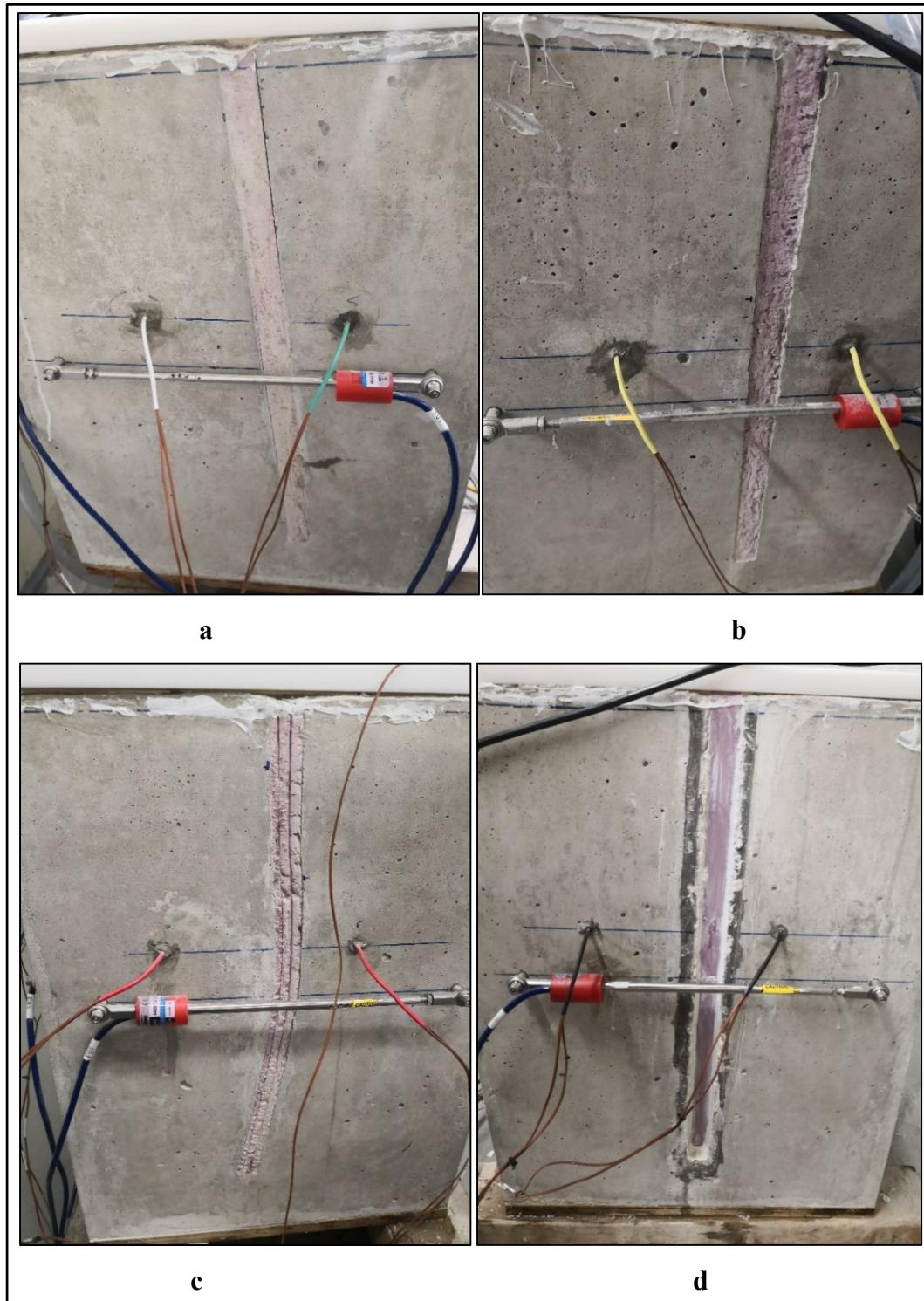


Figure 3.3 États des joints durant la deuxième phase de l'essai préliminaire ; pas d'écoulement pour les joints 1, 2 et 3 (respectivement a, b et c) et une petite fuite au niveau du joint 4 (d)

Les données de température indiquées par les thermocouples à 3 cm sont confondues pour le joint 4 (figure 3.8). Dans le cas des joints 1 et 3, les températures enregistrées à 5 cm sont plus élevées de $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ que celles enregistrées à 10 cm de l'autre côté du joint alors que pour le joint 2 c'est le cas inverse avec une marge plus petite que dans les joints précédents (figures 3.5, 3.6 et 3.7). Cette différence de température peut être expliquée par le degré de fuite au niveau du joint 3 qui a présenté un débit d'écoulement non négligeable ainsi que la fuite remarquée à partir de la plaque supérieure du modèle qui a engendré l'humidification de la surface extérieure du béton aux alentours du joint (figure 3.4).

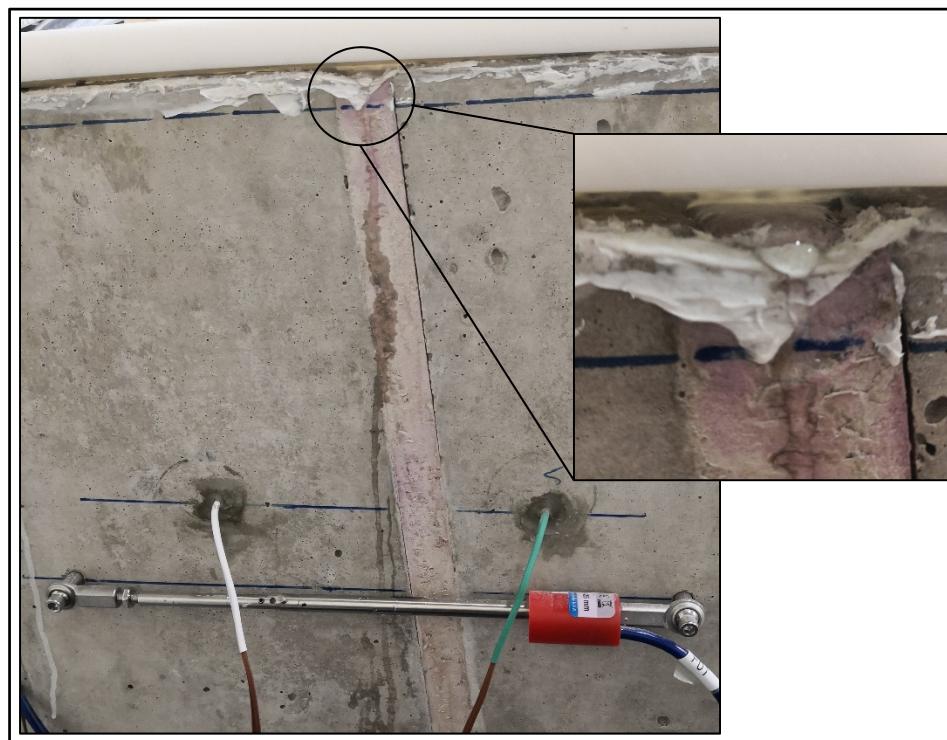


Figure 3.4 Écoulement d'eau à travers la plaque supérieure du modèle au niveau du joint 1

La deuxième phase de l'essai a été réalisée à une température pièce de 22°C . les enregistrements de la température pour cette phase sont parfaitement superposés pour tous les joints (figures 3.5 à 3.8). La température se stabilise à 20°C après une durée de 2350 minutes (39 heures) depuis le début de la deuxième phase. Un deuxième palier commence à se former durant la journée 4 de la deuxième phase. Il montre une hausse de température allant jusqu'à

une valeur de 22,5°C, même si les conditions de l'essai n'ont pas été changé. La différence existante entre les courbes de températures enregistrées à 3 et 7 cm durant la première phase est absente dans la deuxième phase où les courbes sont parfaitement confondues. Ceci peut être expliqué par l'absence d'un gradient thermique entre l'extérieur et l'intérieur du modèle.

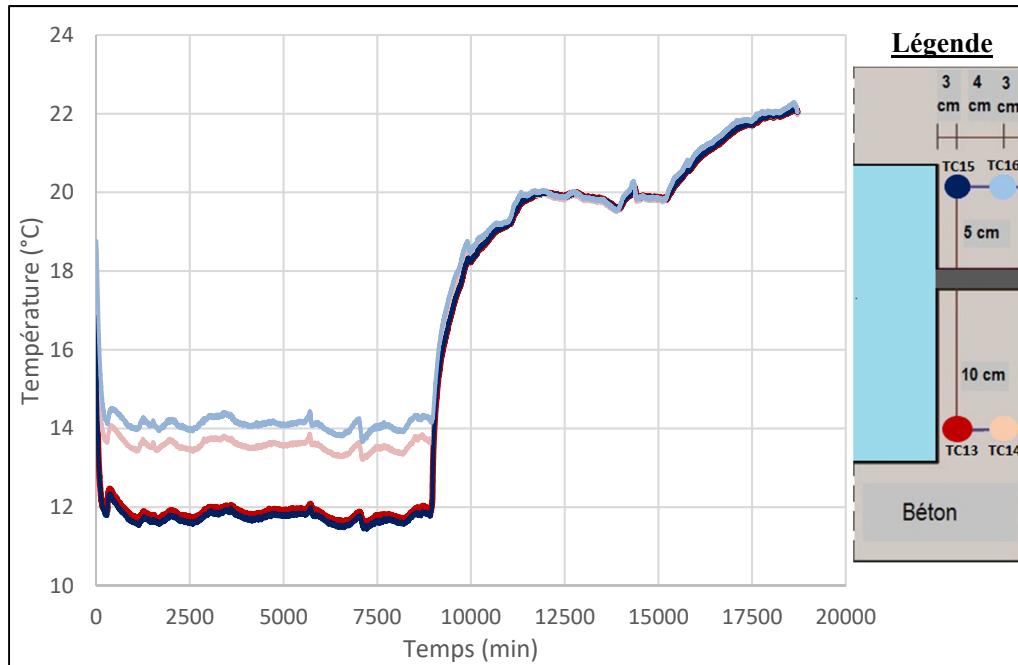


Figure 3.5 Variation de la température en fonction du temps durant l'essai préliminaire pour le joint 1

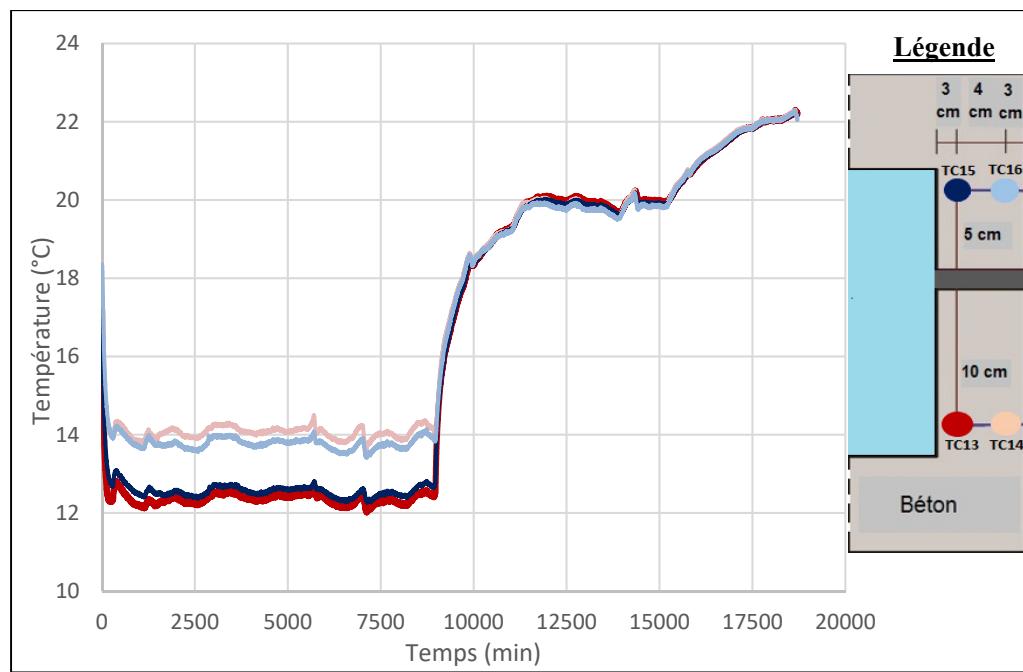


Figure 3.6 Variation de la température en fonction du temps durant l'essai préliminaire pour le joint 2

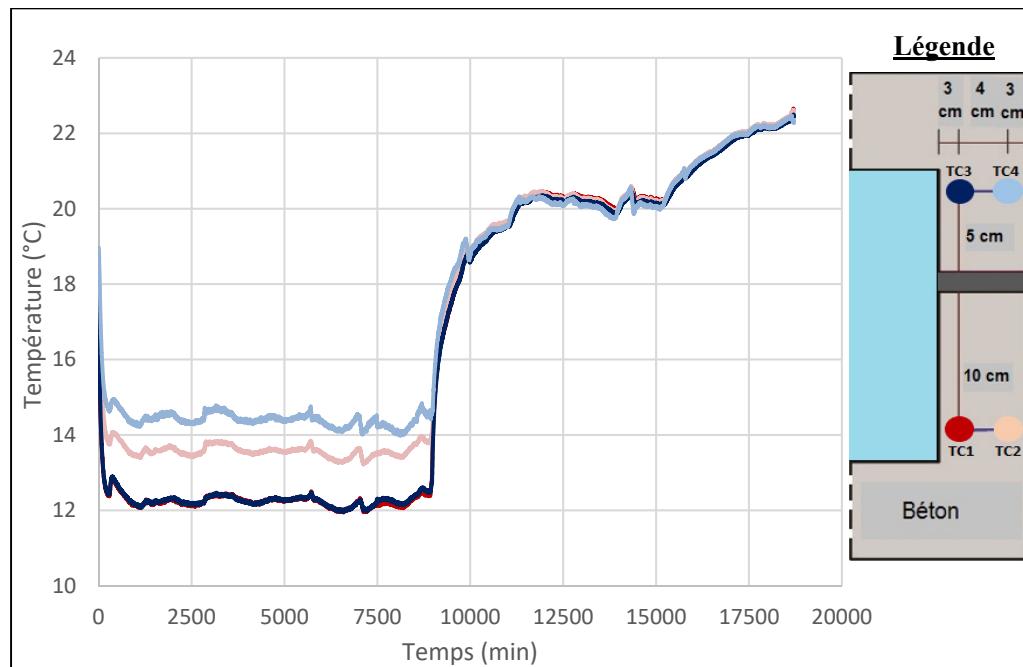


Figure 3.7 Variation de la température en fonction du temps durant l'essai préliminaire pour le joint 3

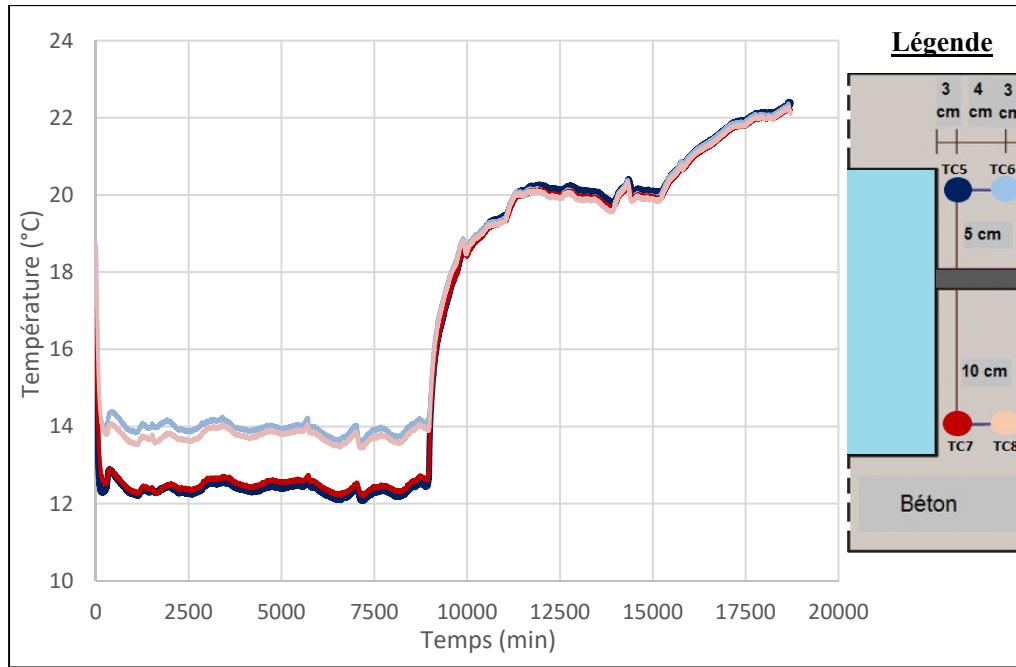


Figure 3.8 Variation de la température en fonction du temps durant l'essai préliminaire pour le joint 4

3.2 Données thermiques

Beaucoup de données thermiques ont été enregistrées afin de suivre les comportements des joints durant les essais ETPI, ETFSG, ETPII et ETFAG. Les températures du béton, de l'eau à l'intérieur du modèle réduit, de l'eau s'écoulant des joints et du laboratoire sont représentées et comparées dans cette section.

3.2.1 Cycle d'essai sans glycol

Durant le premier cycle d'essai, le modèle réduit a été soumis à une eau à la température de la pièce (20°C, ETPI), puis à une eau plus froide sans l'ajout de glycol (12°C, ETPSG). La procédure de l'essai est décrite dans la section 2.5.2.

Les courbes de la température de l'eau à l'intérieur du modèle et de l'air sont représentées dans la figure 3.9. La température de l'eau sortante a été mesurée manuellement chaque deux à trois heures durant l'essai. Les données saisies sont résumées dans la figure 3.9.

3.2.1.1 ETPI

Durant cette phase de l'essai, l'eau à la sortie du modèle présente des valeurs de température plus basses que celles mesurées pour l'eau à l'intérieur du modèle réduit (figure 3.9). Cette différence de température de $0,5^{\circ}\text{C}$ peut être expliquée par l'effet d'évaporation à la surface du béton et la variation de la température du laboratoire. Les courbes de température en fonction du temps se suivent et sont confondues pour les différents joints (figures 3.10 à 3.13). Les valeurs de température minimale et maximale enregistrées pour cette phase sont respectivement $19,9$ et $21,0^{\circ}\text{C}$.

En comparant les températures enregistrées par les thermocouples installés dans le béton avec celles de l'eau à l'intérieur du modèle physique, une différence de réponse aux changements de la température se dévoile entre les différents joints. En effet, les joints 1 et 2 présentent des températures plus faibles que l'eau à l'intérieur du modèle. Les températures du joint 4 sont similaires à celles de l'eau à l'intérieur du modèle. Les thermocouples du joint 3 montrent des températures un peu plus élevées que l'eau à l'intérieur du modèle.

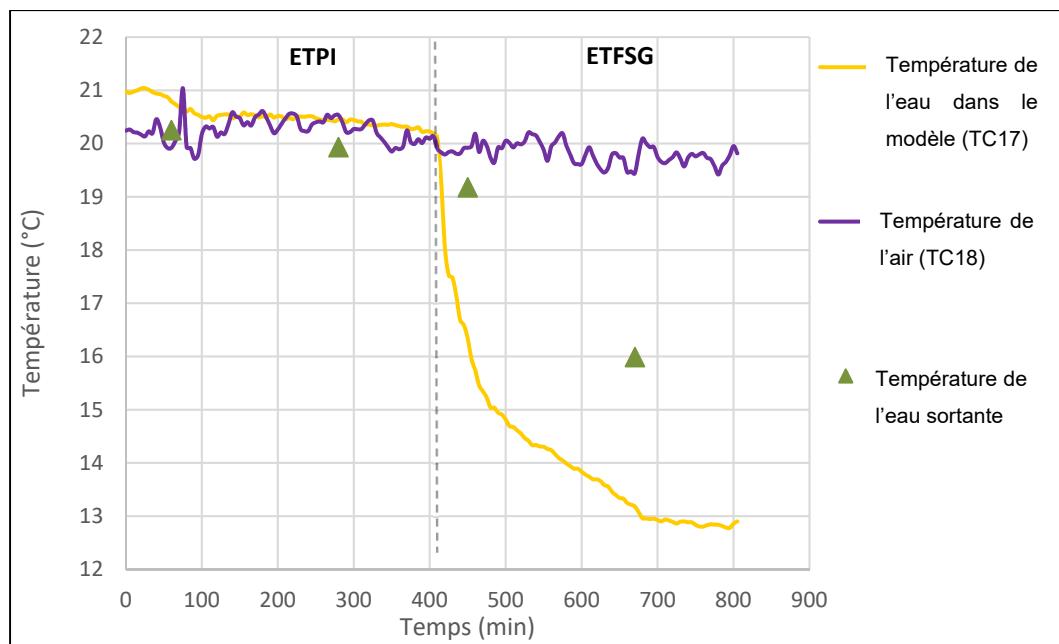


Figure 3.9 Variation des températures de l'eau entrante et sortante du modèle et de l'air durant le premier cycle d'essai

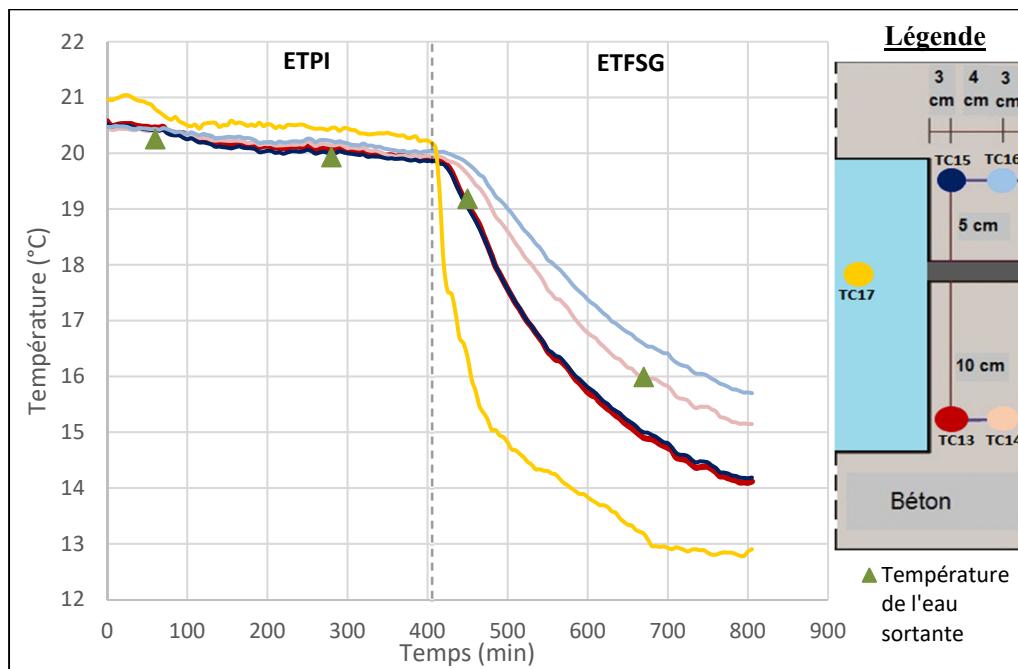


Figure 3.10 Courbes de température en fonction du temps durant le premier cycle d'essai pour le joint 1

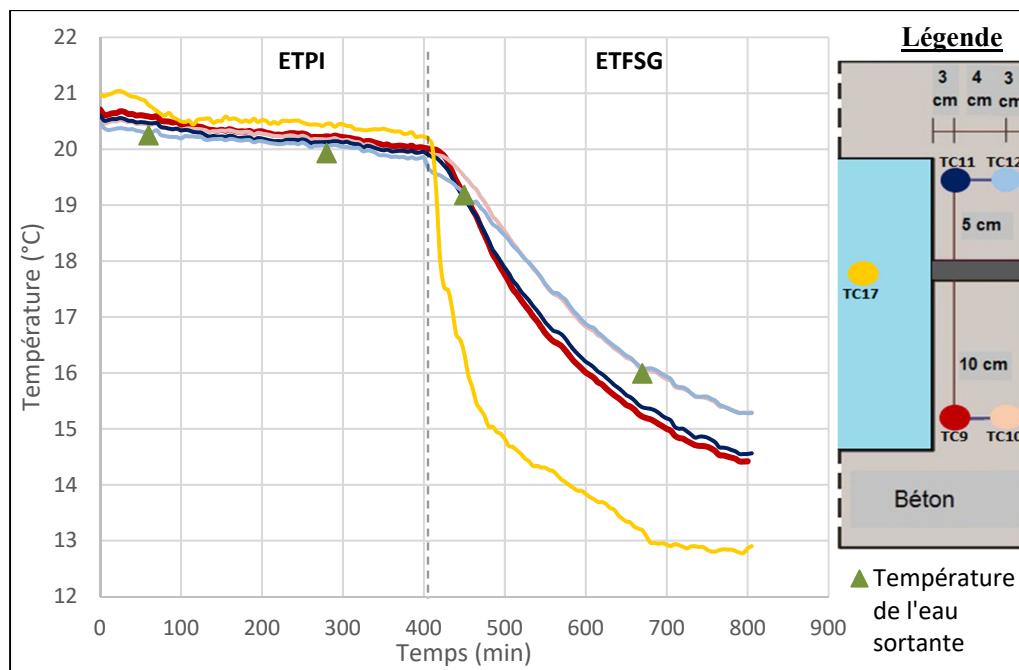


Figure 3.11 Courbes de température en fonction du temps durant le premier cycle d'essai pour le joint 2

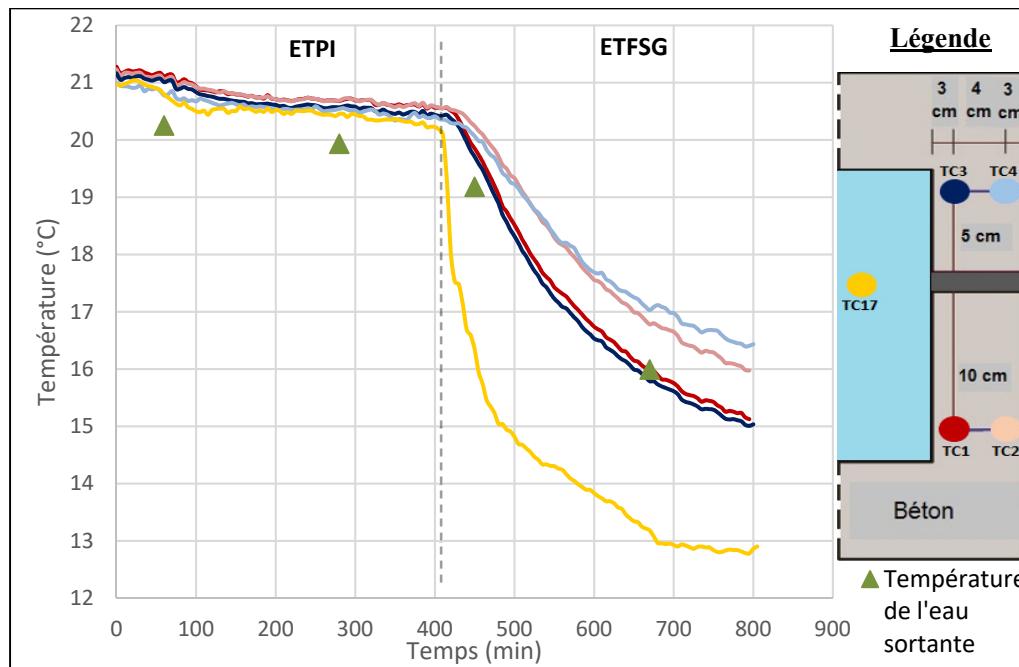


Figure 3.12 Courbes de température en fonction du temps durant le premier cycle d'essai pour le joint 3

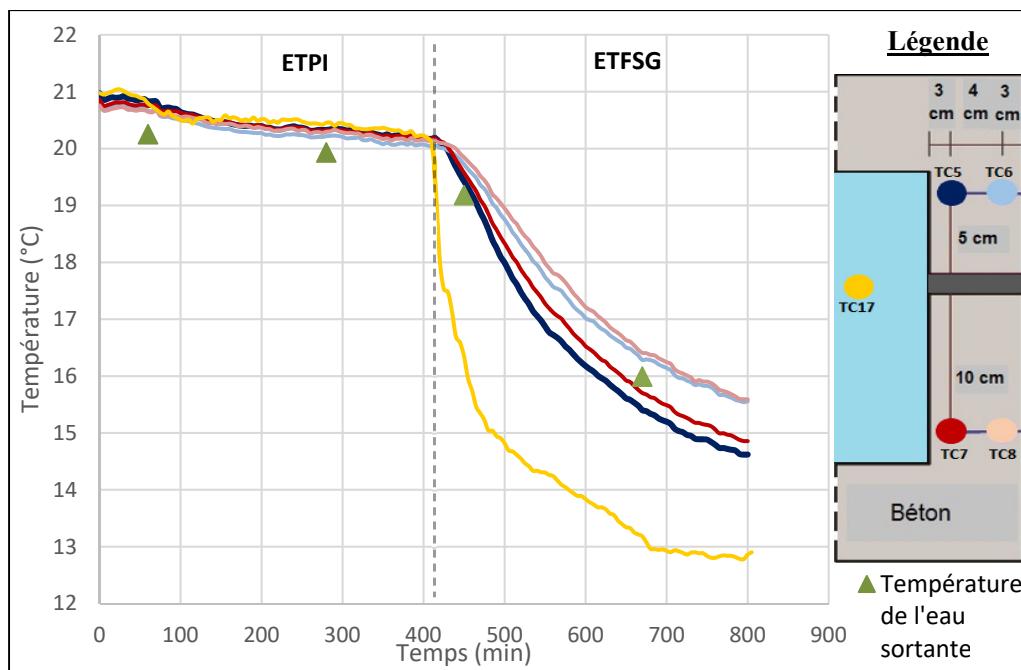


Figure 3.13 Courbes de température en fonction du temps durant le premier cycle d'essai pour le joint 4

3.2.1.2 ETFSG

La deuxième phase consiste à changer l'eau à l'intérieur du modèle par une eau plus froide. La température du refroidisseur a été fixée à 7°C. Durant cette phase d'essai, l'eau qui sort des joints a des températures plus élevées que celles enregistrées à l'intérieur du modèle physique (figure 3.9). La température du laboratoire était la plupart du temps au-dessous de 20°C.

Les températures minimale et maximale enregistrées durant cette phase sont respectivement 14,2 et 20,3°C. Les thermocouples installés à une profondeur de 3 cm enregistrent les températures les plus élevées pour les quatre joints et les deux séries de thermocouples. La différence entre les températures à 3 et 7 cm de profondeur peut être estimée à $\pm 1^\circ\text{C}$ (figures 3.10 à 3.13). La réponse des thermocouples installés à 7 cm varie d'un joint à l'autre. Le joint 1 montre le plus faible degré de différence (à peu près 1,8°C par rapport à la température de l'eau circulante à l'intérieur du modèle). La plus grande différence est remarquée pour le joint 4

(2,6°C). Les joints 2 et 4 enregistrent des écarts approximativement de 2,0°C et 2,4°C respectivement.

Pour le joint 1, les courbes de température mesurées à une profondeur de 7 cm sont parfaitement confondues. Les températures sont aussi confondues dans le cas du joint 2 jusqu'à la deuxième heure de l'essai. Un faible écart est alors créé avec des températures un peu plus élevées à 10 cm qu'à 5 cm (figure 3.10). Le cas inverse est observé pour les températures à une profondeur de 3 cm alors que les températures à 10 cm sont plus élevées que celles à 5 cm au début de l'essai. Ces courbes sont confondues à partir de la deuxième heure de l'essai. La valeur de l'écart entre les courbes à une profondeur de 7 cm augmente progressivement du joint 2 jusqu'au joint 4 avec inversion des courbes où celles enregistrées par la série à 5 cm présentent les valeurs de température les plus élevées. Les courbes de température enregistrée à une profondeur de 7 cm sont confondues pour le joint 1, alors qu'un écart est apparu dans le cas du joint 2. Le thermocouple installé à 5 cm du joint pour la même profondeur enregistre des températures un peu plus faibles qu'à 10 cm. Le cas inverse est représenté par le joint 3 tout en gardant l'écart de température entre les deux courbes. Cet écart est plus prononcé dans le cas du joint 4 où les températures à 5 cm sont plus élevées d'environ 0,4°C que les températures enregistrées à 10 cm.

Les températures enregistrées à une profondeur de 3 cm pour les thermocouples à 5 cm du joint 1 sont plus élevées d'à peu près 0,6°C par rapport à celles enregistrées à 10 cm (figure 3.10). Une inversion des courbes est survenue pour ces valeurs de température dans le cas du joint 3. À la même profondeur, la température pour la série à 5 cm devient plus élevée que celle à 10 cm avec une marge qui tend à augmenter dans le temps (figure 3.12). Les changements subis par les joints 2 et 3 sont survenus durant la même heure d'essai. Le joint 4 présente des températures à 5 cm un peu plus faibles que celles à 10 cm pendant la deuxième phase d'essai (figure 3.13).

3.2.2 Cycle d'essai avec glycol

Ce cycle d'essai comporte aussi deux phases, mais il se caractérise par l'ajout de l'éthylène de glycol lors de sa deuxième phase afin d'empêcher l'eau de geler. La première phase de l'essai (ETPII) a été réalisée à température pièce (20°C). La deuxième phase a été lancée à une température froide de 7 °C avec l'ajout du glycol. La température à la fin de cette phase a atteint une valeur de -1°C après l'ajout de six bouteilles de glycol de 4 L pour que l'eau ne gèle pas dans le bac.

Les courbes de variation des températures de l'eau circulante à l'intérieur du modèle et de l'air sont représentées dans la figure 3.14. La température de l'eau sortante a été mesurée d'une façon manuelle chaque deux à trois heures durant l'essai. Les données saisies sont résumées dans la figure 3.14.

3.2.2.1 ETPII

Au début de cette phase, la température de l'eau sortante du modèle était plus élevée que la température de l'eau interne. Ce dernier paramètre a augmenté durant la quatrième heure de l'essai pour atteindre une valeur maximale de 20,6°C. Par suite de cette augmentation, la température de l'eau sortante devient plus faible que celle de l'eau interne. Il est à noter que la température du laboratoire variait entre 20,3°C et 23,8°C ce qui influence notamment la température de l'eau sortante du modèle (figure 3.14).

Les courbes de variation de température en fonction du temps pour les différents joints sont représentées dans les figures 3.15 à 3.18. Ces courbes d'enregistrement de température montrent que pour le joint 1, la température de l'eau interne est plus élevée que celle enregistrée par les deux séries de thermocouples. Les températures minimale et maximale enregistrées pour le joint 1 durant cette phase sont respectivement de 19,5°C et 20,3°C. Les températures saisies à 3 cm pour les deux séries sont plus proches à la température de l'eau interne. Ces températures deviennent confondues à partir de la deuxième heure de l'essai pour une durée d'une heure et 35 minutes. Un écart de température de 0,3°C a été remarqué entre les

enregistrements des deux séries (figure 3.15). Cet écart a disparu pendant la quatrième heure de l'essai après l'augmentation de la température de l'eau interne en laissant une marge de 0,5°C entre les valeurs de ce dernier et les enregistrements des deux séries de thermocouples.

Au début de cette phase, les courbes de variation de la température de l'eau interne et les températures de béton se suivent dans le cas du joint 2 où les enregistrements des deux séries sont confondus avec une petite élévation de température enregistrée à une profondeur de 3 cm et une distance de 10 cm du joint. Les températures minimale et maximale enregistrées pour le joint 2 durant cette phase sont respectivement de 19,7°C et 20,2°C. Au moment de l'augmentation de la température de l'eau interne, la courbe de température saisie à une profondeur de 3 cm pour la série de 5 cm du joint croise les autres courbes pour enregistrer les températures les plus faibles jusqu'à la fin de cette phase (figure 3.16). Ce changement a été aussi remarqué dans le cas des joints 3 et 4. Il a été accompagné par le même comportement de la courbe de température enregistrée à une profondeur de 3 cm pour la série de 10 cm du joint 4. Pour donner suite à cette variation, les températures à une profondeur de 7 cm pour les deux séries enregistrent les températures le plus élevées pour les joints 2, 3 et 4 (figures 3.16, 3.17 et 3.18).

Pour le joint 3, les températures enregistrées sont plus élevées que la température de l'eau interne le long de cette phase d'essai. L'écart de température est d'une valeur moyenne de 0,5°C au début de l'essai. Cet écart a disparu pendant la quatrième heure de l'essai mais les courbes gardent des valeurs de température supérieure à celle de l'eau circulante à l'intérieur du modèle (figure 3.17). Les températures minimale et maximale enregistrées pour ce joint sont les plus élevées avec des valeurs de 20,2 et 20,8°C respectivement.

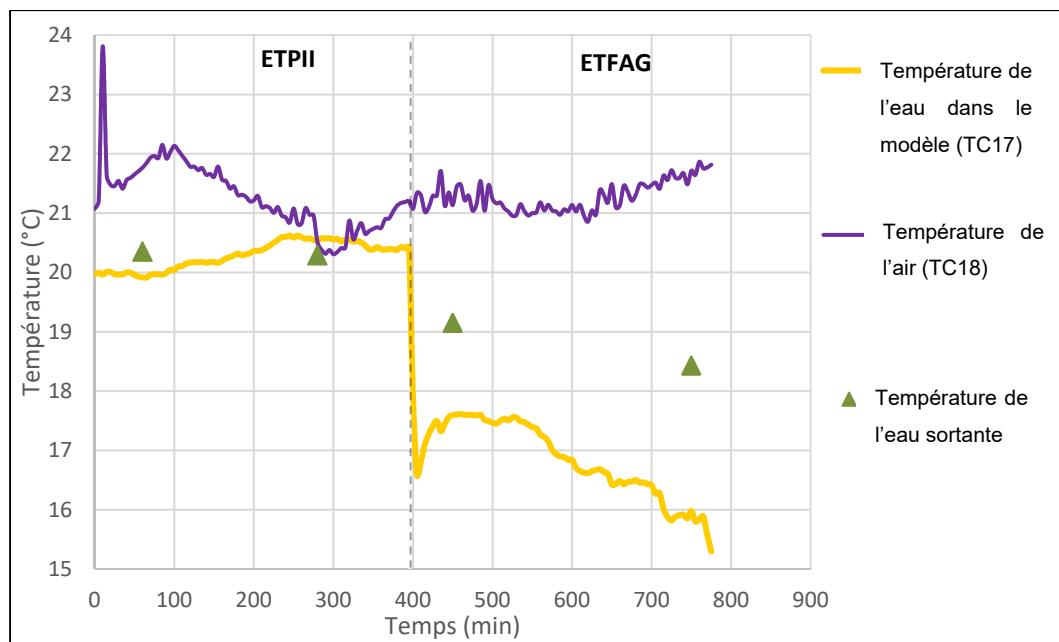


Figure 3.14 Variation des températures de l'eau entrante et sortante du modèle et de l'air durant le deuxième cycle d'essai

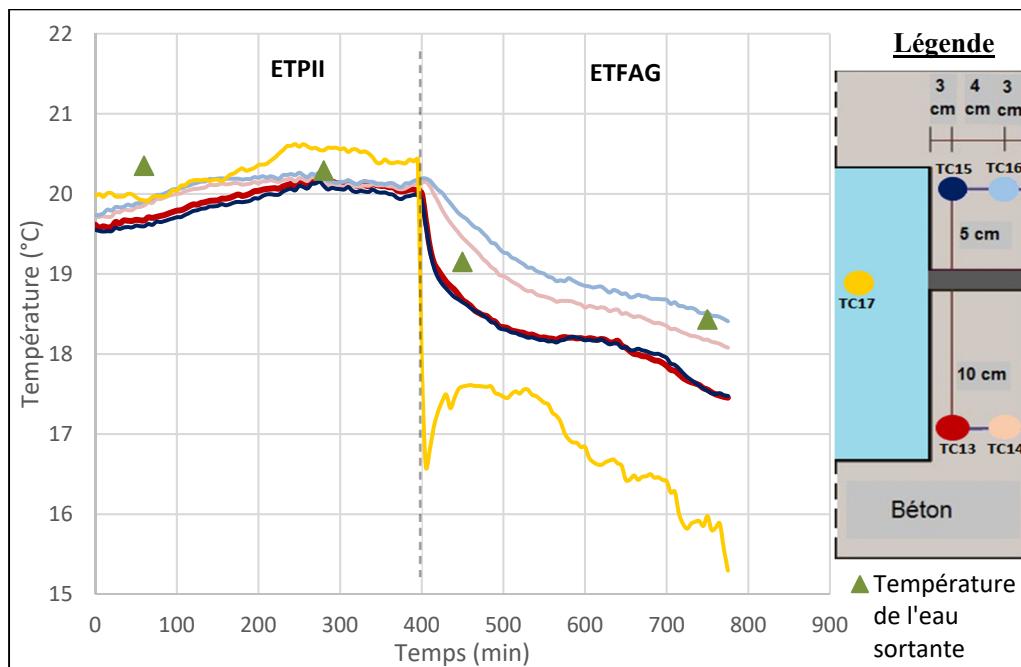


Figure 3.15 Courbes de température en fonction du temps durant le deuxième cycle d'essai pour le joint 1

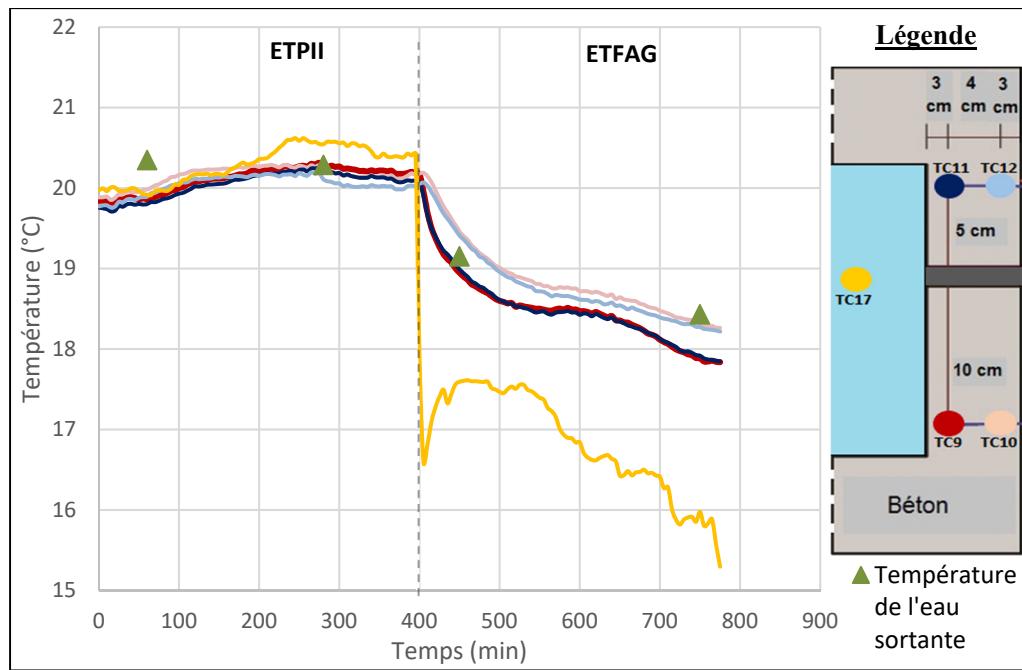


Figure 3.16 Courbes de température en fonction du temps durant le deuxième cycle d'essai pour le joint 2

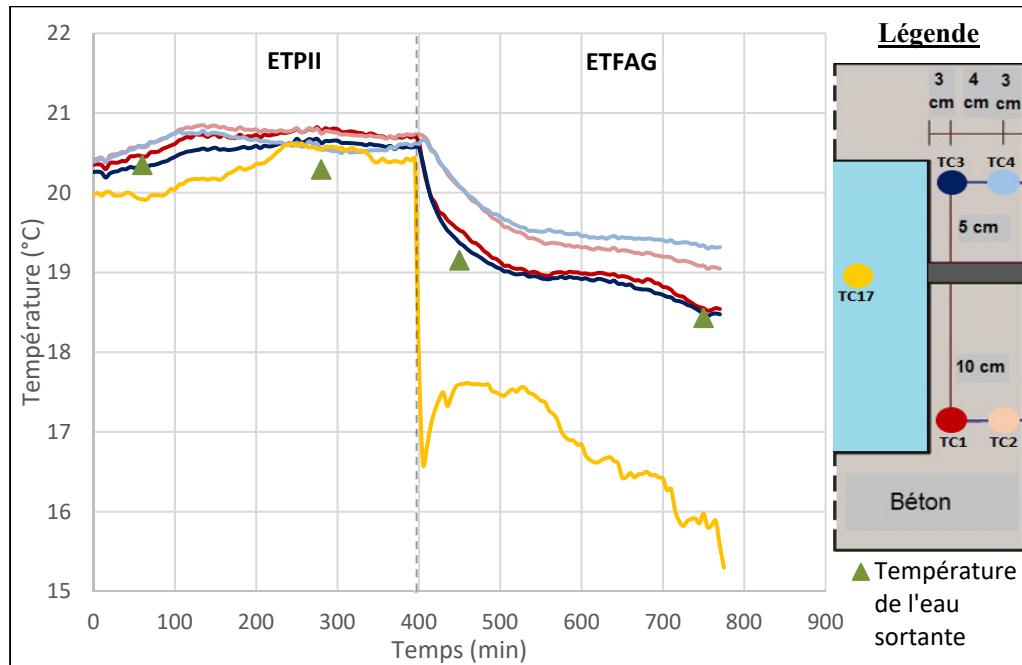


Figure 3.17 Courbes de température en fonction du temps durant le deuxième cycle d'essai pour le joint 3

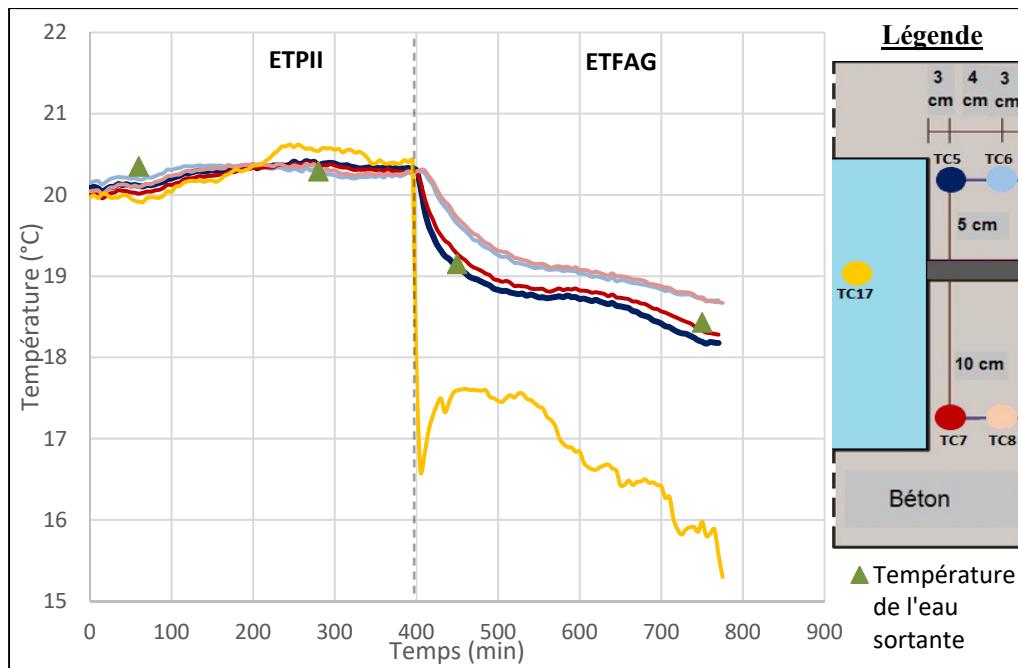


Figure 3.18 Courbes de température en fonction du temps durant le deuxième cycle d'essai pour le joint 4

Dans le cas du joint 4, les courbes de variation de température et celle de l'eau interne se suivent au début de la première phase de l'essai où la température de l'eau interne garde des valeurs au-dessous des températures enregistrées à l'intérieur du béton (figure 3.18). Les températures minimale et maximale enregistrées pour ce joint durant cette phase sont respectivement de 19,9°C et 20,6°C. Comme pour les joints 2 et 3, les courbes de température se rapprochent de plus après l'augmentation de la température de l'eau interne. Un petit écart de température se créait et l'inversion des courbes se fait où les températures enregistrées par la série de thermocouples à 10 cm deviennent au-dessus de celles enregistrées à 5 cm.

3.2.2.2 ETFAG

La deuxième phase de l'essai se caractérise par l'ajout d'éthylène glycol comme un adjuvant pour assurer la circulation parfaite de l'eau avec une basse température. Il est à noter que la température affichée par le refroidisseur était de -1°C alors que la variation de la température

de l'eau circulante à l'intérieur du modèle montre des valeurs qui varient entre 17,6 et 15,3°C (figure 3.14).

Durant cette phase, pour tous types de joint, les températures enregistrées à une profondeur de 3 cm pour les deux séries sont plus élevées que les températures enregistrées à 7 cm de profondeur. Cet écart de température augmente d'un joint à l'autre. Le joint 2 présente l'écart le plus faible avec une valeur de 0,3°C. Cette valeur grimpe à 0,4°C pour le joint 4 à 0,7°C pour le joint 3 et à 0,9°C pour le joint 1 (figures 3.15 à 3.18).

Les températures les plus faibles sont enregistrées par le joint 1 où les températures maximale et minimale sont de 20,1°C et 17,4°C respectivement. Les courbes de températures enregistrées à une profondeur de 10 cm sont parfaitement confondues pour le cas du joint 1 et 2. Pour les joints 3 et 4, ces courbes sont superposées avec une très petite marge plus accentuée dans le cas du joint 4. L'intervalle de variation de température pour le joint 2 est de 20,1°C jusqu'à 18,3°C. Pour le joint 4, les températures varient de 20,5 à 18,3°C. Les températures saisies à 3 cm de profondeur pour les deux séries sont confondues pour le joint 2 et 4 avec des valeurs plus élevées pour la série à 10 cm (figures 3.16 et 3.18). Cette situation est inversée dans le cas du joint 1 et 3. Un écart existe entre les températures enregistrées à 3 cm de profondeur pour les deux séries de thermocouples installés à 5 et 10 cm (figures 3.15 et 3.17). La série de thermocouples installés à 5 cm enregistrent les valeurs de températures les plus élevées avec un écart de 0,3°C dans le cas du joint 1. Dans le cas du joint 3, cet écart apparaît après une heure et 30 minutes du début de la deuxième phase avec une valeur moyenne de 0,2°C. L'intervalle de variation de température pour le joint 3 est de 20,7 à 18,5°C (figure 3.17).

3.3 Débits d'écoulement

Le débit des fuites a été mesuré pour chaque type de joint durant les deux cycles d'essai. La quantité d'eau à la sortie a été pesée chaque 15 minutes durant la première heure puis à chaque heure jusqu'à la fin de l'essai. Le débit d'écoulement du joint présente la quantité d'eau

sortante du joint en fonction du temps. Les résultats de débits des différents joints sont présentés et discutés dans cette section.

3.3.1 Cycle d'essai sans glycol

Les résultats des débits enregistrés durant le premier cycle sont présentés dans la figure 3.19. La désignation des joints est détaillée dans le tableau 3.1.

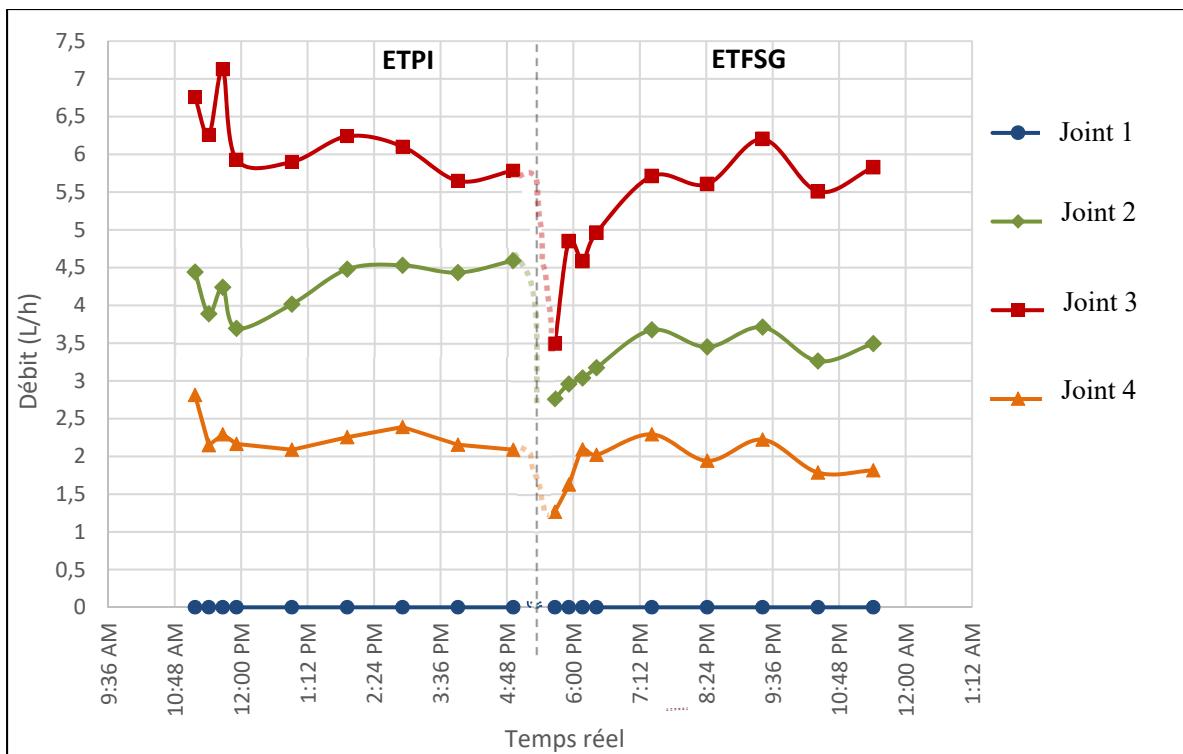


Figure 3.19 Variation de débits d'écoulement en fonction du temps durant le premier cycle d'essai

3.3.1.1 ETPI

Les courbes du débit en fonction du temps pour les quatre joints montrent des allures semblables durant la première phase de l'essai (figure 3.19).

Le joint 3 formé de trois feuilles minces de polystyrène extrudé présente les débits les plus élevés durant les deux phases de l'essai. La valeur maximale de débit est de 7,1 L/h enregistrée à 45 minutes dès le début de l'essai. Cette valeur tend à diminuer jusqu'à la troisième heure d'essai où une petite hausse de débit a été enregistrée suivie d'une nouvelle diminution à cinq heures pour enregistrer le plus faible débit pendant cette phase avec une valeur de 5,6 L/h (figures 3.19 et 3.20). Le joint 1 n'a pas enregistré des fuites durant cette phase.

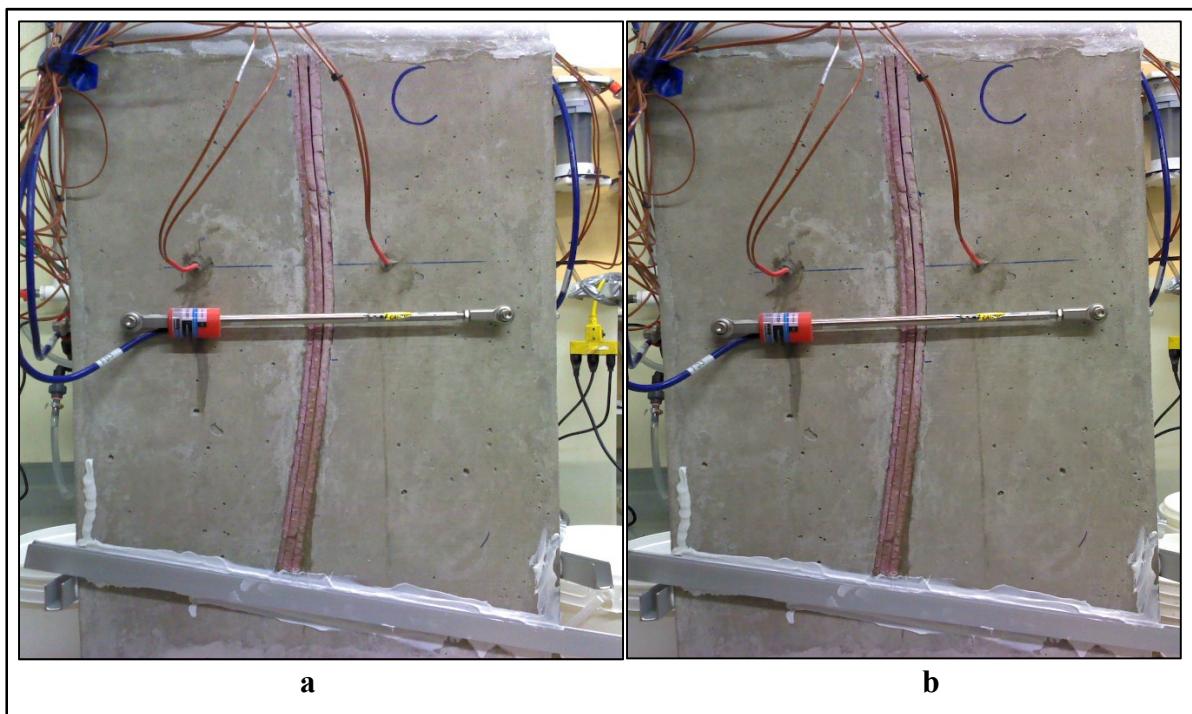


Figure 3.20 États du joint 3 à 45 minutes (a) et à 5 heures (b) durant l'ETPI

Le joint 2 formé par une simple feuille de polystyrène présente le deuxième joint le plus perméable. L'allure générale de sa courbe est similaire à celle du joint 3 sauf que le débit d'écoulement tend à augmenter depuis la deuxième heure de l'essai jusqu'à la fin de la première phase pour enregistrer une valeur maximale de 4,6 L/h pendant la dernière heure de cette phase (figure 3.19 et 3.21).

Les valeurs de débits enregistrées pour le joint 4 ne varient pas beaucoup en fonction du temps. Le débit maximal a été enregistré aux premiers 15 minutes de l'essai pour une valeur de 2,8

L/h. La courbe de variation des débits décroît vers une valeur moyenne de 2,2 L/h avec une petite augmentation de débit à quatre heures de l'essai de 0,2 L/h. Il est à noter que durant la première phase de l'essai, le joint 1 ne présente aucun débit d'écoulement. Les débits enregistrés par le joint 3 sont trois fois plus élevés que ceux enregistrés par le joint 4 (figure 3.19).

La plupart des fluctuations observées pour les quatre joints sont synchronisée. Lorsque le débit augmente pour un joint, il augmente aussi pour les autres joints. Ces fluctuations sont probablement associées aux fluctuations du niveau d'eau dans le montage. Comme il a été expliqué précédemment, plusieurs fuites ont été observées dans la partie supérieure du montage entre le béton et couvercle (figure 3.4). Le débit de ces fuites est probablement très sensible aux fluctuations du niveau d'eau. Certaines fuites peuvent passer sous la surface libre en raison des fluctuations du niveau d'eau.

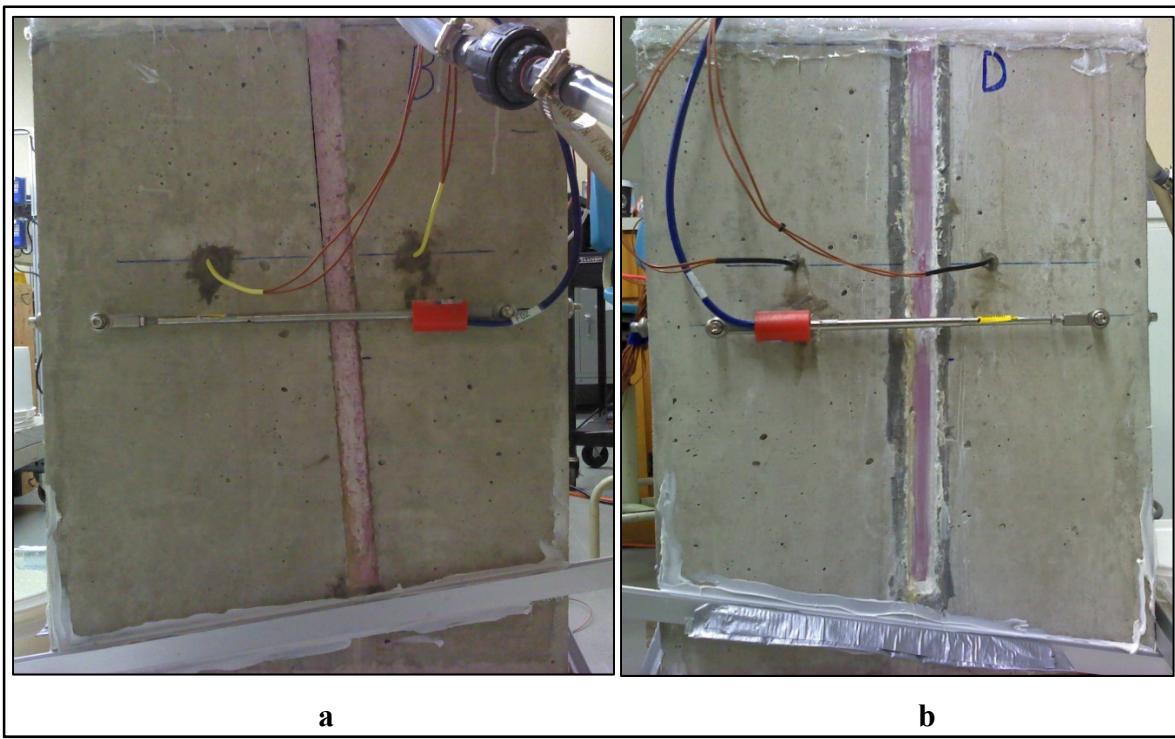


Figure 3.21 États du joint 2 à six heures (**a**) et du joint 4 à quatre heures (**b**) de l'ETPI

3.3.1.2 ETFSG

Les valeurs de débits pour cette phase sont plus faibles que ceux enregistrés durant la première phase de l'essai pour les joints 3 et 2. Pendant cette phase, les courbes de variation de débits en fonction du temps présentent des variations plus similaires et harmoniques pour les joints 3, 2 et 4 spécifiquement à partir de la deuxième heure de l'essai. Les fluctuations au niveau du joint 3 sont les plus accentuées. Ce dernier reste le joint le plus perméable dans le modèle physique. Durant les premières 15 minutes de cette phase, le joint 3 enregistre un débit minimal de 3,5 L/h. Les débits maximaux pour le joint 3 et 2 sont enregistrés pendant la quatrième heure de l'essai avec des valeurs de 6,2 L/h et 3,7 L/h respectivement (figures 3.14 et 3.22). Pour le joint 2, ce débit maximal enregistré durant cette phase a une valeur similaire au débit minimal enregistré à l'ETPI.

Concernant le joint 4, un débit minimal d'une valeur de 1,2 L/h est noté pendant les premières 15 minutes de l'essai. Les débits rapportés continuent à la même tendance que dans l'ETPI à partir de la deuxième heure de l'essai où une valeur maximale de débit de 2,3 L/h est comptabilisée. Le joint 1 est toujours sans fuites (figure 3.14).

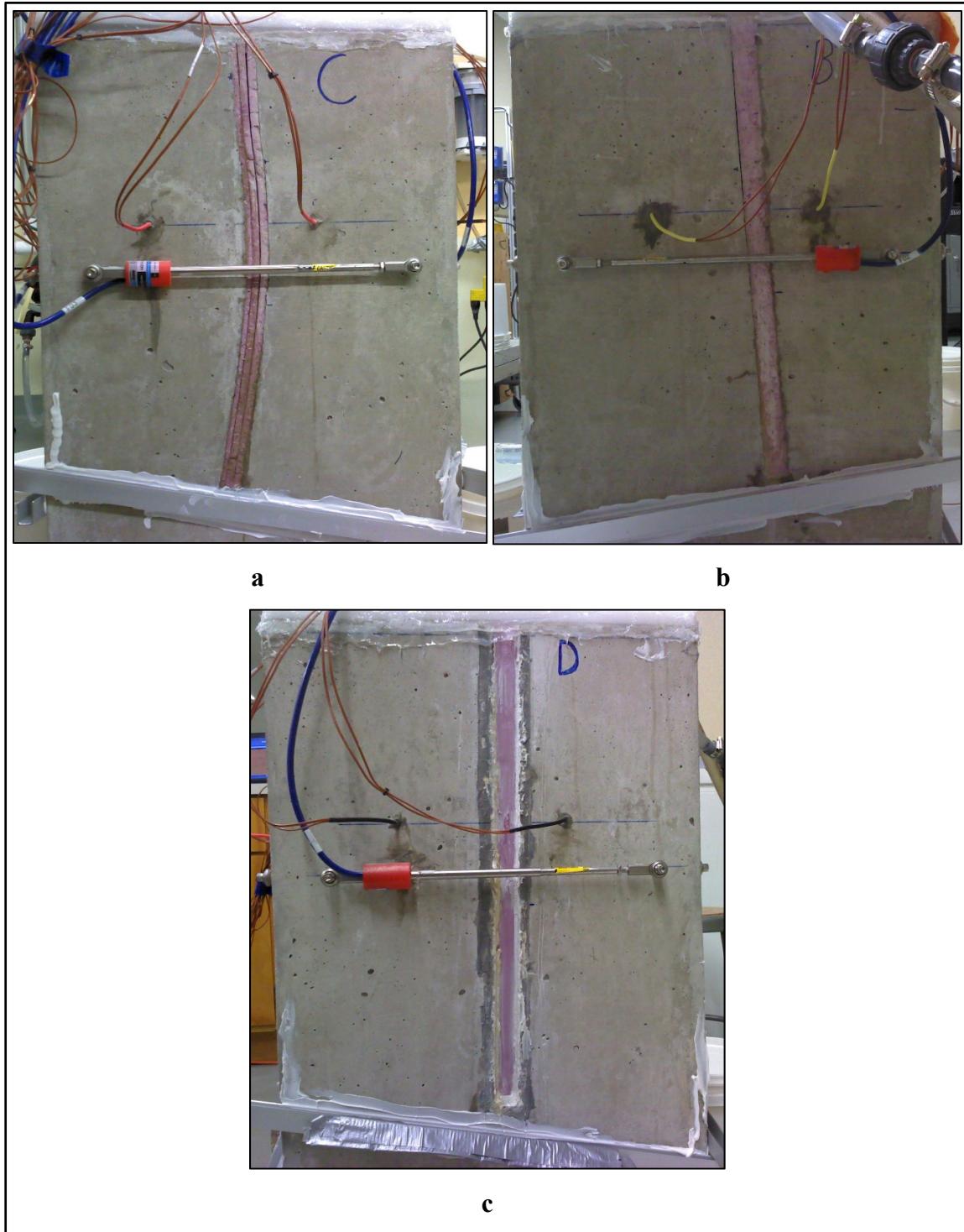


Figure 3.22 États des joints 3 (a), 2 (b) et 4 (c) à la quatrième heure de l'ETFSG

3.3.2 Cycle d'essai avec glycol

Les résultats des débits sont présentés dans la figure 3.23. Les débits de fuites enregistrés pour les différents joints durant les deux phases de ce cycle d'essai sont beaucoup plus faibles que les débits rapportés pour le premier cycle sans glycol.

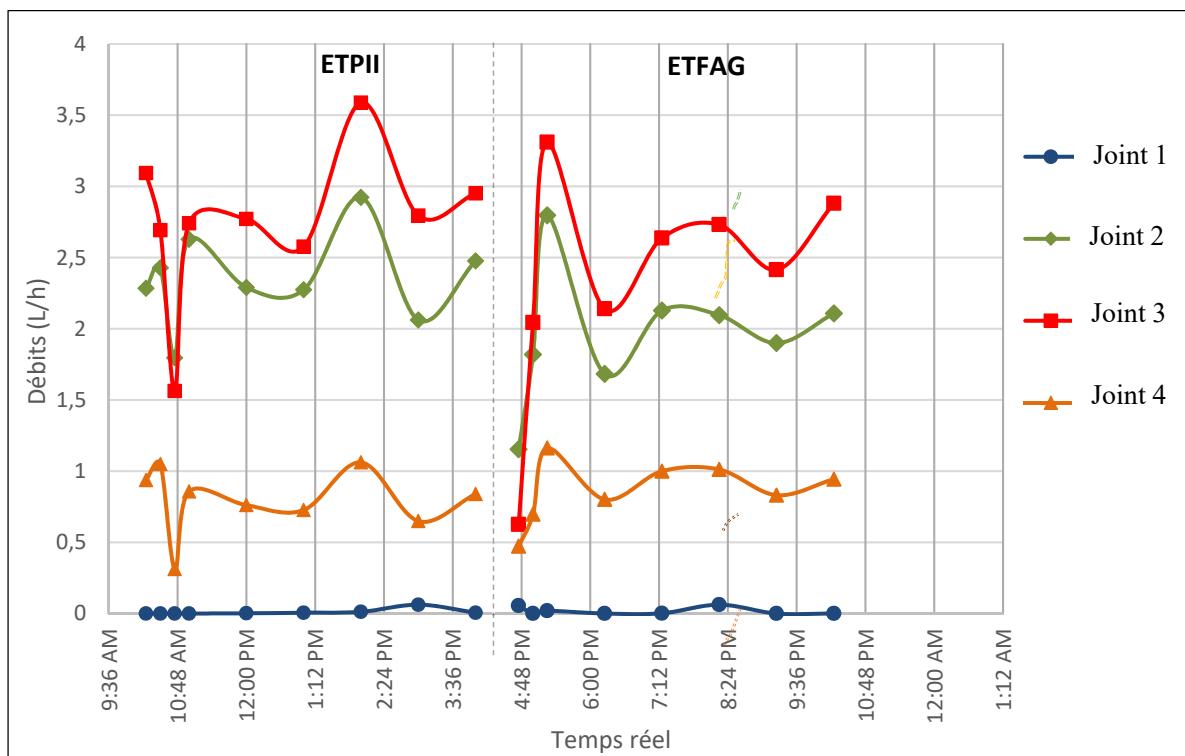


Figure 3.23 Variation des débits d'écoulement en fonction du temps durant le deuxième cycle d'essai

3.3.2.1 ETPII

Plus précisément que le premier cycle, les courbes de variation de débits d'écoulement pour suivent parfaitement la même allure le long de l'essai. Le joint 3 et 2 enregistrent des débits de fuites très proches avec un petit écart de 0,5 L/h (figure 3.23). Les valeurs de débits du joint 3 sont plus élevées que ceux du joint 2 sauf à 45 minutes de l'essai où le joint 2 devient plus coulant que le joint 3. Le joint 4 présente des débits de fuites très faibles avec une valeur moyenne de 0,7 L/h. Les débits maximums enregistrés pour ces trois joints sont constatés

pendant la quatrième heure de l'essai présentant des valeurs de 3,5 L/h, 2,9 L/h et 1 L/h respectivement pour le joint 3, 2 et 4 (figures 3.23 et 3.24).

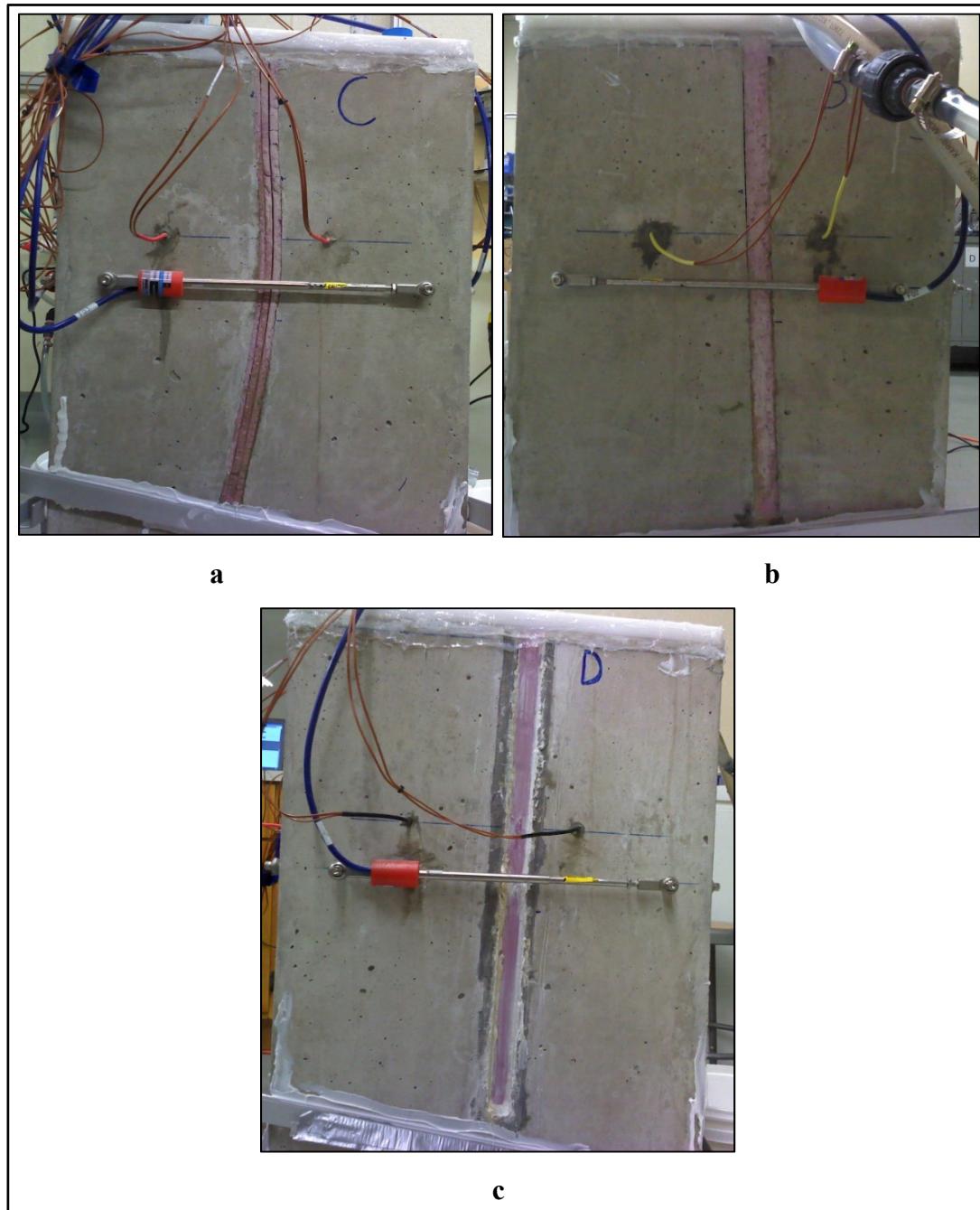


Figure 3.24 États des joints 3 (a), 2 (b) et 4 (c) à la quatrième heure de l'ETPII

Le joint 1 montre un très faible débit de fuite à la cinquième heure de l'essai d'une valeur de 0,062 L/h (figure 3.23). Cette fuite est apparue sur le joint dès les premières 15 minutes du début de l'essai, mais elle était sous forme des traces d'humidité sans écoulement comme le montre la figure 3.25.

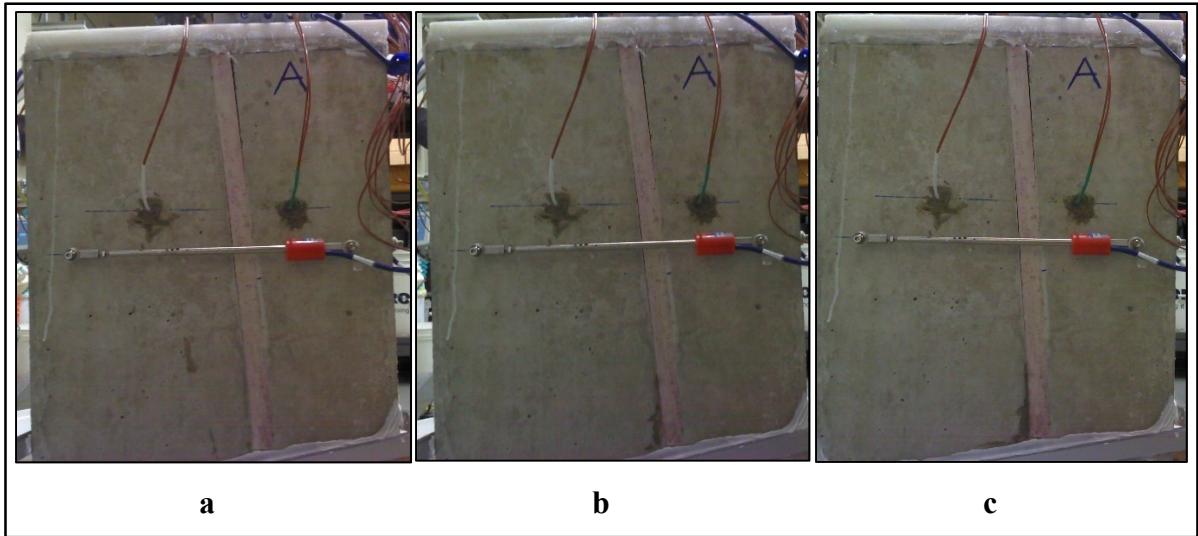


Figure 3.25 État du joint 1 à 0 minute (a), à 15 minutes (b) et après 5 heures (c) de l'ETPII

3.3.2.2 ETFAG

Durant cette phase, les courbes de variation des débits pour les joints 3 et 2 présentent des valeurs plus faibles que celles enregistrées dans la phase précédente sauf à une heure de l'essai où les débits augmentent et atteignent des valeurs maximales de 3,3 L/h et 2,8 L/h respectivement (figures 3.23 et 3.26). D'un autre côté, le joint 4 enregistre des débits légèrement plus élevés qu'à la première phase. Le débit maximal enregistré par le joint 4 est de 1,1 L/h mesuré pendant la première heure de l'essai. Par conséquent, l'écart entre les courbes des joints 2 et 4 diminue à 1 L /h au lieu de 1,5 L/h enregistrée dans la première phase. Le joint 1 présente deux petites fuites à 30 minutes de l'essai puis à la quatrième heure (figure 3.23). Les débits enregistrés à 15 minutes de l'essai ont été ratés par faute pour cette phase d'essai.

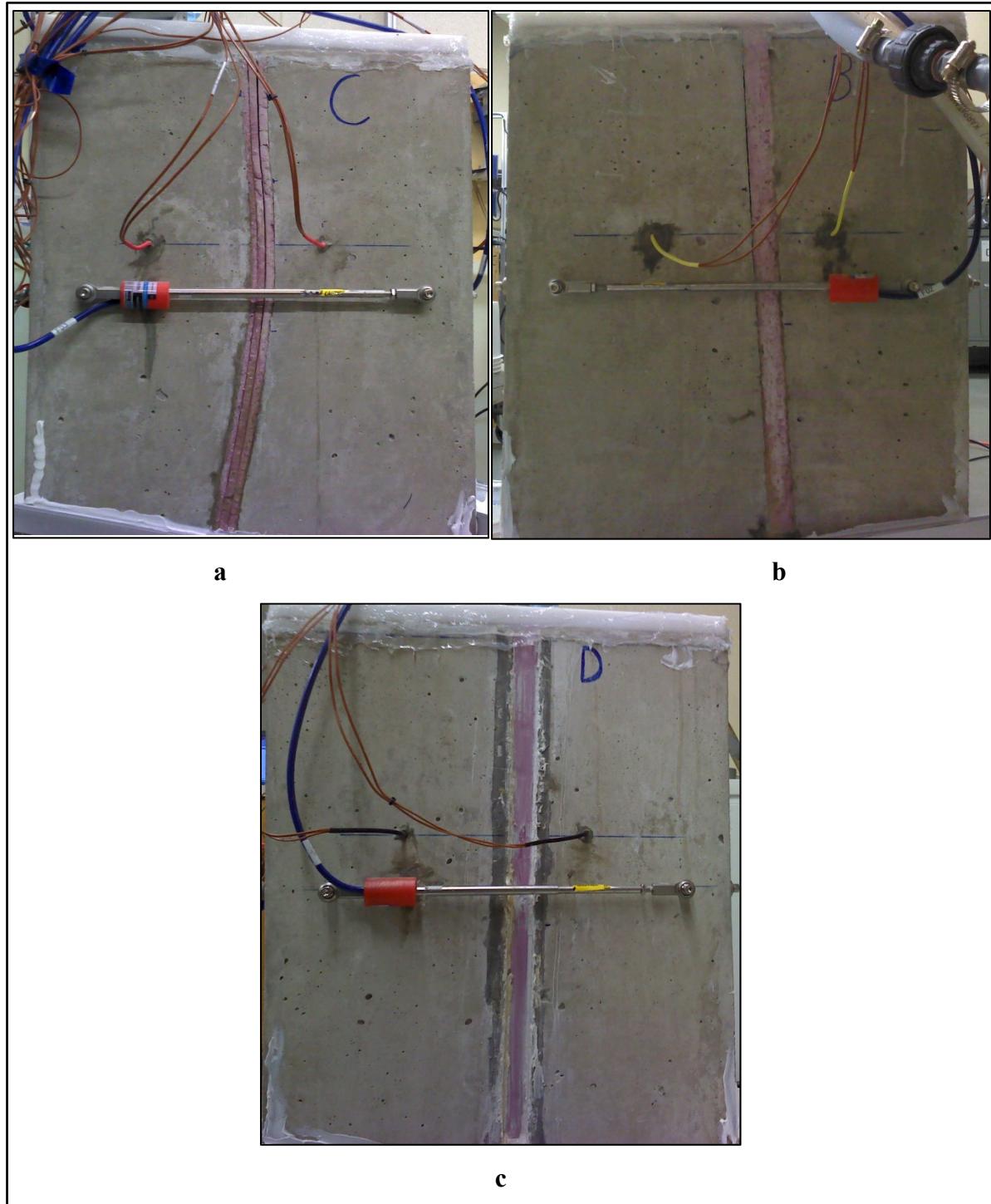


Figure 3.26 États des joints 3 (a), 2 (b) et 4 (c) durant la première heure de l'ETFAG

3.4 Thermographie infrarouge

Cette section présente les thermographies infrarouges pour chaque joint du modèle réduit. Ces thermographies ont été prises toutes les 15 minutes durant la première heure de chaque phase, puis à toutes les heures durant le reste de l'essai. Elles présentent la variation de la température au niveau du joint et à la surface du béton. Cette méthode de caractérisation non-destructive permet aussi de caractériser les fuites pour chaque joint le long de l'essai et de comparer le comportement des joints à la suite de la variation de la température de l'eau à l'intérieur du modèle physique.

3.4.1 Cycle d'essai sans glycol

3.4.1.1 ETPI

Le tableau 3.1 présente un résumé des thermographies infrarouges obtenues durant la phase ETPI du cycle d'essai sans glycol. Les autres thermographies sont présentées à l'annexe I.

Le joint 1 ne présente pas d'anomalie de température à la surface du béton avant de lancer la circulation de l'eau à l'intérieur du modèle. Après 15 minutes d'essai, la thermographie montre une petite anomalie dans la partie inférieure du joint montrant une température plus faible à ce niveau du joint (annexe I). Il est notamment à préciser que durant cette phase, le joint 1 n'a enregistré aucun débit d'écoulement (figure 3.9).

Le joint 2 est le deuxième joint le plus perméable durant cette phase. Avant de faire fonctionner la pompe péristaltique, ce joint montre une anomalie de température au niveau de sa partie inférieure. Après 15 minutes du début de l'essai, des fuites sont apparues au niveau de l'interface entre le béton et le polystyrène dans la partie supérieure du côté droit du joint 2. À quatre heures d'essai, l'image infrarouge montre l'apparition des nouveaux petits points d'écoulement qui se situent sur le côté gauche au milieu du joint. Une partie de ces points a été atténué à cinq heures d'essai et réapparu à six heures d'essai. Ces informations thermiques coïncident avec la variation des débits en fonction du temps du joint 2 où le débit augmente à

quatre heures puis diminue à cinq heures et enregistre une nouvelle augmentation à six heures d'essai (figure 3.19 et annexe I).

Les débits de fuites les plus élevés ont été enregistrés par le joint 3 comme montré dans la section 3.3. Après un quart d'heure d'essai, les fuites sont réparties le long du joint et concentrées dans la partie centrale qui sépare les différentes feuilles de polystyrène (annexe I). La thermographie infrarouge montre qu'à trois heures d'essai l'anomalie de température est plus développée au niveau du joint 4 alors qu'à cinq heures d'essai cette anomalie est représentée par une couleur plus claire signifiant une venue d'eau moins important (annexe I). Les débits d'eau représentés dans la figure 3.19 montrent un débit de fuite le plus faible mesuré à cinq heures d'essai ce qui est en accord avec les observations thermographiques pour le joint 3.

Pour le joint 4, les fuites d'eau se concentrent à l'interface entre le béton et le polystyrène dans la partie supérieure à droite du joint. À partir de trois heures d'essai, l'anomalie de température au niveau de cette interface devient plus visible signalant une venue d'eau plus important. Des points de fuites sont apparues en même temps au niveau de l'interface gauche de la partie inférieure du joint 4. À cinq heures, l'anomalie de température au niveau du joint est d'une couleur plus claire avec la disparition de certains points d'écoulement apparues auparavant (annexe I). Ces données thermographiques sont en coïncidence avec la variation des débits durant cette phase (figure 3.19).

Pendant cette phase d'essai, aucune anomalie de température n'a été remarqué à la surface du béton (annexe I). Les courbes de températures du béton enregistrées pour les différents joints durant cette phase sont confondues ce qui explique l'absence des anomalies de températures à la surface du béton suite à l'absence d'écart de température entre la température de l'eau circulante et la température de l'air (figures 3.10 à 3.13).

3.4.1.2 ETFSG

Cette phase est lancée directement après l'ETPI avec une marge de 30 minutes. Un résumé des thermographies est présenté dans le tableau 3.2. Les autres images thermographiques pour cette phase sont représentées à l'annexe II.

Le joint 1 présente des traces d'écoulement au repos qui sont dû à la continuité des fuites à partir de l'essai précédent. Ce côté n'enregistre aussi aucun écoulement durant cette phase (figure 3.9). La surface du béton montre des traces d'humidité très remarquables à partir des images infrarouges. La couleur de la surface du béton humide est de plus en plus foncée en avançant dans l'essai. Au début de l'essai, la partie humide, visiblement détectée par les images thermographiques, se situe dans la moitié inférieure du modèle physique alors qu'à partir de la deuxième heure cette couleur se propage sur presque toute la surface du béton (tableau 3.2). L'anomalie de température sur la surface du béton est plus concentrée dans la partie gauche du joint présentant des faibles températures où est installée la série à 10 cm. Ceci peut expliquer l'écart de température enregistré par les deux thermocouples à une profondeur de 3 cm où la série à 10 cm rapporte des températures plus faibles que celle située à 5 cm à droite du joint 1 (figure 3.19). La propagation de la température froide sur la surface du béton du joint 1 et sa concentration progressive sur le côté gauche explique l'augmentation de l'écart entre les températures enregistrées par les thermocouples installés à une profondeur de 3 cm (figure 3.19 et tableau 3.1). Cette différence de température est dû à la conductivité thermique du béton et notamment à la réparation des graviers à l'intérieur de la structure du béton.

Pour le joint 2, l'image thermographique à 2 heures d'essai a été raté par faute pour ce joint. Il existe beaucoup de points d'écoulement épars le long du joint (tableau 3.1). De 35 à 45 minutes de l'essai, des points de fuite ont été atténués dans la partie inférieure du joint ce qui explique la diminution de débit à 45 minutes. À partir de la troisième heure de l'essai, des nouveaux points d'écoulement ont apparus et sont réunis pour former un plan d'écoulement situant dans la partie inférieure du joint à son côté gauche (tableau 3.2). Cette observation thermographique illustre évidemment l'augmentation du débit de fuite de 3,17 L/h mesuré à

une heure d'essai à 3,5 L/h mesuré à trois heures d'essai (figure 3.19). En outre, des faibles températures ont été détecté au niveau de la moitié inférieure du joint 2. L'anomalie de température devient de plus en plus remarquable à la surface du béton à partir de la troisième heure d'essai. Ces températures deviennent de plus en plus faibles en fonction du temps remarquées par une couleur plus foncée de la surface de béton (annexe II). L'intensité de l'anomalie de température à la surface du béton est plus remarquée à la dernière heure de l'essai. Les débits du joint 2 sont plus faibles par rapport à ceux enregistrés pendant la première phase de l'essai. À partir de la deuxième heure de l'essai, le joint rentre dans une phase oscillatoire de débits qui n'est pas perceptible à partir des images thermographiques (figure 3.19).

Pour le joint 3, les fuites sont réparties le long du joint. L'anomalie de température apparaît dès la première demi-heure d'essai. Entre la première et la deuxième heure de l'essai, la thermographie montre l'apparition des nouveaux points de fuite au niveau du joint 3 (tableau 3.2). À ce moment, le débit d'écoulement a augmenté de 4,9 L/h mesuré à une heure d'essai à 5,7 L/h mesuré à deux heures d'essai (figure 3.19). L'anomalie de température à la surface du béton montre qu'après l'apparition des nouveaux points de fuites à partir des feuilles minces de polystyrène et de l'interface béton-polystyrène des faibles températures se concentrent dans le côté gauche du joint où s'est installée la série de thermocouples à 10 cm du joint (annexe II). Ces données thermographiques expliquent la variation des températures enregistrées pour le joint 3. Les températures du béton montrent qu'à partir de deux heures et 40 minutes de début de cette phase les températures enregistrées à 10 cm du joint et à 3 cm de profondeur sont plus faibles que les températures enregistrées à 5 cm du joint à la même profondeur (figure 3.12).

Le joint 4 présente le joint avec les plus faibles débits d'écoulement. À la première heure de l'essai, les fuites sont concentrées au niveau du côté droite de la moitié supérieure du joint. À partir de la deuxième heure d'essai, l'image thermographique montre l'apparition des nouveaux points de fuites au niveau de l'interface béton-polystyrène dans le côté gauche du joint 4 (tableau 3.2). La figure 3.19 montre à ce moment une augmentation de débit confirmant

cette observation thermographique. L'anomalie de température pour ce joint est de la même intensité des deux côtés du joint. Ceci peut être justifié par la faible perméabilité du joint engendrant des fuites moins importantes d'où une faible variation de température de la surface du béton par rapport aux joints 2 et 3.

La présence des anomalies de température à la surface du béton durant cette phase est dû à la présence d'un écart entre la température de l'air et la température d'eau à l'intérieur du modèle. Cette anomalie varie selon la perméabilité du joint.

Tableau 3.1 Images thermographiques pour l'ETPI

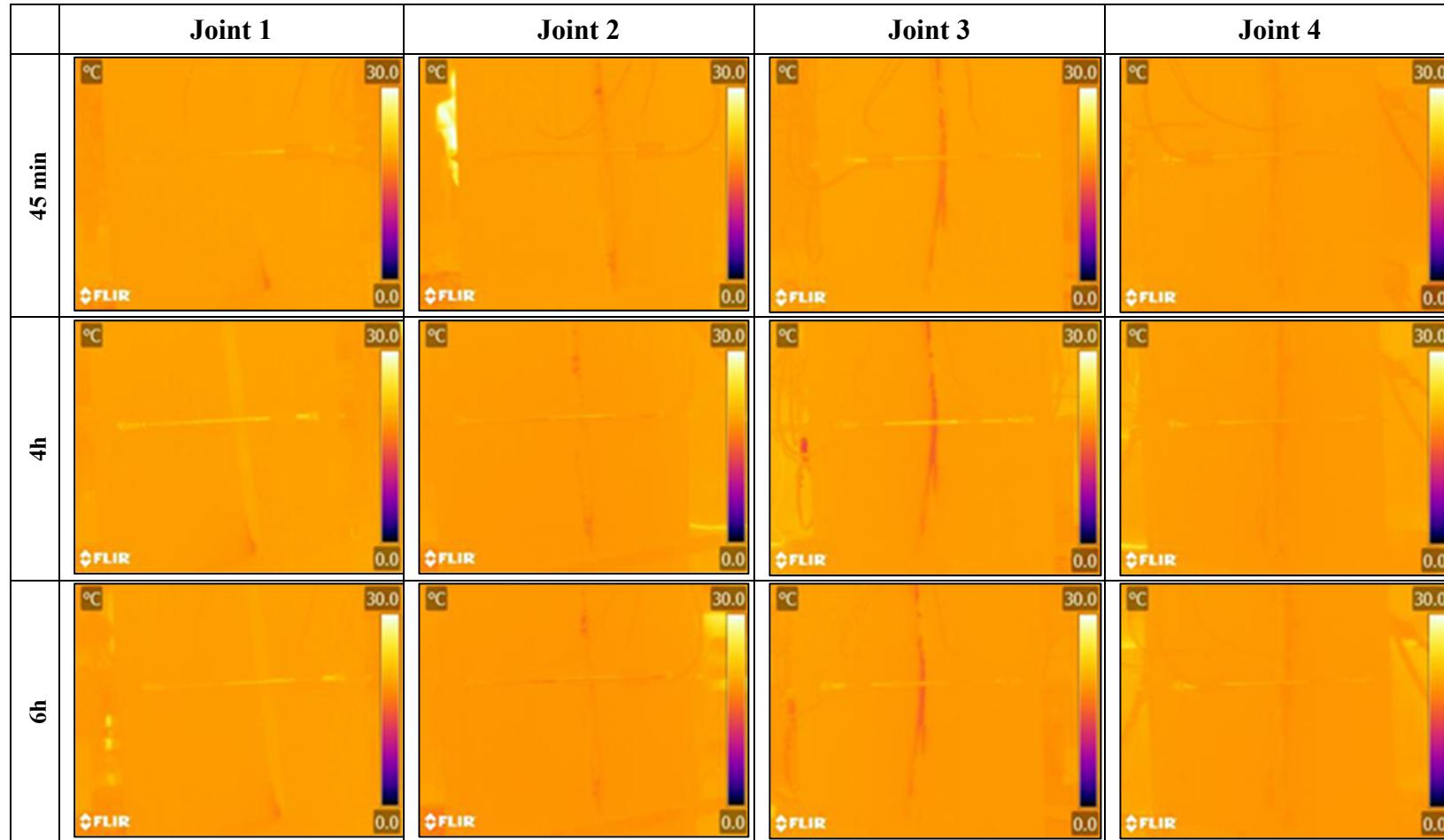
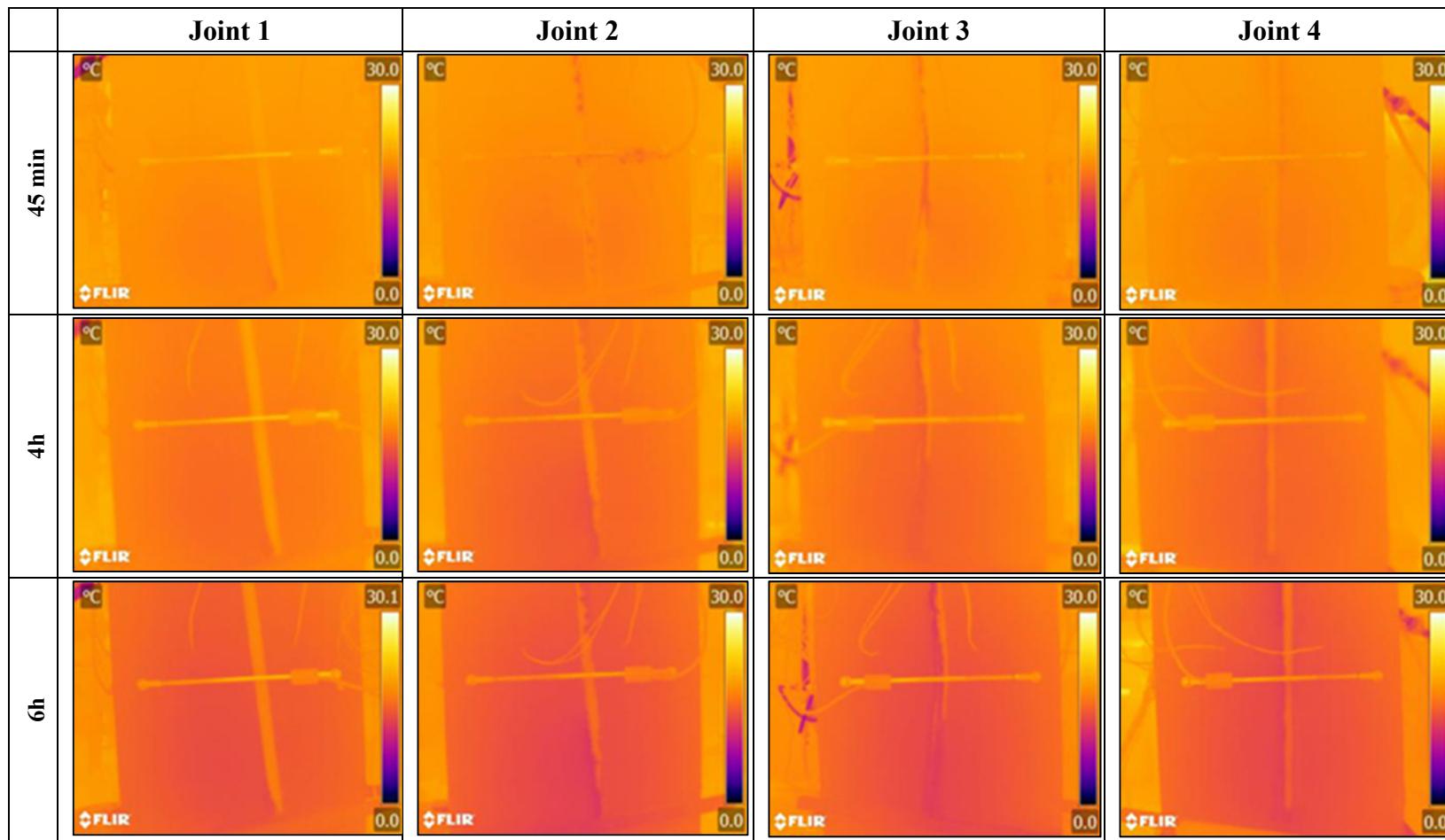


Tableau 3.2 Images thermographiques pour l'ETFSG



3.4.2 Cycle d'essai avec glycol

3.4.2.1 ETPII

Le tableau 3.3 présente un résumé des thermographies infrarouges obtenues durant la phase ETPII du cycle d'essai sans glycol. Les autres thermographies sont présentées à l'annexe III.

Au cours de cette phase, le joint 1 présente des traces de fuites dans sa partie inférieure sans enregistrer des débits d'écoulement sauf à quatre heures d'essai où un faible débit de fuite de 0,062 L/h a été mesuré (figure 3.23). La thermographie montre un endroit de fuite un peu plus étalé à ce moment d'essai (tableau 3.3). La fuite disparaît progressivement à six heures d'essai. La surface du béton se caractérise par une température uniforme durant cette phase d'essai. Cette surface devient progressivement un peu plus chaude à la deuxième heure de l'essai tout en gardant une température uniforme (annexe III). Ce changement de température est remarqué pour les quatre joints. Il est dû probablement à l'augmentation progressive de la température de l'eau circulante à l'intérieur du modèle réduit (figure 3.14).

Pour le joint 2, Les fuites d'eau sont réparties au niveau de l'interface béton-polystyrène du côté droit de la partie supérieure du joint et au niveau de son extrémité inférieure (tableau 3.3). Les écoulements sont plus intenses à 1 heure de l'essai qu'à 45 minutes constatés par l'expansion des endroits de fuites au niveau des deux extrémités du joint où le débit augmente de 1,56 L/h à 2,7 L/h. À quatre heures d'essai, des nouveaux points de fuite ont été observés dans la partie inférieure du joint. La figure 3.23 montre qu'à cette heure d'essai le joint 2 enregistre une augmentation de débit à 2,92 L/h. La thermographie prise à cinq heures d'essai indique la disparition de quelques points d'écoulement d'où la diminution de débit de fuites (tableau 3.3). Les changements d'état de fuites du joint 2 détectés par imagerie thermographique traduits par l'apparition et la disparition des points d'écoulement engendrent

notamment des variations des débits aux mêmes moments ce qui est en harmonisation avec les données représentées dans la figure 3.23.

Pour le joint 3, les fuites s'étaient progressivement du bas du joint vers le haut en fonction du temps jusqu'à ce qu'elles dominent presque toute la longueur du joint 3 à deux heures d'essai. La thermographie infrarouge montre que les fuites sont plus prononcées pendant la quatrième heure d'essai constatées par l'apparition des nouveaux endroits de fuite et leur couleur plus foncée (tableau 3.3). À ce moment, le joint 3 montre une remontée de débit à une valeur de 3,58 L/h. Des endroits de fuites dans la partie inférieure du joint 3 ne sont plus visibles à cinq heures d'essai attestant la chute de débit d'écoulement présentée dans la figure 3.23.

Le plan des fuites pour le joint 4 se développe sur les interfaces béton-polystyrène des deux côtés du joint. Les images infrarouges montrent une diminution progressive des fuites d'eau à une heure jusqu'à trois heures d'essai (annexe III). Cette diminution est justifiée par la diminution des débits de 0,85 à 0,72 L/h respectivement à une heure et trois heures d'essai (figure 3.23). Malgré le petit écart, cette diminution du débit de fuites eut pu être détectée par thermographie infrarouge. Le contraste de couleur au niveau du joint 4 a augmenté à quatre heures d'essai avec l'apparition des points de fuites au niveau de la partie inférieure du joint (tableau 3.3). Une augmentation de débit a été enregistré à la même heure pour donner une valeur de 1,06 L/h (figure 3.23). Une régression de l'intensité des fuites à cinq heures d'essai montre une diminution de débit d'écoulement à cette heure. Ensuite, à six heures d'essai, les points d'écoulement réapparaissent de nouveau signalant l'augmentation de débit (annexe III). Ces changements thermographiques sont confirmés par les valeurs des débits d'écoulement du joint 4 représentées dans la figure 3.23.

3.4.2.2 ETFAG

Le résumé des thermographies infrarouges obtenues durant la phase ETFAG est présenté dans le tableau 3.4. Les autres thermographies sont présentées à l'annexe IV.

Au début de l'essai, le joint 1 enregistre un petit endroit de fuite à l'interface béton-polystyrène du côté gauche de la partie inférieure du joint. Cette fuite diminue au cours de l'essai jusqu'à sa disparition. L'anomalie de température à la surface du béton montre une concentration des températures les plus froides sur le côté gauche du joint 1. Ce côté contient la série de thermocouples installés à 10 cm du joint. Les températures du béton enregistrées montrent que les températures enregistrées à 10 cm du joint et à 3 cm de profondeur sont plus faibles que les températures enregistrées à 5 cm du joint à la même profondeur ce qui justifie les faibles températures observées sur le côté gauche du joint 1 (figure 3.15 et tableau 3.4).

Les points de fuites sur le joint 2 sont répartis sur les deux extrémités du joint à la première heure de l'essai. L'anomalie de température à la surface du béton montrent des températures un peu plus faibles à l'interface béton-polystyrène au niveau de la partie inférieure du joint au cours de la première heure d'essai. Ces faibles températures traduisent un écoulement d'eau actif au niveau des fuites. L'anomalie de température devient uniforme à deux heures d'essai ce qui coïncide avec une diminution de débit d'écoulement malgré l'évolution de la ligne d'écoulement (figure 3.23 et annexe IV). Cette ligne d'écoulement se propagent progressivement de la moitié supérieure du joint 2 jusqu'à ce qu'elle couvre sa totalité à quatre heures de l'essai. L'évolution de la ligne de fuites explique l'augmentation graduelle des débits entre la deuxième et la quatrième heure de l'essai de 1,68 à 2,1 L/h respectivement (figure 3.23)

Pour le joint 3, durant la première heure d'essai, l'intensité de la ligne d'écoulement est plus importante. L'anomalie de température de la surface du béton est uniforme. La thermographie montre une régression de la ligne d'écoulement au niveau de la partie inférieure du joint 3 à deux heures d'essai marquant une diminution du débit d'écoulement de 3,3 L/h à une heure d'essai à 2,14 L/h à deux heures d'essai (tableau 3.4 et figure 3.23). Pendant la troisième heure de l'essai, la ligne d'écoulement se développe vers la partie supérieure du joint. L'intensité de l'anomalie de température devient faible à cinq heures d'essai ensuite elle revient plus

importante à six heures d'essai (annexe IV). Ceci explique la fluctuation des débits d'écoulement enregistrés durant cette phase d'essai pour le joint 3. La comparaison des deux thermographies à quatre et six heures d'essai révèle que l'anomalie de température à six heures d'essai est plus intense qu'à quatre heures où le débit d'écoulement est plus important à six heures pour une valeur de 2,88 L/h qu'à quatre heures avec une valeur de 2,7 L/h (figure 3.23). Il est à noter que les débits d'écoulement étaient plus intenses au cours de la première phase d'essai pour les joints 2 et 3.

Les images infrarouges prises pour le joint 4 montrent une anomalie de température plus importante à une heure d'essai qu'à deux heures (annexe IV). Une diminution de débits d'écoulement est enregistrée de 1,16 à 0,8 L/h respectivement à une heure et deux heures d'essai (figure 3.23). Cette anomalie de température augmente à quatre heures d'essai, perd son intensité à cinq heures et la rattrape à six heures d'essai. Ces changements coïncident avec les fluctuations de débits du joint 4. La comparaison des images thermographiques enregistrées à quatre et six heures d'essai montre une anomalie de température légèrement plus intense à quatre heures d'essai qu'à six heures où le débit d'écoulement est légèrement plus important à quatre heures pour une valeur de 1,01 L/h qu'à six heures avec une valeur de 0,94 L/h (figure 3.23), cependant la différence est visible à travers les deux thermographies malgré le faible écart.

Tableau 3.3 Images thermographiques pour l'ETPII

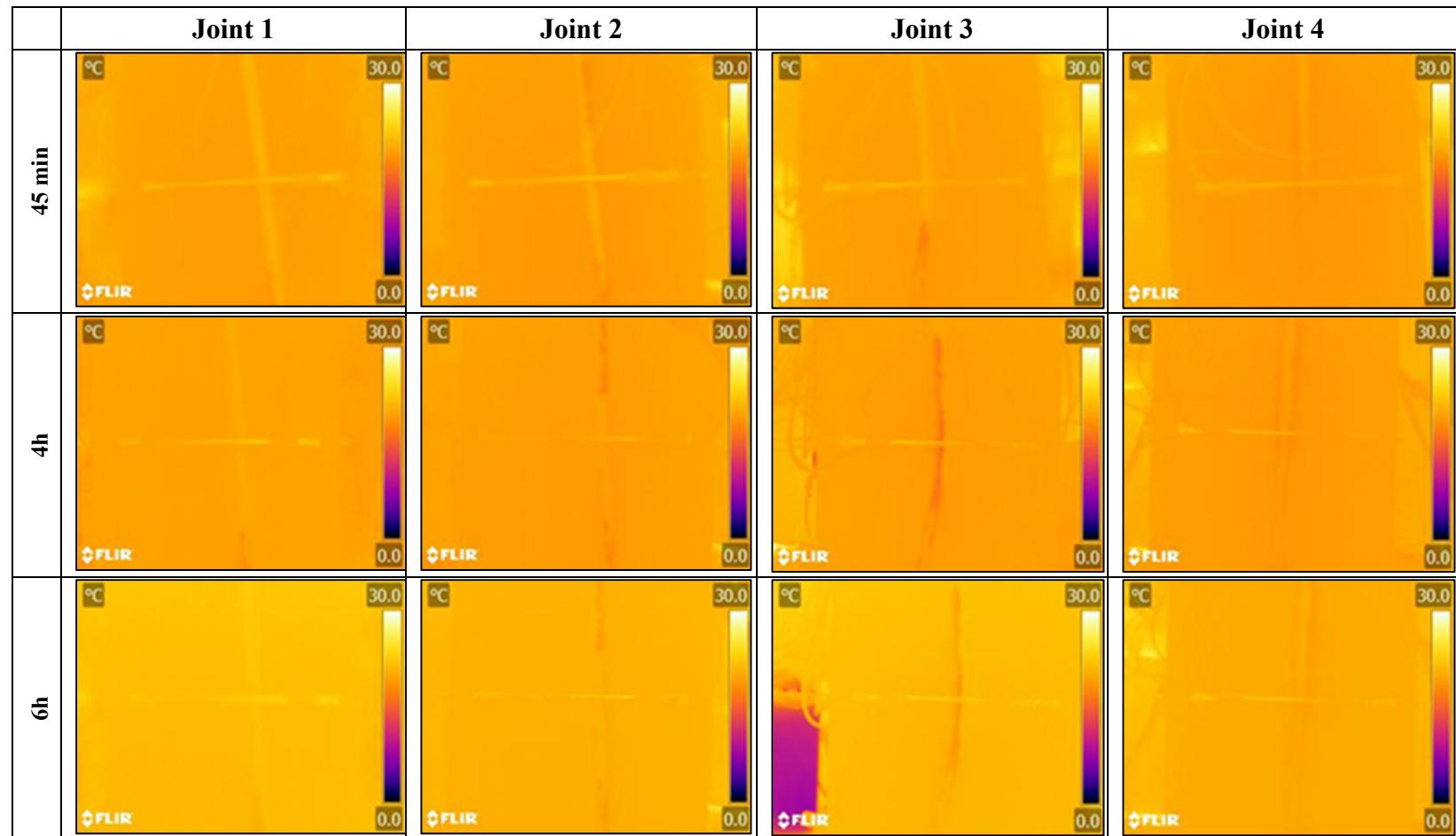
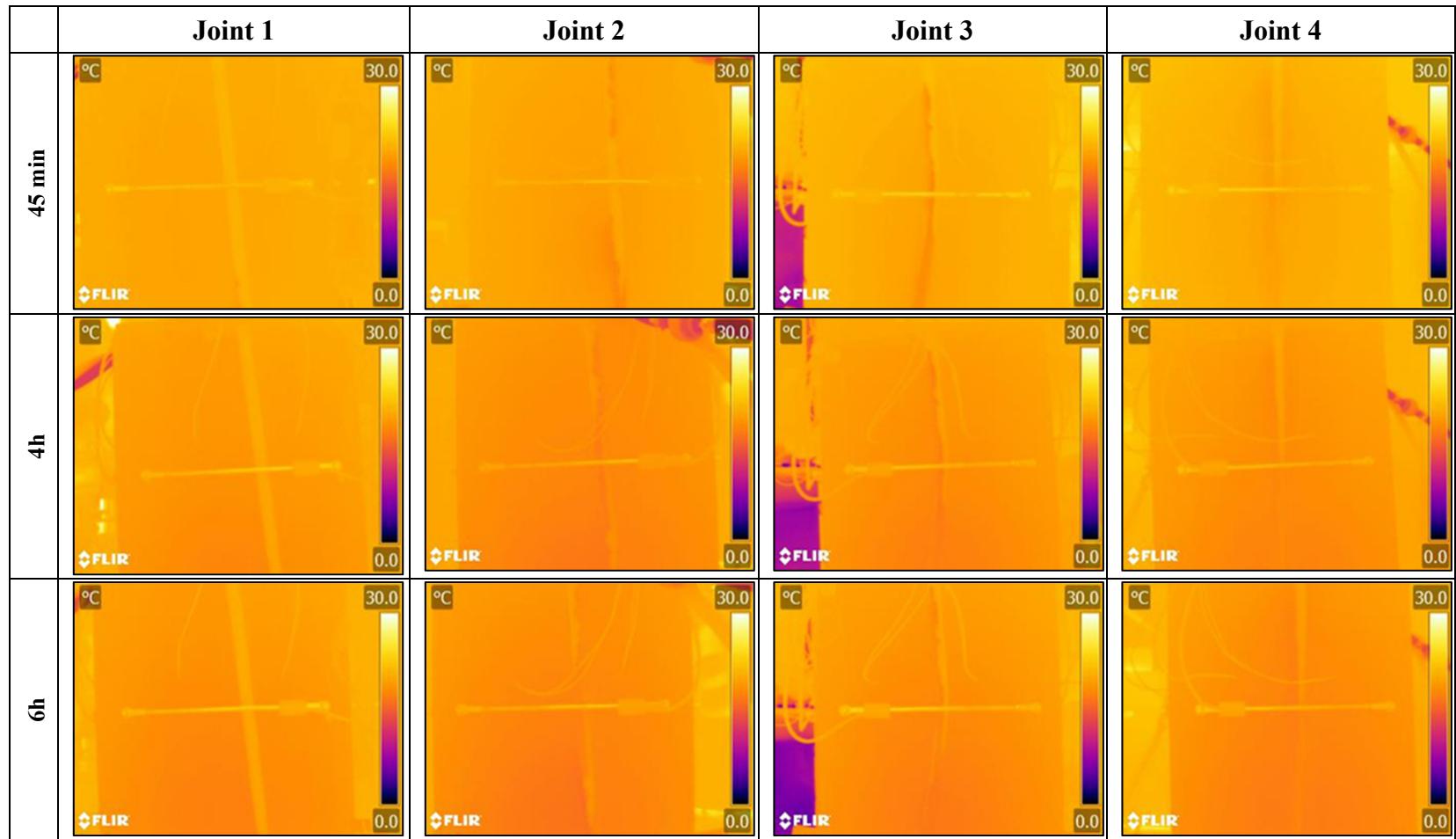


Tableau 3.4 Images thermographiques pour l'ETFAG



Au cours de l'ETPI, les températures du béton ont été plus faibles que la température de l'eau circulante tandis qu'aucune fuite n'est enregistrée pour le joint 1. Dans ce cas, l'évaporation à la surface du béton tend à diminuer très légèrement la température. Le joint 3 a enregistré des températures légèrement plus élevées que la température de l'eau à l'intérieur du modèle avec un débit de fuite le plus élevé d'une valeur moyenne de 6,19 L/h. L'eau se réchauffe en traversant le joint et augmente légèrement la surface du béton. L'effet de l'évaporation n'est pas remarqué en vue que le débit est assez important.

À une faible température d'eau circulante, les températures enregistrées à 7 cm sont toujours plus faibles que les températures à 3 cm dans le cas des quatre joints. L'écart entre ces deux enregistrements de températures est bien clair dans les essais préliminaires et les essais principaux. Cette différence est plus grande pendant l'essai préliminaire. L'écart entre la température de l'air et la température de l'eau à l'intérieur du modèle pour l'essai préliminaire est plus élevé que l'écart obtenu pour les essais ETFSG et ETFAG. Dans ce cas, le flux de chaleur est plus important dans l'essai préliminaire d'où l'évaporation de l'eau à la surface du béton est plus importante ce qui explique la différence dans les écarts enregistrés.

La variation des courbes de débits montre que les débits de fuites enregistrés pour les différents joints suivent la même tendance durant chaque essai. Cette variation peut être notamment affectée par les manipulations manuelles lors des essais et les fuites par le dessus du modèle. En comparant la variation des débits au sein d'un même essai, les débits enregistrés pendant les phases à température froide ont tendance à être plus faible que les débits à température de la pièce. En outre, les débits enregistrés pendant le premier cycle d'essai sont plus élevés que les débits du deuxième cycle d'essai. L'influence d'éthylène de glycol sur la viscosité du mélange eau-glycol peut expliquer cette différence de débits. Néanmoins, les débits d'écoulement enregistrés pour l'ETPII sont aussi plus faibles que les débits de l'ETPI. La perméabilité intrinsèque du béton qui caractérise le modèle en béton indépendamment des caractéristiques du fluide circulant joue un rôle important dans ces changements de débits.

Comme remarqué pour la phase ETPI durant le premier cycle d'essai, l'absence des anomalies de température à la surface du béton est expliquée par la présence d'un écart insuffisant entre la température de l'air et la température de l'eau à l'intérieur du modèle pour générer un flux de chaleur important. L'imagerie thermographique du joint 4 pendant cette phase montre une faible anomalie de température par rapport aux joints 2 et 3. Le joint 3 le plus perméable présente l'anomalie la plus remarquable. La thermographie infrarouge permet aussi de caractériser la variation de la température à la surface du béton qui devient un peu plus chaude à quatre heures d'essai pour tous les joints. À la même heure, les joints enregistrent des débits de fuites les plus élevés pendant l'ETPII. Ceci peut être expliqué par l'augmentation de la température de l'eau à l'intérieur du modèle, mais aussi l'augmentation des débits de fuites à cet instant peut participer au réchauffement de la surface du béton.

L'anomalie de température de la surface du béton enregistrée pendant l'ETFSG est plus accentuée que l'anomalie durant l'ETFAG ce qui permet de déduire notamment que l'essai sans glycol est l'essai avec les débits les plus importants. La comparaison de l'intensité de l'anomalie de température de la surface du béton à partir des thermographies infrarouges entre deux joints au même instant ou pour le même joint à des moments différents peut donner des indications sur le joint le plus perméable ou l'instant quand le joint enregistre le plus d'écoulement.

CONCLUSION

Le modèle physique construit permet de tester des joints de dilatation avec différentes perméabilités à la suite des infiltrations d'eau, de suivre la variation de la température du béton à partir de la variation de l'anomalie de température à la surface du béton et d'établir une corrélation liant la température de la surface du béton et les débits de fuites enregistrés. Les principales conclusions tirées de ce projet sont les suivantes :

- l'anomalie de température à la surface du béton varie d'une façon importante lorsqu'il existe un écart entre la température de l'eau de fuite et la température de l'air et caractérise bien les infiltrations d'eau.
- les températures du béton les plus élevées sont toujours enregistrées pour le joint 3 le plus perméable formé avec des feuilles minces de polystyrène. Dans le cas des essais à une température de 20°C, ces températures sont plus élevées que la température de l'eau de fuite et de l'eau sortante à partir du joint.
- le joint 1 avec une bande d'arrêt d'eau représente le joint le plus étanche avec des fuites très faible. Ce joint a enregistré les températures du béton les plus faibles par rapport aux autres joints durant les différents essais. Les températures du béton mesurées sont soit légèrement plus faibles soit à une valeur similaire à celles de l'eau sortante.
- les températures du béton enregistrées à 5 cm du joint 1 à une profondeur de 3 cm sont les températures les plus élevées durant tous les essais. Les images thermographiques ne montrent pas d'anomalie de température à la surface du béton à 5 cm du joint 1. Néanmoins, cette anomalie est bien représentée dans le côté gauche à 10 cm du joint pour confirmer la variation des températures du béton.

- les fuites d'eau sont plus faibles durant l'essai avec l'ajout d'éthylène de glycol à cause de l'effet de la viscosité du glycol sur le mélange eau-glycol.
- la variation des débits en fonction du temps peut être suivie par l'anomalie de la température de la surface du béton à travers les images thermographiques où la distribution de température à la surface du béton est plus significative quand les débits de fuites sont plus importants.
- les fluctuations des débits peuvent aussi être corrélées à l'apparition et la disparition des points de fuites au niveau du plan d'écoulement de joints à l'aide des images thermographies.
- la thermographie infrarouge donne la possibilité d'estimer l'état de fuite des joints, de classifier les défauts en ordre selon leur degré d'écoulement et de préciser la priorité de traitement à l'aide des anomalies de température représentées à la surface de la structure.

RECOMMANDATIONS

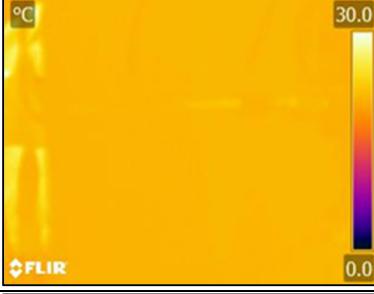
Les besoins de recherche et les recommandations peuvent être formulés comme suit :

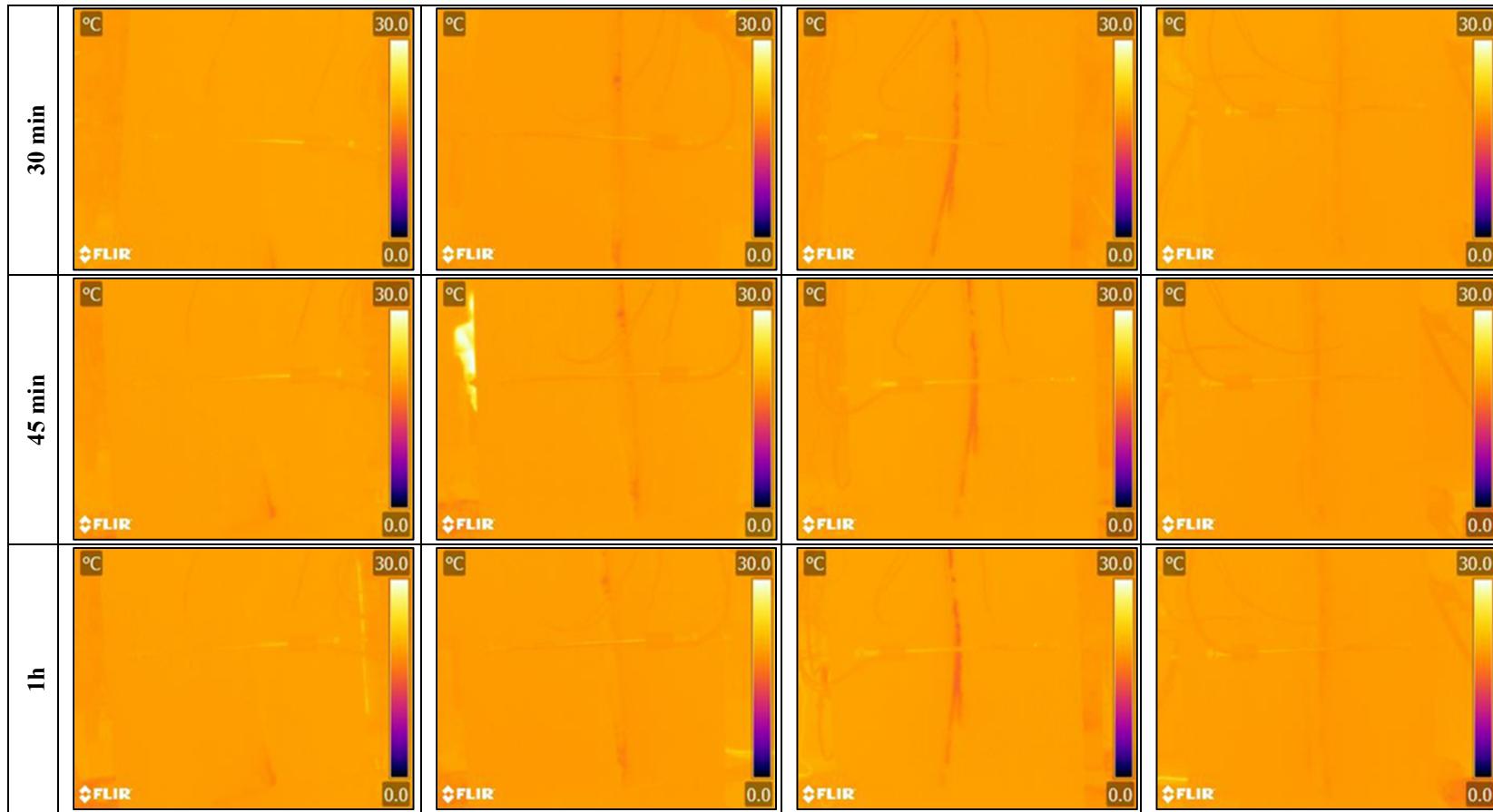
- pour la construction du modèle physique, les joints doivent être bien fixés dans le coffrage pour éviter les mouvements causés par la vibration. Il est aussi conseillé de remplacer la plaque en plastique sur le dessus du modèle par du béton coulé en même temps que le modèle afin de garantir le scellement complet du modèle réduit.
- l'utilisation d'un couvercle en béton coulé avec le reste du modèle permettrait l'utilisation de pressions d'eau plus élevées à l'intérieur du modèle pour simuler l'influence de la pression hydrostatique associée à la nappe d'eau souterraine. En raison des problèmes d'étanchéités du couvercle, les essais ont dû être réalisés avec une faible pression.
- il serait pertinent de préparer un modèle avec des défauts ponctuel (circulaire) pour vérifier l'influence de la forme des défauts sur les anomalies de température et pour étudier la variation de la température sur les surfaces de suintement.
- le modèle physique pourrait être testé dans une chambre environnementale à des températures sous le point de congélation afin de représenter l'effet de gel sur les débits de fuites et la distribution de température à la surface du béton. D'autre part, ces essais pourraient servir à tester des solutions aux problèmes de formation de glace sur les joints en mauvais état, par exemple l'injection et la congélation de l'eau à l'extrados.
- les paramètres d'émissivité et d'humidité relative doivent intervenir dans le traitement des images thermographiques.

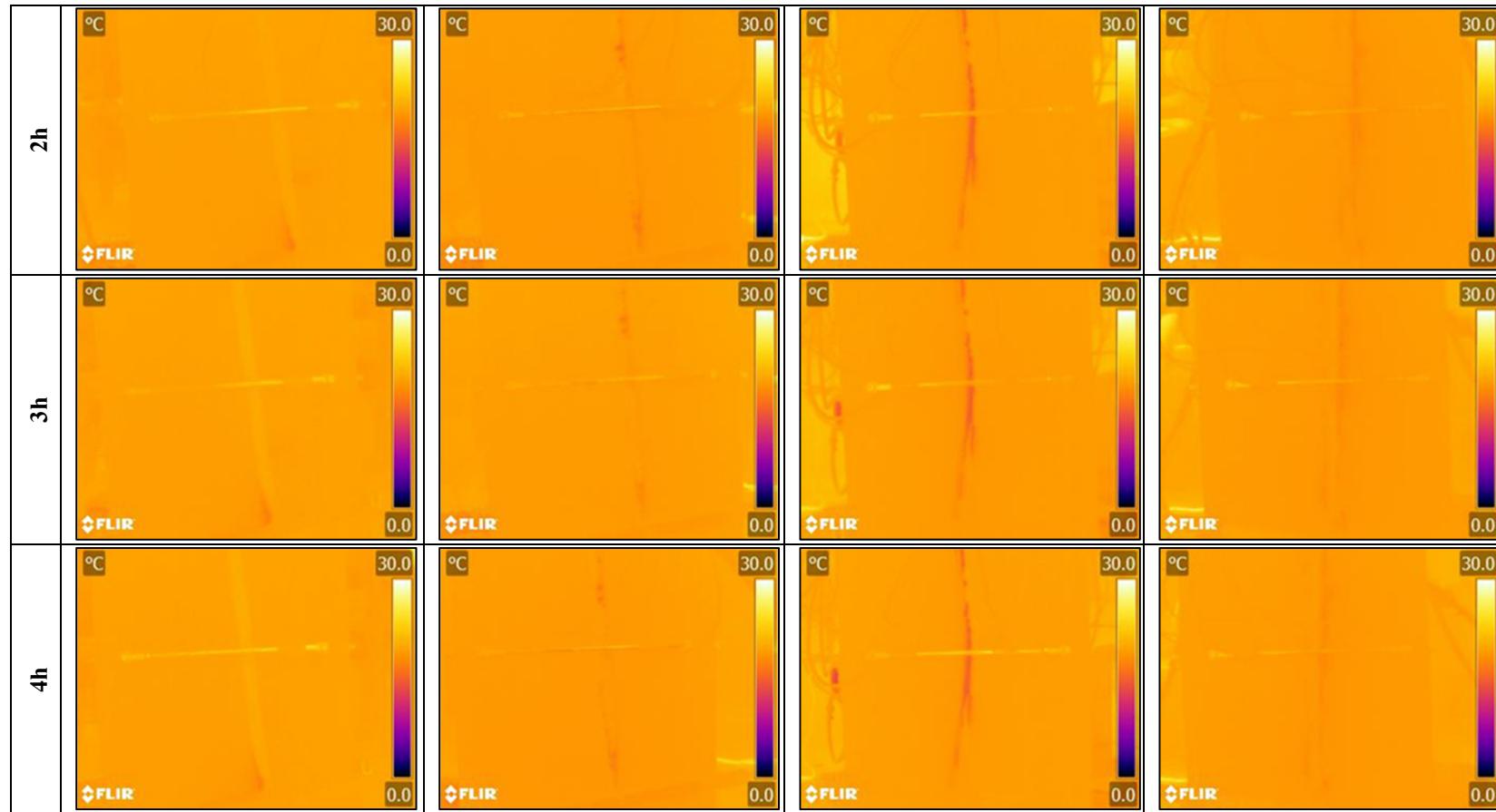
- un modèle numérique doit être développé avec la méthode des éléments finis pour faciliter l'étude de la relation entre les débits et la température de la surface du béton (p. ex. Hounyevou-Klotoé et al. 2018).
- l'approche numérique peut servir à simuler les changements de températures du béton qui suite aux changements de la température à l'extrados de la structure d'où la simulation des débits de fuites qui peuvent affecter les joints.

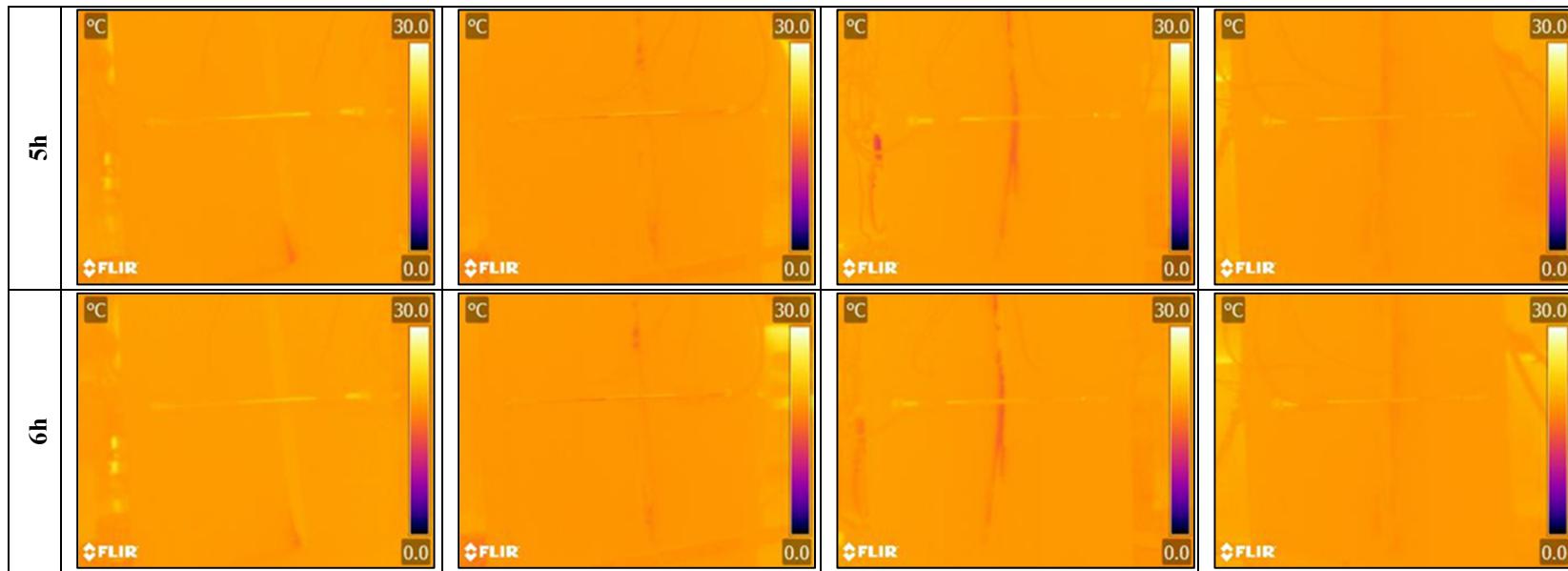
ANNEXE I

IMAGES THERMOGRAPHIQUES POUR L'ETPI

	Joint 1	Joint 2	Joint 3	Joint 4
0 min	 A FLIR thermal image of Joint 1 at 0 min. The image shows a bright orange and yellow area with a color scale from 0.0 to 30.0 degrees Celsius. The FLIR logo is visible in the bottom left corner.	 A FLIR thermal image of Joint 2 at 0 min. The image shows a bright orange and yellow area with a color scale from 0.0 to 30.0 degrees Celsius. The FLIR logo is visible in the bottom left corner.	 A FLIR thermal image of Joint 3 at 0 min. The image shows a bright orange and yellow area with a color scale from 0.0 to 30.0 degrees Celsius. The FLIR logo is visible in the bottom left corner.	 A FLIR thermal image of Joint 4 at 0 min. The image shows a bright orange and yellow area with a color scale from 0.0 to 30.0 degrees Celsius. The FLIR logo is visible in the bottom left corner.
15 min	 A FLIR thermal image of Joint 1 at 15 min. The image shows a bright orange and yellow area with a color scale from 0.0 to 30.0 degrees Celsius. The FLIR logo is visible in the bottom left corner.	 A FLIR thermal image of Joint 2 at 15 min. The image shows a bright orange and yellow area with a color scale from 0.0 to 30.0 degrees Celsius. The FLIR logo is visible in the bottom left corner.	 A FLIR thermal image of Joint 3 at 15 min. The image shows a bright orange and yellow area with a color scale from 0.0 to 30.0 degrees Celsius. The FLIR logo is visible in the bottom left corner.	 A FLIR thermal image of Joint 4 at 15 min. The image shows a bright orange and yellow area with a color scale from 0.0 to 30.0 degrees Celsius. The FLIR logo is visible in the bottom left corner.

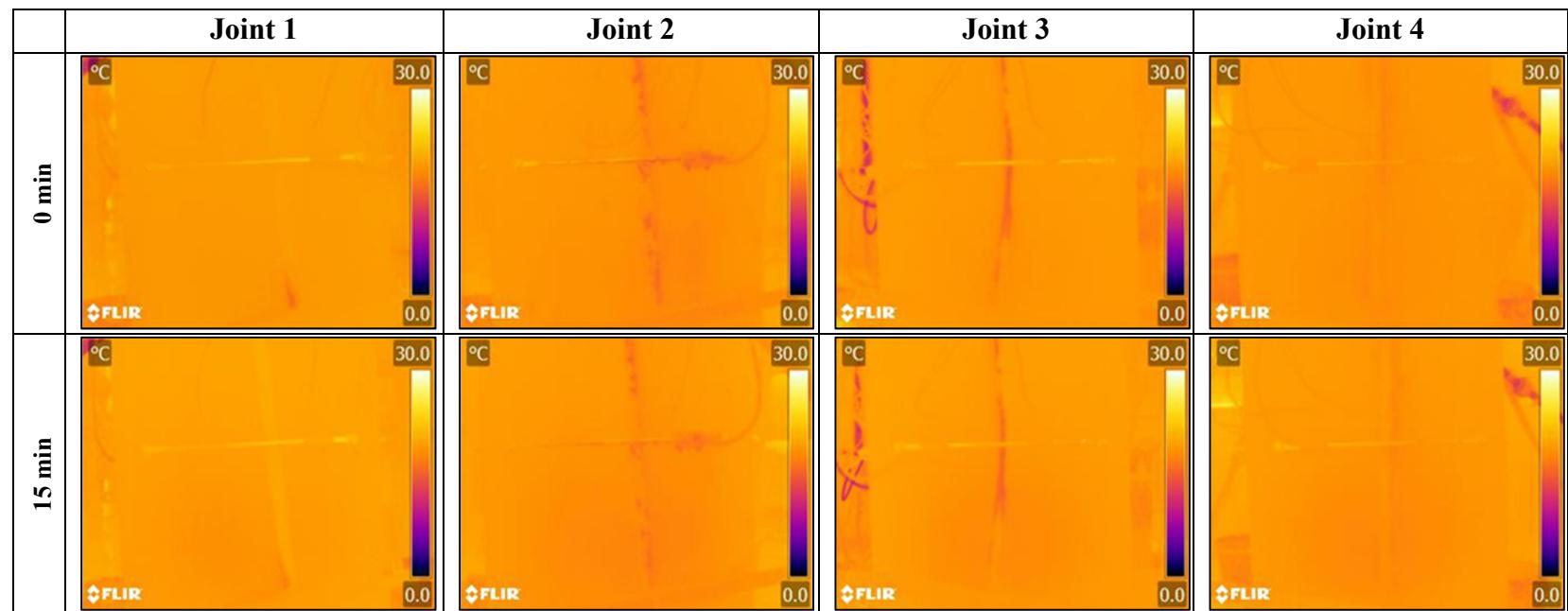


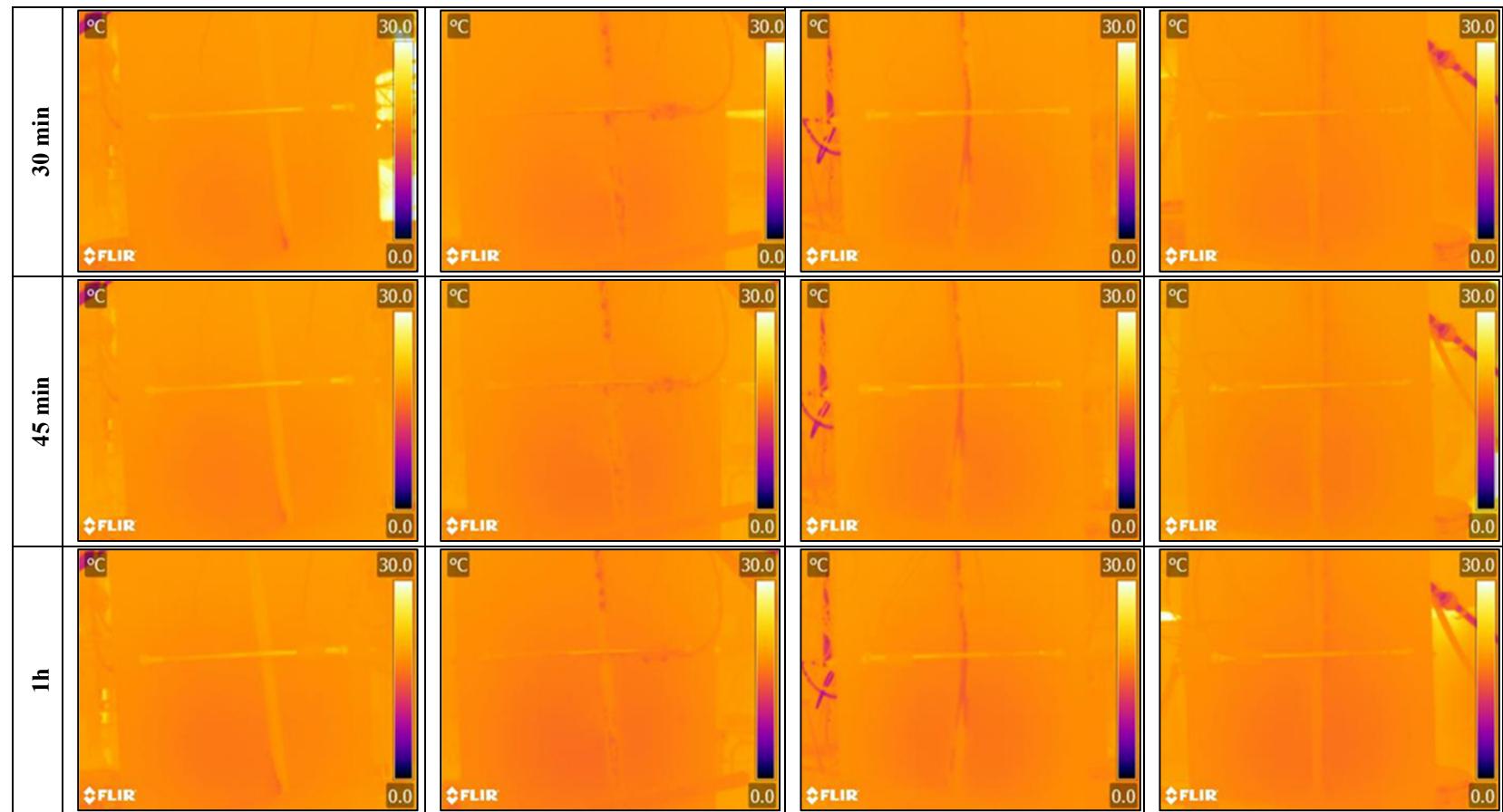


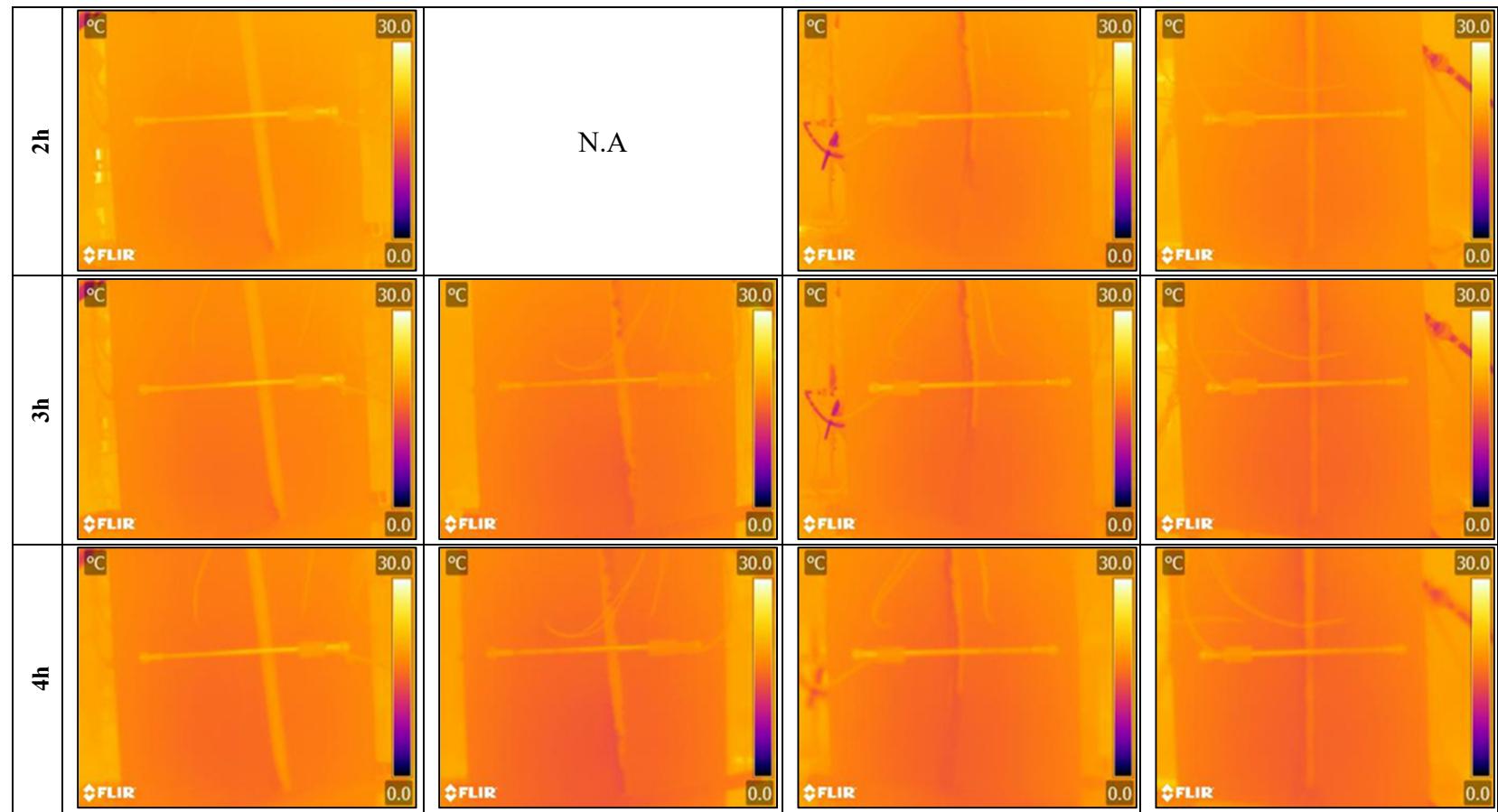


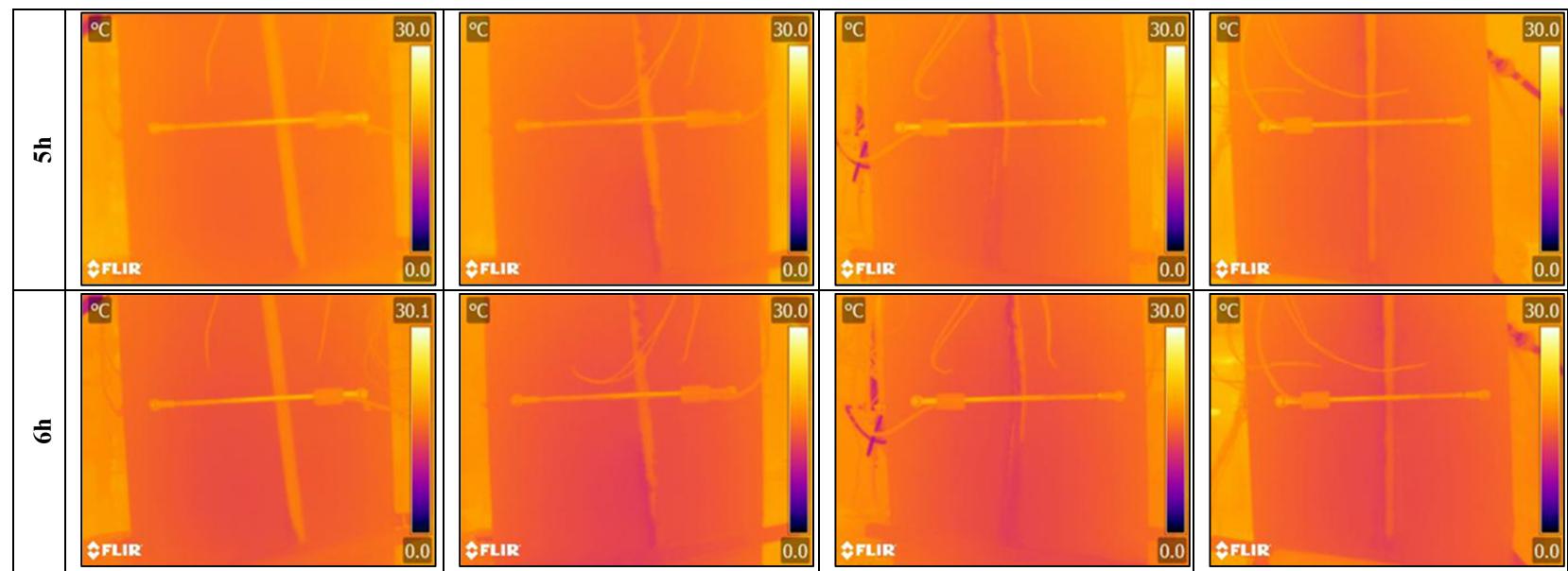
ANNEXE II

IMAGES THERMOGRAPHIQUES POUR L'ETFSG



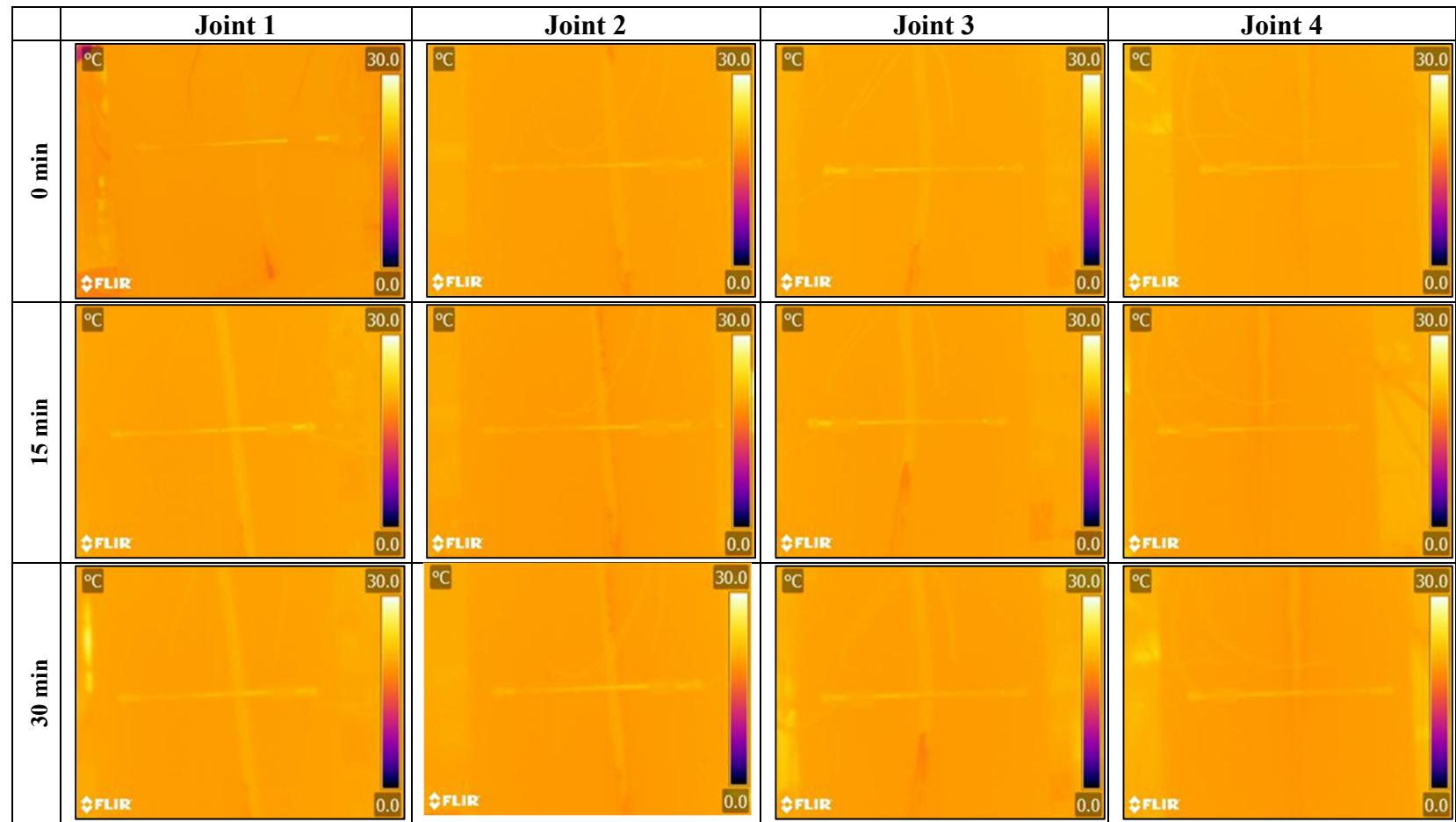


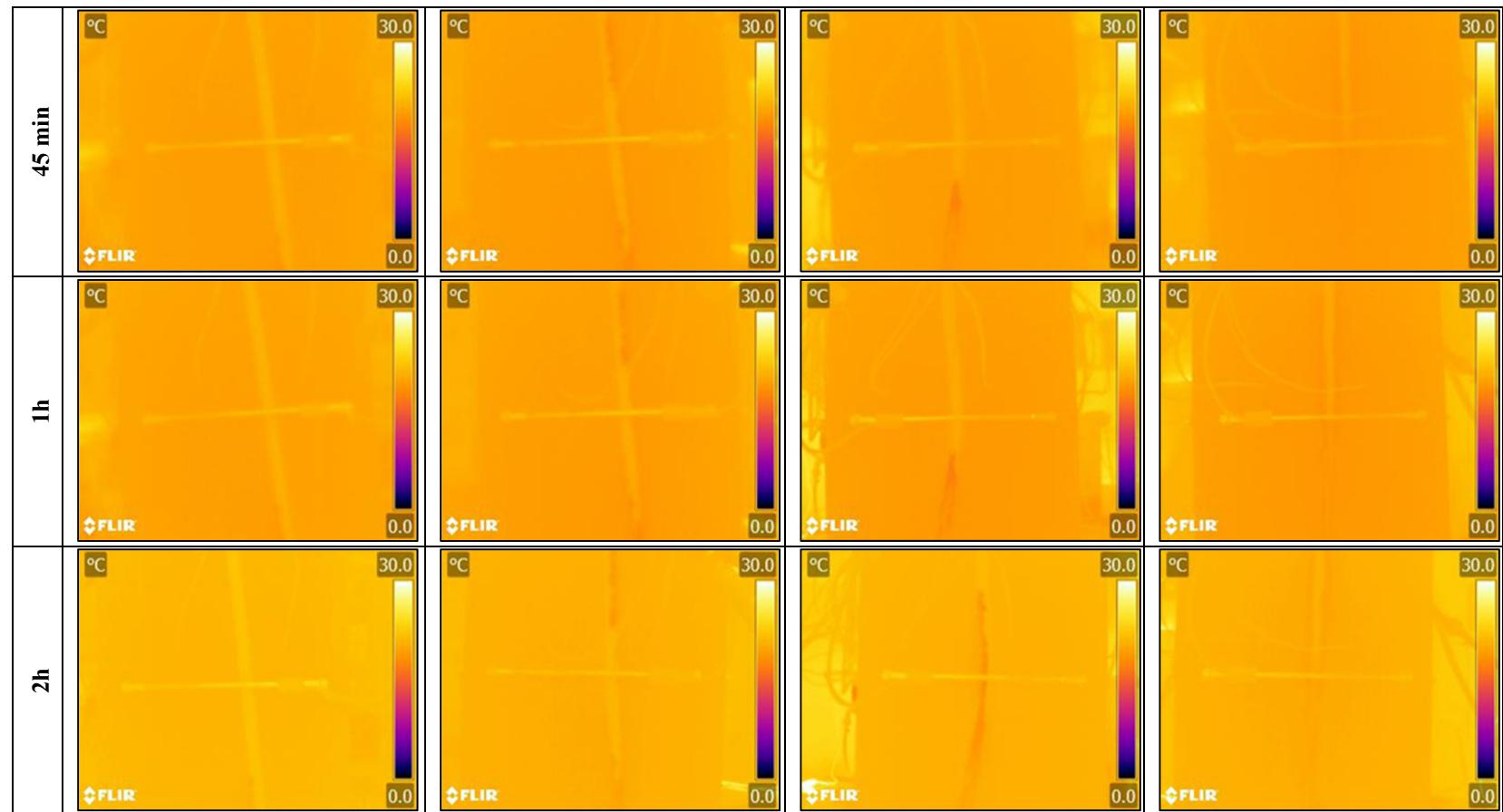


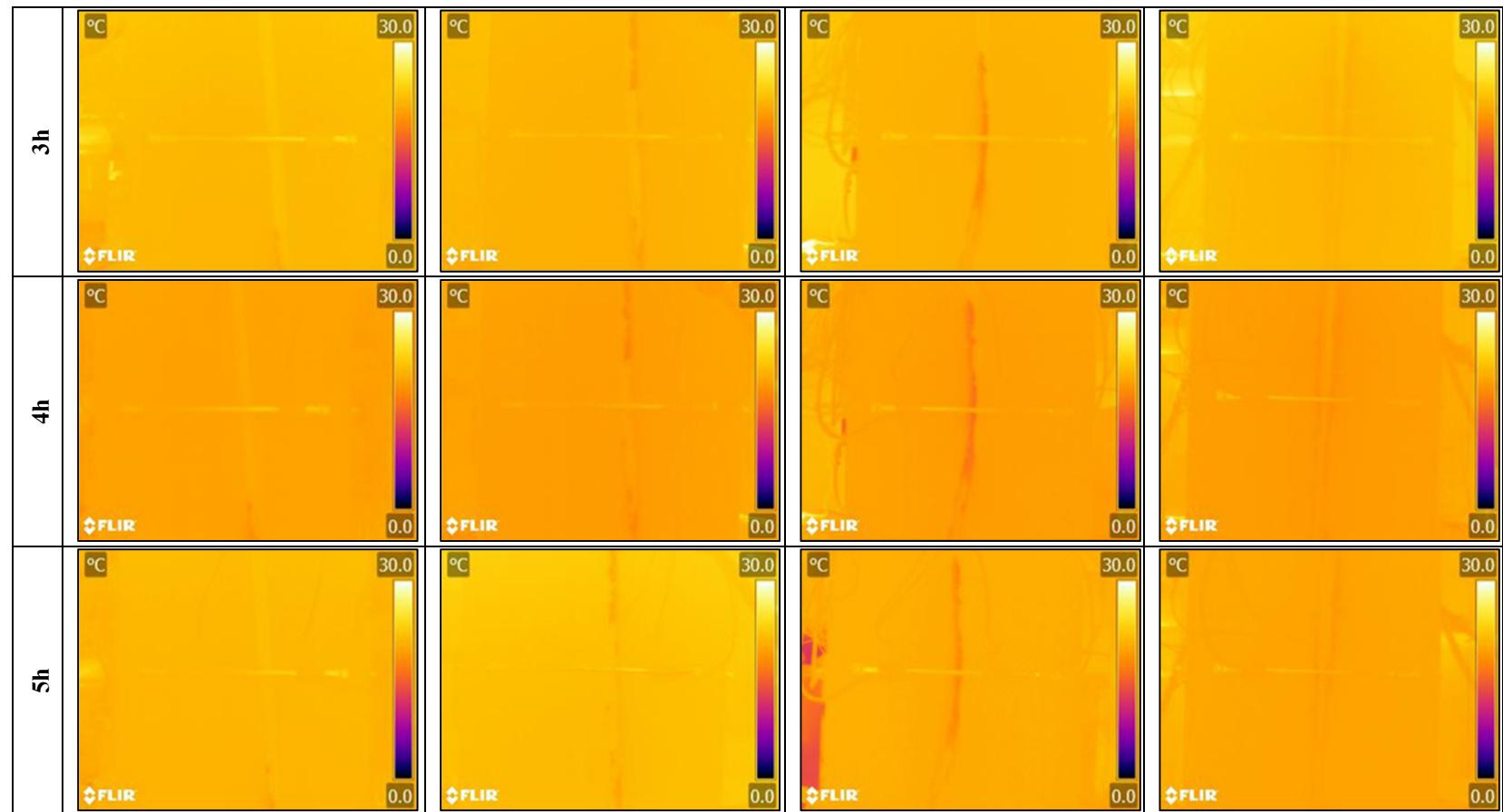


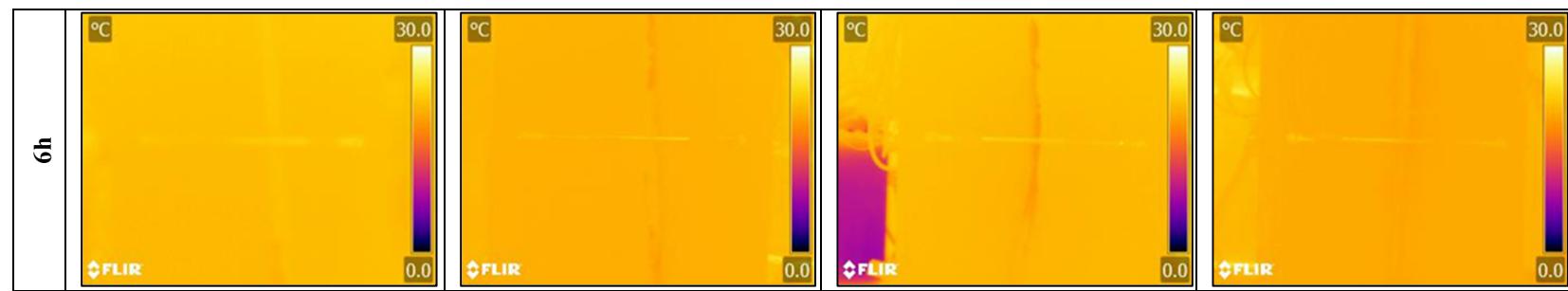
ANNEXE III

IMAGES THERMOGRAPHIQUES POUR L'ETPII



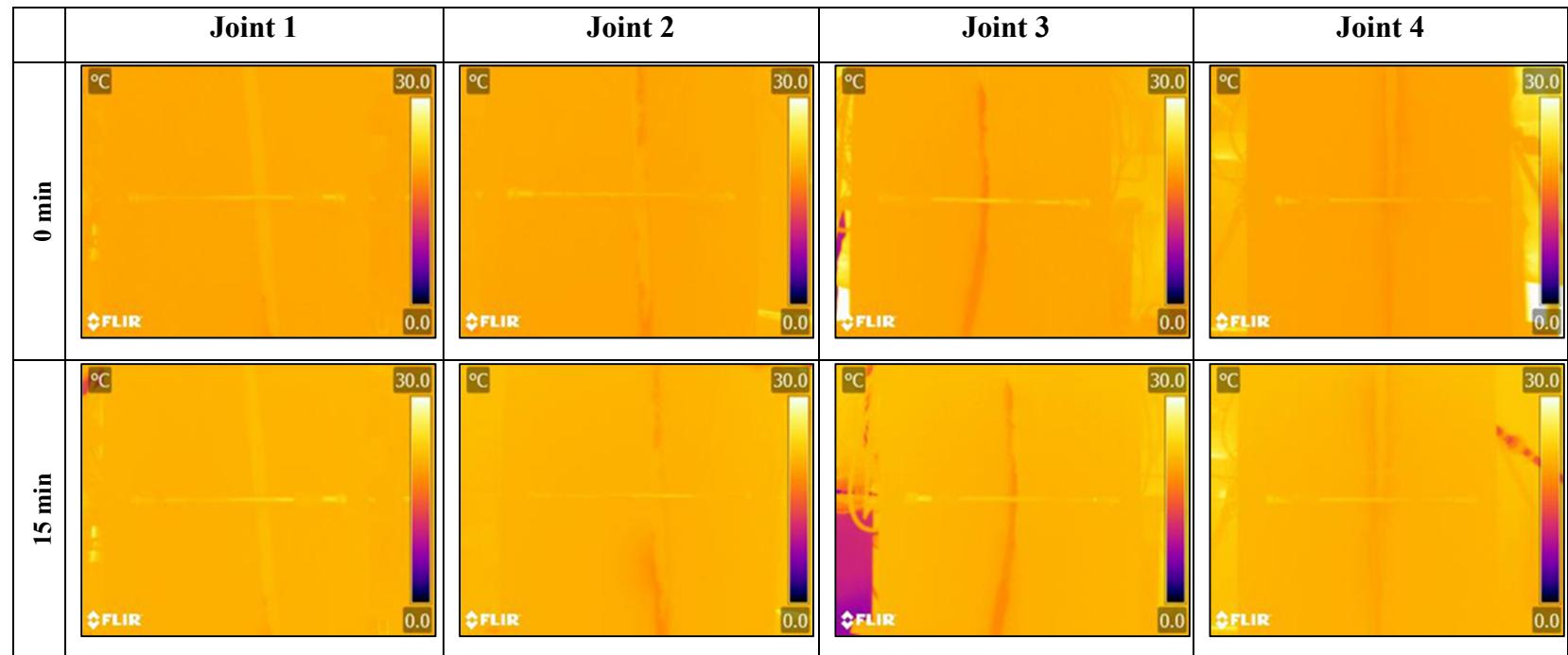


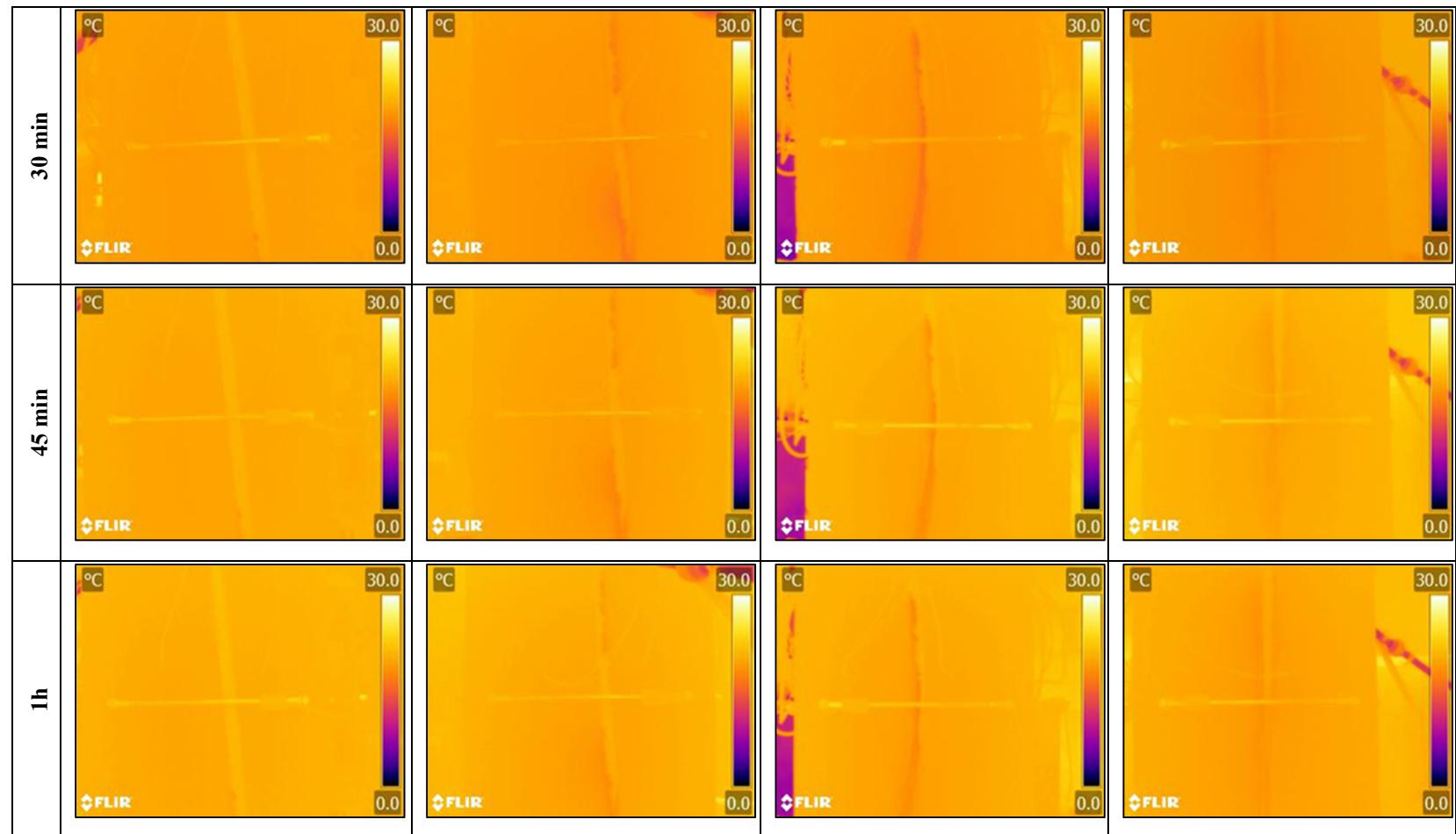


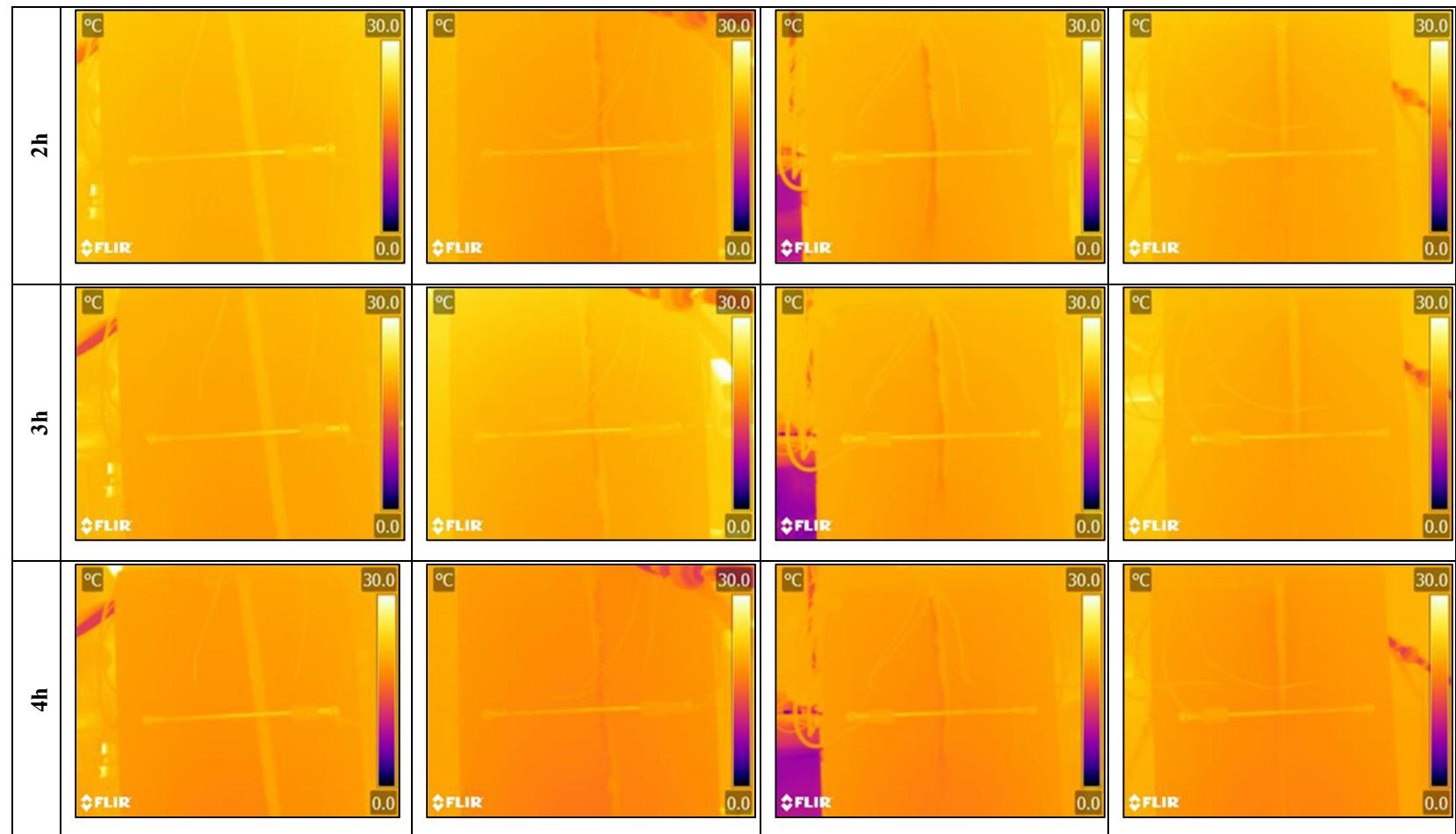


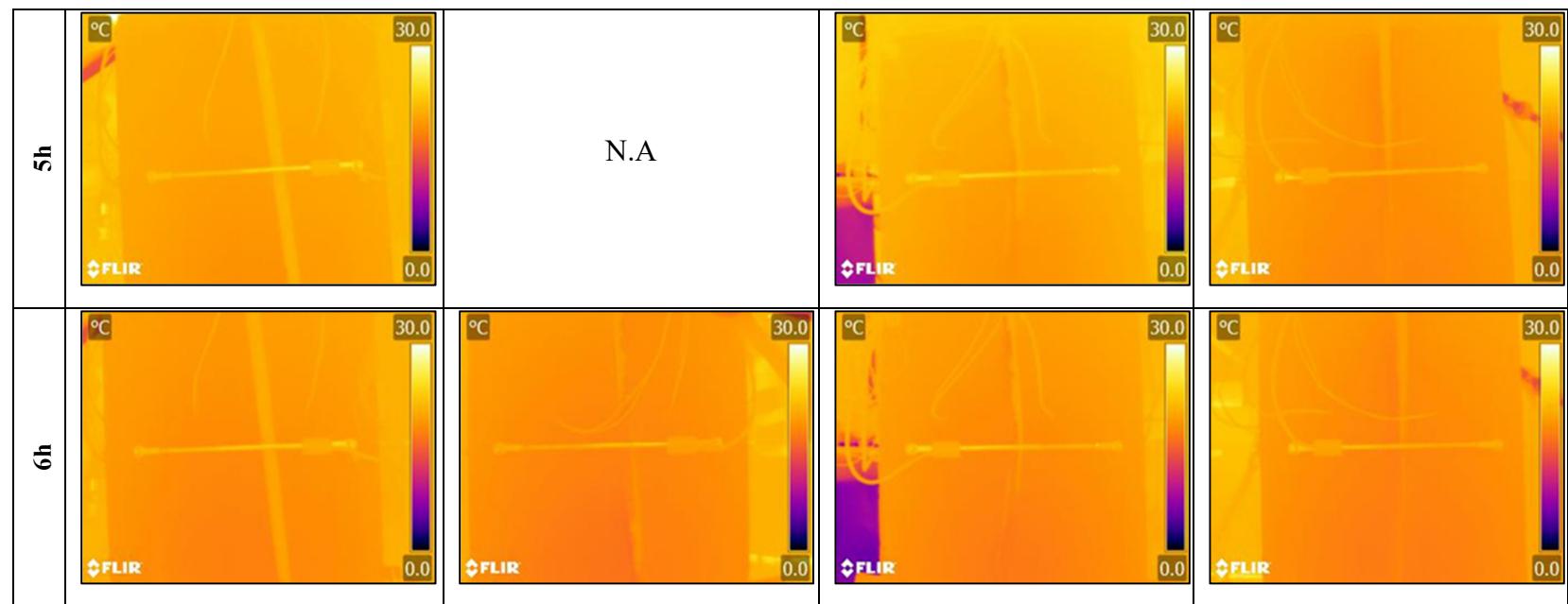
ANNEXE IV

IMAGES THERMOGRAPHIQUES POUR L'ET FAG









LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ASTM International. (2015). *Standard test method for slump of hydraulic-cement concrete*. Norme ASTM C143M.
Repéré à https://compass.astm.org/EDIT/html_historical.cgi?C143/C143M+15a
- ASTM International. (2017). *Standard test method for air content of freshly mixed concrete by the pressure method*. Norme ASTM C231/C231M-17a.
Repéré à https://compass.astm.org/EDIT/html_annot.cgi?C231+17a
- ASTM International. (2017). *Standard test methods for measurement of hydraulic conductivity of saturated porous materials using a flexible wall permeameter*. Norme ASTM D5084-16a. Repéré à https://compass.astm.org/EDIT/html_annot.cgi?D5084+16a
- ASTM International. (2017). *Standard test methods for compressive strength of cylindrical concrete specimens*. Norme ASTM C39/39M-18.
Repéré à <https://www.astm.org/database.cart/historical/C39C39M-18.htm>
- CETU. (2015). *Guide de l'inspection du génie des tunnels routiers. Livre 2: Catalogue des désordres* (DT6923).
Repéré à <http://www.cetu.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf>
- Ciment Québec. (2018). Ciment HE. Repéré à <https://cimentquebec.com/ciment/quel-ciment-choisir/>
- Doig, D. C. (1935). Tunnel lining. *United States Patent Office*, 4, 2,015,102.
- Gong, C., Ding, W., Soga, K., Mosalam, K. M., & Tuo, Y. (2018). Sealant behavior of gasketed segmental joints in shield tunnels: An experimental and numerical study. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 77, 127-141.
<https://doi.org/10.1016/j.tust.2018.03.029>
- Haack, A., Schreyer, J., & Jackel, G. (1995). Report to ITA Working Group on Maintenance and Repair of underground structures: State-of-the-art of non-destructive testing methods for determining the state of a tunnel lining. *Tunnelling and Underground Space Technology Incorporating Trenchless*, 10(4), 413-431.
- Hare, D. K., Briggs, M. A., Rosenberry, D. O., Boutt, D. F., & Lane, J. W. (2015). A comparison of thermal infrared to fiber-optic distributed temperature sensing for evaluation of groundwater discharge to surface water. *Journal of Hydrology*, 530, 153-166.

- Hounyevou-Klotoé, C., Duhaime, F., & Guizani, L. (2018). Thermal and hydraulic modeling of road tunnel joints. Conference COMSOL 2018, Boston.
- Inagaki, T., & Okamoto, Y. (1997). Diagnosis of the leakage point on a structure surface using infrared thermography in near ambient conditions. *NDT & E International*, 30(3), 135-142. [https://doi.org/10.1016/S0963-8695\(96\)00040-0](https://doi.org/10.1016/S0963-8695(96)00040-0)
- ITA. (2001). Study of methods for repair of tunnel linings. *Tunneling and Underground Space Technology*.
- Ji, Z., Lu, K. C., & Ma, C. C. (2012). Classification, Causes of Tunnel Frost Damages in Cold Region and Several New Technologies to Prevent them. *Applied Mechanics and Materials*, 170-173, 1504-1510. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.170-173.1504>
- Kosmatka, S. H. (2011). *Dosage et Contrôle des Mélanges de Béton*, (8^e éd.). Association canadienne du ciment, Ottawa, Ontario, Canada.
- Kirimtak, A., & Krejcar, O. (2018). A review of infrared thermography for the investigation of building envelopes: Advances and prospects. *Energy and Buildings*, 176, 390-406.
- Kylili, A., Fokaides, P. A., Christou, P., & Kalogirou, S. A. (2014). Infrared thermography (IRT) applications for building diagnostics: A review. *Applied Energy*, 134, 531-549. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.08.005>
- Lerma, J. L., Cabrelles, M., & Portalés, C. (2011). Multitemporal thermal analysis to detect moisture on a building façade. *Construction and Building Materials*, 25(5), 2190-2197. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.10.007>
- Lu, Z., Zhu, F., Shi, L., Wang, F., Zeng, P., Hu, J., ... Chen, Q. (2019). Automatic seepage detection in cable tunnels using infrared thermography. *Measurement Science and Technology*, 30(11), 115902. <https://doi.org/10.1088/1361-6501/ab30d9>
- Mainali, G., Dineva, S., & Nordlund, E. (2015). Experimental study on debonding of shotcrete with acoustic emission during freezing and thawing cycle. *Cold Regions Science and Technology*, 111, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2014.11.014>
- Malague, X. P. V. (1993). *Nondestructive Evaluation of Materials by Infrared Thermography*. London: Springer London. <https://doi.org/10.1007/978-1-4471-1995-1>
- M'nasri, S. (2017). *Experimental study on cement-bentonite grout for piezometer installation*. Rapport de stage, École de technologie supérieure.

- Mont, R., & Mannara, G. (1985). Nondestructive testing of honeycomb structures by computerized, thermographic systems. *12(6)*, 405-414.
- Morin-Morissette, P.-O. (2016). *Étude de la durabilité à l'écaillage en présence de sel fondant des bétons avec liant ternaire*. (Mémoire de maîtrise, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, QC). Repéré à <https://savoirs.usherbrooke.ca/handle/11143/10503>
- Mundy, E., Gleeson, T., Roberts, M., Baraer, M., & McKenzie, J. M. (2017). Thermal Imagery of Groundwater Seeps: Possibilities and Limitations. *Groundwater*, *55*(2), 160-170. <https://doi.org/10.1111/gwat.12451>
- Nawy, E. (2008). Joints in Concrete Construction. Dans E. Navy (Éd.), *Concrete Construction Engineering Handbook*. (S.l.): CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420007657>
- Noppen, L. (2001). *Du chemin du Roy à la rue Notre-Dame: mémoires et destins d'un axe est-ouest à Montréal* (p. 175 p.). Québec: Ministère des transports.
- Rathay, S. Y., Allen, D. M., & Kirste, D. (2018). Response of a fractured bedrock aquifer to recharge from heavy rainfall events. *Journal of Hydrology*, *561*, 1048-1062.
- Röper, T., Greskowiak, J., & Massmann, G. (2014). Detecting small groundwater discharge springs using handheld thermal infrared imagery. *Groundwater*, *52*(6), 936-942.
- Sika. (2015). Accessoires pour béton: Bandes d'arrêt d'eau Sika® Greenstreak.
- TOMIE. (2015). *Tunnel Operations, Maintenance, Inspection, and Evaluation Manual* (Rapport n° FHWA-HIF-15-005). Washington, D.C.: Federal Highway Administration.
- U. S. Army Corps of Engineers. (1995). *Waterstops and Other Preformed Joint Materials for Civil Works Structures*. (Rapport n° EM 1110-2-2102). Washington, D.C.: Department of the Army
- Wimsatt, A., White, J., Leung, C., Scullion, T., Hurlebaus, S., Zollinger, D., ... National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. (2013). *Mapping Voids, Debonding, Delaminations, Moisture, and Other Defects Behind or Within Tunnel Linings*. 22609. Washington, D.C.: Transportation Research Board. <https://doi.org/10.17226/22609>
- Yang, H., Liu, R., Zheng, Z., Liu, H., Gao, Y., & Liu, Y. (2018). Experimental Study on Permeability of Concrete. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *108*, 022067. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/108/2/022067>

Yuan, C., Li, S., & Li, S. (2011). Study on the Defects Characteristics of Water Leaking of Old Tunnels in Cold Regions. *Tunnel Management, Emerging Technologies, and Innovation*, 187-193. Hunan, China: American Society of Civil Engineers. [https://doi.org/10.1061/47632\(411\)24](https://doi.org/10.1061/47632(411)24)