

N° Ordre : 4318

THÈSE DE DOCTORAT

Présentée à

L'UNIVERSITE DE BORDEAUX

Ecole Doctorale des Sciences Physiques et de l'Ingénieur

Par M^{elle} Mathilde LARGET

Pour obtenir le grade de

Docteur

Spécialité : MECANIQUE

CONTRIBUTION A L'EVALUATION DE LA DEGRADATION DU BETON : THERMOGRAPHIE INFRAROUGE ET COUPLAGE DE TECHNIQUES

Soutenue le : 21 septembre 2011

Devant la commission d'examen formée de :

M. Didier DEFER (Professeur, Université d'Artois)	Rapporteur
M. Patrice RIVARD (Professeur, Université de Sherbrooke)	Rapporteur
M. Jean-Paul BALAYSSAC (Professeur, Université Paul Sabatier)	Président
M. Denis BREYSSE (Professeur, Université Bordeaux 1)	Directeur
Mme. Colette SIRIEIX (Maître de conférences HDR, Université Bordeaux 1)	Co-directeur
M. Luc RAOUX (Ingénieur, Directeur du Laboratoire EXAM BTP)	Membre Invité

N° Ordre : 4318

THÈSE DE DOCTORAT

Présentée à

L'UNIVERSITE DE BORDEAUX

Ecole Doctorale des Sciences Physiques et de l'Ingénieur

Par M^{elle} Mathilde LARGET

Pour obtenir le grade de

Docteur

Spécialité : MECANIQUE

CONTRIBUTION A L'EVALUATION DE LA DEGRADATION DU BETON : THERMOGRAPHIE INFRAROUGE ET COUPLAGE DE TECHNIQUES

Soutenue le : 21 septembre 2011

Devant la commission d'examen formée de :

M. Didier DEFER (Professeur, Université d'Artois)	Rapporteur
M. Patrice RIVARD (Professeur, Université de Sherbrooke)	Rapporteur
M. Jean-Paul BALAYSSAC (Professeur, Université Paul Sabatier)	Président
M. Denis BREYSSE (Professeur, Université Bordeaux 1)	Directeur
Mme. Colette SIRIEIX (Maître de conférences HDR, Université Bordeaux 1)	Co-directeur
M. Luc RAOUX (Ingénieur, Directeur du Laboratoire EXAM BTP)	Membre Invité

Table des matières

TABLE DES MATIERES	I
TABLE DES ILLUSTRATIONS.....	VIII
TABLE DES TABLEAUX	XV
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 : ETAT DE L'ART DES METHODES DE THERMOGRAPHIE INFRAROUGE : PRINCIPES ET APPLICATIONS	5
I. NOTIONS ELEMENTAIRES SUR LES TRANSFERTS THERMIQUES.....	7
I.1. Définitions	7
I.1.1. Champ de température	7
I.1.2. Surface isothermes.....	8
I.1.3. Gradient de température	8
I.1.4. Flux thermique et densité de flux thermique.....	9
I.2. Les différents types de transfert thermique	9
I.2.1. Transfert thermique	9
I.2.2. Conduction	9
I.2.3. Convection.....	11
I.2.4. Rayonnement	12
II. INTRODUCTION GENERALE SUR LA THERMOGRAPHIE INFRAROUGE.....	12
II.1. Origine et nature du rayonnement infrarouge	13
II.1.1. Définition	13
II.1.2. Le spectre infrarouge.....	13
II.2. Principes physiques de la thermographie.....	14
II.2.1. Transfert d'énergie par rayonnement.....	14
II.2.1.1. Cas d'un corps commun	14
II.2.1.2. Cas du corps noir.....	15
II.2.1.1. Cas des gaz	15
II.2.1.2. Cas du béton	15
II.2.2. Lois fondamentales du rayonnement thermique.....	16

II.2.2.1.	Luminance	16
II.2.2.2.	Emittance	16
II.2.2.3.	Propriétés du corps noir.....	17
II.2.2.3.1.	Loi de Planck.....	17
II.2.2.3.2.	Loi de Stefan-Boltzmann	19
II.2.2.4.	Emissivité du matériau	19
II.2.3.	Principe de la mesure de température.....	21
II.2.4.	Paramètres influençant la mesure	23
II.2.4.1.	Emissivité du matériau	23
II.2.4.2.	Conditions environnementales	23
II.2.4.3.	Distance surface de l'objet-objectif caméra : influence de l'atmosphère	23
II.2.4.4.	Teneur en eau du matériau.....	25
II.2.4.5.	Variation de couleur.....	25
II.3.	Définition d'une anomalie en TIR	26
III.	PROPRIETES THERMIQUES DU MATERIAU BETON	27
III.1.	Conductivité thermique.....	27
III.2.	Chaleur massique et capacité calorifique volumique.....	27
III.2.1.	Chaleur massique	27
III.2.2.	Capacité calorifique volumique	28
III.3.	Diffusivité thermique	28
III.4.	Effusivité.....	28
III.5.	Inertie thermique.....	29
IV.	LA THERMOGRAPHIE INFRAROUGE OUTIL DU CONTROLE NON DESTRUCTIF DANS LA CONSTRUCTION	29
IV.1.	Thermographie infrarouge passive	30
IV.1.1.	Méthode.....	30
IV.1.2.	Analyse et traitement.....	32
IV.1.3.	Applications.....	32
IV.1.4.	Avantages	35
IV.1.5.	Limites	35
IV.2.	Thermographie active	36
IV.2.1.	Méthode.....	36
IV.2.1.1.	Thermographie pulsée (PT).....	36
IV.2.1.2.	Thermographie modulée (LT)	39
IV.2.1.3.	Thermographie de phase pulsée (PPT)	41

IV.2.1.4.	Vibrothermographie stimulée par ultrason(VT)	43
IV.2.1.5.	Chauffage Interne et Détection Externe par Thermographie Infrarouge (CIDETI)	45
IV.2.2.	Avantages	45
IV.2.3.	Limites	45
V.	CONCLUSION	46
CHAPITRE 2 : ETUDES EXPERIMENTALES ET NUMERIQUES DE L'INFLUENCE DE PARAMETRES		
INTRINSEQUES AU MATERIAU BETON..... 49		
I.	REVUE DES FACTEURS AFFECTANT LES PROPRIETES THERMIQUES DES	
BETONS	51
I.1.	Conductivité thermique.....	52
I.1.1.	Nature et densité de granulat	52
I.1.2.	Porosité	53
I.1.3.	Teneur en eau.....	56
I.1.4.	Température.....	58
I.1.5.	Conclusion	59
I.2.	Chaleur massique.....	60
I.2.1.	Nature du granulat	60
I.2.2.	Porosité	60
I.2.3.	Teneur en eau.....	60
I.2.4.	Température.....	61
I.2.5.	Conclusion	62
I.3.	Bilan : Influence sur les mesures des variations de propriétés thermiques du béton.....	62
II.	ETUDE DE L'INFLUENCE DE LA COMPOSITION DES BETONS SUR LEUR	
REPONSE AUX SOLLICITATIONS THERMIQUES	63
II.1.	Projet SENSO.....	64
II.1.1.	Présentation	64
II.1.2.	Stratégie générale	64
II.1.3.	Qu'attend-on nous de la thermographie infrarouge ?	66
II.2.	Etude expérimentale de l'influence de la porosité et de la nature de granulat sur la mesure de	
thermographie infrarouge	67
II.2.1.	Objectifs.....	67
II.2.2.	Présentation des corps d'épreuves	67
II.2.3.	Protocole expérimental.....	69
II.2.3.1.	Conditionnement des corps d'épreuves	69
II.2.3.2.	Protocole de mesure	70

II.2.4.	Traitements des mesures	72
II.2.5.	Résultats des mesures	72
II.2.5.1.	Influence des conditions aux limites	73
II.2.5.2.	Influence de la porosité.....	77
II.2.5.3.	Influence de la nature du granulat.....	79
II.2.6.	Calage d'un modèle numérique sur les données expérimentales	80
II.2.6.1.	Calcul des propriétés thermiques des différents bétons	80
II.2.6.2.	Calcul du nombre de Biot.....	81
II.2.6.3.	Ajustement du modèle.....	83
II.2.6.4.	Influence de la porosité sur le modèle.....	85
II.3.	Conclusion de l'étude	86
III.	ETUDE DE L'INFLUENCE DU TAUX DE SATURATION SUR LA MESURE DE THERMOGRAPHIE INFRAROUGE	87
III.1.	Etude expérimentale	87
III.1.1.	Objectifs.....	87
III.1.2.	Présentation des corps d'épreuves	88
III.1.3.	Protocole expérimental.....	88
III.1.3.1.	Conditionnement des corps d'épreuves	88
III.1.3.2.	Protocole de mesure	89
III.1.4.	Traitements des mesures	90
III.1.5.	Résultats des mesures	91
III.1.6.	Conclusions de l'étude expérimentale	93
III.2.	Etude numérique	93
III.2.1.	Calcul des propriétés thermiques des différents bétons	94
III.2.2.	Influence de l'état de saturation sur le modèle	95
III.2.3.	Conclusion de l'étude numérique	96
IV.	CONCLUSION	96
CHAPITRE 3 : ÉTUDE DE LA PRESENCE D'UN ENDOMMAGEMENT PARTICULIER DU BETON : LA DELAMINATION		99
I.	GENERALITES SUR LES DELAMINATIONS	101
I.1.	Qu'est ce qu'une délamination.....	101
I.2.	Moyens actuels de détection et de caractérisation	102
I.2.1.	Méthodes acoustiques	102
I.2.1.1.	Méthode de la chaîne « Drag chain »	102
I.2.1.2.	“Coin tap test” ou “Marteau de sondage”	103

I.2.1.3.	Impact-écho.....	104
I.2.2.	Méthode électromagnétique	105
I.2.2.1.	Radar.....	105
I.2.2.2.	Thermographie infrarouge passive.....	107
I.2.2.3.	Thermographie infrarouge active.....	107
I.2.3.	Bilan.....	107
II.	DETECTION ET INFLUENCE SUR LA MESURE INFRAROUGE DE LA PRESENCE DE DELAMINATION	108
II.1.	Signature thermique d'une délamination	108
II.2.	Influence des propriétés de la délamination sur sa détectabilité	110
II.2.1.	Influence de la profondeur.....	110
II.2.1.1.	Etude expérimentale.....	110
II.2.1.1.1.	Présentation de l'étude et description des corps d'épreuves physiques.....	110
II.2.1.1.2.	Protocole expérimental.....	111
II.2.1.1.3.	Traitement des mesures.....	112
II.2.1.1.4.	Résultats.....	114
II.2.1.1.5.	Interprétation	116
II.2.1.1.6.	Conclusions.....	118
II.2.1.2.	Etude numérique.....	118
II.2.1.2.1.	Description des corps d'épreuves numériques	118
•	Modélisation des transferts thermiques.....	119
•	Conditions initiales.....	119
•	Conditions aux limites.....	119
II.2.1.2.2.	Bilan des éléments modélisés	121
II.2.1.2.3.	Résultats des modélisations	122
II.2.1.3.	Conclusions :	131
II.2.2.	Influence du pontage.....	132
II.2.2.1.	Etude expérimentale.....	132
II.2.2.1.1.	Présentation de l'étude et description des corps d'épreuves physiques.....	132
II.2.2.1.2.	Protocole expérimental.....	133
II.2.2.1.3.	Traitement des mesures.....	133
II.2.2.1.4.	Résultats.....	133
II.2.2.1.5.	Comparaison délamination pleine – délamination pontée et conclusions.....	136
II.2.2.2.	Etude numérique.....	137
II.2.2.2.1.	Présentation	137
II.2.2.2.2.	Résultats.....	139
II.2.2.2.3.	Conclusion	141
III.	CONCLUSIONS	142
III.1.1.	Influence de la profondeur.....	142
III.1.2.	Influence du pontage.....	143

III.1.3.	Suggestions d'utilisation.....	144
----------	--------------------------------	-----

CHAPITRE 4 : INTERET DU COUPLAGE DE DIFFERENTES TECHNIQUES DE CONTROLE NON DESTRUCTIF : GESTION ET VALORISATION DE BASE DE DONNEES POUR INTEGRATION A L'OUTIL DE FUSION DE DONNEES.....145

I.	DE LA MESURE A LA BASE DE DONNEES.....	148
I.1.	Objectifs et stratégie du projet SENSO.....	148
I.1.1.	Objectifs.....	148
I.1.2.	Stratégie générale	148
I.2.	Techniques de CND utilisées.....	149
I.2.1.	Résistivité électrique	149
I.2.2.	Ondes de surface ultrasonores.....	150
I.2.3.	Ondes de compression et ondes rétrodiffusées.....	151
I.2.4.	Impact-echo.....	151
I.2.5.	Radar	152
I.2.6.	Technique capacitive.....	153
I.2.7.	Thermographie infrarouge	154
I.2.8.	Conclusions.....	154
I.3.	Description détaillée du volet expérimental	154
I.3.1.	Tranche 1.....	154
I.3.2.	Tranche 2.....	155
I.3.3.	Tranche 3.....	156
I.3.4.	Conclusions.....	156
I.4.	Création et exploitation de la base de données	157
I.4.1.	Normalisation et nomenclature des points de mesure.....	157
I.4.2.	Organisation de la base de données	159
II.	CONSOLIDATION ET TRAITEMENT DES DONNEES.....	163
II.1.	Tri et consolidation des données	163
II.2.	Calculs de variabilité	163
II.2.1.	Variabilité V1 : Répétabilité locale	163
II.2.2.	Variabilité V2 : Hétérogénéité irréductible du matériau.....	165
II.2.3.	Variabilité V3 : Hétérogénéité d'un béton « homogène »	167
II.2.4.	Variabilité V4	168
II.3.	Conclusions.....	170

III.	VALORISATION DE LA BASE DE DONNEES.....	173
III.1.	Procédure de sélection des observables	173
III.2.	Choix des observables : définition des critères de pertinence et de qualité	174
III.2.1.	Indice de qualité	175
III.2.2.	Indices de pertinence	175
III.2.3.	Sélection des observables	176
IV.	PREMIERS RESULTATS	178
IV.1.	Estimation de la qualité d'une mesure de CND	178
IV.2.	Combinaison de mesure par régression bi-linéaire.....	181
IV.3.	Fusion de données	184
V.	CONCLUSIONS	187
	CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	189
	RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	195
	ANNEXES	209
	<i>Annexe I. 1. Emissivité des matériaux.....</i>	<i>211</i>
	<i>Annexe II. 1. Agencement des dalles dans l'étuve et lors des mesures</i>	<i>212</i>
	<i>Annexe II. 2. Evolution des températures de surface des 90 dalles à l'état sec</i>	<i>213</i>
	<i>Annexe II. 3. Organisation des séries de dalle pour la mesure de teneur en eau.....</i>	<i>216</i>
	<i>Annexe IV. 1. Liste des observables du projet SENSO.....</i>	<i>217</i>
	<i>Annexe IV. 2. Histogrammes de variabilité des observables</i>	<i>218</i>

Table des illustrations

CHAPITRE 1 : ETAT DE L'ART DES METHODES DE THERMOGRAPHIE INFRAROUGE : PRINCIPES ET APPLICATIONS.....	5
<i>Figure I. 1. Notion de gradient dans un champ de température.....</i>	<i>8</i>
<i>Figure I. 2. Principe de l'expérience de Herschel pour détecter l'infrarouge (http://www.herschel.fr/fr/herschel/pourquoi_herschel.php).....</i>	<i>13</i>
<i>Figure I. 3. Nomenclature des ondes électromagnétiques [GAU, 84]</i>	<i>14</i>
<i>Figure I. 4. Transfert d'énergie entre rayonnement et corps commun.....</i>	<i>15</i>
<i>Figure I. 5. Définition géométrique des valeurs nécessaires à la définition de la luminance [BIA, 04] ..</i>	<i>16</i>
<i>Figure I. 6. Distribution spectrale du corps noir [GAU, 84].....</i>	<i>18</i>
<i>Figure I. 7. Influence de l'angle d'incidence sur l'émissivité totale directionnelle [MAT,05].....</i>	<i>20</i>
<i>Figure I. 8. Emissivité spectrale des différents types de corps [GAU, 84].....</i>	<i>20</i>
<i>Figure I. 9. Composition du rayonnement reçu par un capteur thermique ([SIR, 05] d'après [WIL, 88])</i>	<i>22</i>
<i>Figure I. 10. Influence de la longueur d'onde sur la transmission atmosphérique (d'après [GAU, 84])</i>	<i>24</i>
<i>Figure I. 11. Facteur moyen de transmission atmosphérique en fonction de la distance et de la fenêtre d'observation [CAR, 06].....</i>	<i>25</i>
<i>Figure I. 12. Dispositif de mesure en thermographie infrarouge passive.....</i>	<i>30</i>
<i>Figure I. 13. Localisation infrarouge d'un plancher chauffant (Source EXAM BTP).....</i>	<i>31</i>
<i>Figure I. 14. Réponse thermique de la présence de délaminations en conditions réelles a) Mesures réalisées le matin b) Mesures réalisées l'après-midi [NAA, 06]</i>	<i>31</i>
<i>Figure I. 15. Ponts thermiques en façade d'une maison</i>	<i>33</i>
<i>Figure I. 16. Images visible et infrarouge de la paroi de la station de métro Assomption à Montréal (Image Samuel NAAR)</i>	<i>33</i>
<i>Figure I. 17. Détection de vides derrière une paroi béton de digue [OST, 03].....</i>	<i>34</i>
<i>Figure I. 18. Exemple de zones en auto-combustion sur des terrils miniers (gamme de température 18- 62°C) [CAR, 06]</i>	<i>34</i>
<i>Figure I. 19. Images visible et infrarouge de la sous face d'un pont présentant une multitude d'anomalies thermiques [GIL, 07]</i>	<i>34</i>
<i>Figure I. 20. Représentation schématique du montage expérimental utilisé en thermographie infrarouge pulsée (d'après [BEN, 09])</i>	<i>36</i>
<i>Figure I. 21. Illustration des enregistrements effectués en PT (adapté de [COU, 97])</i>	<i>37</i>

Figure I. 22. Température de surface au droit du matériau sain, du matériau altéré et différence de température entre les deux zones avec localisation du contraste maximum (d'après [MAI, 03])	37
Figure I. 23. Représentation schématique du montage expérimental utilisé en thermographie modulée.....	40
Figure I. 24. Représentation en domaine temporel et fréquentiel d'une stimulation thermique réelle simplifiée (d'après [MAL, 97])	41
Figure I. 25. Exemples d'images en phase et en amplitude obtenues pour différentes fréquences en PPT et LT, et d'image de contraste maximum obtenue en PT [d'après MAL, 01]	43
Figure I. 26. Représentation schématique du montage expérimental utilisé en vibrothermographie [PIA, 08].....	44

CHAPITRE 2 : ETUDES EXPERIMENTALES ET NUMERIQUES DE L'INFLUENCE DE PARAMETRES INTRINSEQUES AU MATERIAU BETON 49

Figure II. 1. Influence de la proportion de granulats dans un béton sur sa conductivité thermique [KIM, 03].....	53
Figure II. 2. a) Modèle série b) Modèle parallèle.....	54
Figure II. 3. Estimation de la conductivité thermique équivalente par la loi d'Ohm	54
Figure II. 4. Valeurs de conductivité équivalente issues des modèles par approximation du milieu effectif.....	56
Figure II. 5. Evolution de la conductivité thermique d'un béton en fonction de sa porosité et de sa teneur en eau	58
Figure II. 6. Evolution de la conductivité thermique des bétons en fonction de la température du matériau [MORa, 01]	58
Figure II. 7. Evolution de la chaleur massique en fonction de la teneur en eau et de la porosité du béton	61
Figure II. 8. Evolution de la chaleur spécifique en fonction de la température du béton [MORa, 01] ..	61
Figure II. 9. Evolution du contraste de température maximum ΔT_{max} et temps t_{max} en fonction Gauche) de la conductivité thermique, Droite) de la masse volumique [MAI, 07]	63
Figure II. 10. Déroulement du projet SENSO.....	66
Figure II. 11. Dalle SENSO de dimensions 50x25x12,5 cm.....	68
Figure II. 12. Caméra ThermaCAM TM SC 2000 FLIR Systems.....	69
Figure II. 13. Exemple d'enregistrement de la température de surface d'une dalle	70
Figure II. 14. Disposition des dalles pour les mesures de thermographie infrarouge (Configuration B)	70
Figure II. 15. Surfaces d'échanges air – dalle	71
Figure II. 16. Effet de bords (Config B à $t=21000s$).....	71
Figure II. 17. Schéma d'installation des séries de dalles pendant les mesures à l'état sec (Série G).....	72

Figure II. 18. Surfaces utilisées pour le calcul de la température moyenne de surface (Config A).....	72
Figure II. 19. Evolution des températures de surface des dalles de la gâchée G3 en fonction de leur position dans les séries de mesure	74
Figure II. 20. Evolution des températures de surface des dalles de composition G3 entreposées sur la palette 1	74
Figure II. 21. Evolution des températures de surface des dalles de composition G3 entreposées sur la palette 2	75
Figure II. 22. Températures de surface des dalles G3 ayant 1 ou 3 surfaces d'échange avec l'air	76
Figure II. 23. Températures de surface des dalles G3 ayant 1 ou 2 surfaces d'échange avec l'air	76
Figure II. 24. Décroissance exponentielle de la température de surface des dalles	77
Figure II. 25. Influence de la porosité sur les courbes de refroidissement des bétons.....	78
Figure II. 26. Contrastes de température entre la gâchée de référence G3 et les autres gâchées.....	78
Figure II. 27. Contrastes de température entre les gâchées aux porosités les plus proches et les plus éloignées	78
Figure II. 28. Influence de la nature du granulat sur les courbes de refroidissement des bétons	79
Figure II. 29. Contrastes de température entre la gâchée de référence G3 et les autres gâchées.....	79
Figure II. 30. Influence du nombre de Biot sur la forme des profils de température aux parois : (a) $Bi < 1$; (b) $Bi > 1$	82
Figure II. 31. Courbe de refroidissement modélisée _ Modèle 1	84
Figure II. 32. Evolution de la température de l'air entre les dalles et dans le couloir [LAN, 06].....	84
Figure II. 33. Courbe de refroidissement modélisée _ Modèle 2	85
Figure II. 34. Courbes de refroidissement modélisées des valeurs de porosités extrêmes et différence de température entre ces extremums.....	86
Figure II. 35. Conditionnement des dalles pour l'étude de l'influence de la teneur en eau.....	88
Figure II. 36. Température et humidité relative de l'air au cours des mesures de thermographie infrarouge.....	89
Figure II. 37. Schéma d'installation des séries de dalles pendant les mesures aux différents états de saturation.....	90
Figure II. 38. Surfaces utilisées pour le calcul de température de surface des dalles à différents état de saturation.....	90
Figure II. 39. Comportement pseudo-linéaire des courbes de refroidissement.....	91
Figure II. 40. Courbes de refroidissement expérimentales obtenues pour les gâchées a) G8 (béton le plus poreux et) b) G4 (béton comportant des granulats siliceux roulés 0-20 mm).....	92
Figure II. 41. Influence du taux de saturation sur la cinétique de refroidissement du béton de formulation G3.....	96

CHAPITRE 3 : ETUDE DE LA PRESENCE D'UN ENDOMMAGEMENT PARTICULIER DU BETON : LA DELAMINATION.....	97
<i>Figure III. 1 Délamination dû à la corrosion des armatures [NAA, 06].....</i>	<i>101</i>
<i>Figure III. 2 Renforcement de tablier de pont par tissu de fibre de carbone (Source Freyssinet).....</i>	<i>101</i>
<i>Figure III. 3. Recherche de délamination sur une chaussée par la méthode de la chaîne glissée [SCH, 98].....</i>	<i>102</i>
<i>Figure III. 4. Inspection d'une culée de pont par « Hammer sounding » [COL, 10]</i>	<i>103</i>
<i>Figure III. 5. Principe de l'analyse fréquentielle (d'après [CAR, 01]).....</i>	<i>104</i>
<i>Figure III. 6. Exemple de spectres d'amplitudes obtenu en impact-écho a) matériau sain 0.5m d'épaisseur b) vide artificiel à 0.25m de profondeur (d'après [CAR, 01]).....</i>	<i>104</i>
<i>Figure III. 7. Représentation schématique du plus petit défaut détectable en impact-écho (d'après [SAN, 97])</i>	<i>105</i>
<i>Figure III. 8. a) Exemple de trace radar b) Radargramme brut c) Radargramme interprété (Source EXAM BTP).....</i>	<i>106</i>
<i>Figure III. 9. Effet d'un vide sur la propagation de la chaleur à l'intérieur d'un élément béton (d'après [CAR, 03])</i>	<i>109</i>
<i>Figure III. 10. Vues de coté et de face des délaminations incorporées dans les dalles.....</i>	<i>110</i>
<i>Figure III. 11. Image infrarouge de la dalle D3 (12h09).....</i>	<i>112</i>
<i>Figure III. 12. Illustration du processus de sélection des pixels représentatifs de la délamination</i>	<i>113</i>
<i>Figure III. 13. Variation de la température de surface moyenne en fonction du nombre de pixels sur laquelle cette moyenne est calculée (image prise à 12h09 sur la dalle D3).....</i>	<i>113</i>
<i>Figure III. 14. Implantation des zones d'analyse sur une dalle test.....</i>	<i>114</i>
<i>Figure III. 15. Résultats des mesures effectuées sur la dalle D3 (délamination à 2 cm).....</i>	<i>115</i>
<i>Figure III. 16. Résultats des mesures effectuées sur la dalle D2 (délamination à 5 cm).....</i>	<i>115</i>
<i>Figure III. 17. Résultats des mesures effectuées sur la dalle D3 (délamination à 12,7 cm).....</i>	<i>116</i>
<i>Figure III. 18. Profil de température le long de la surface de la dalle à 14h16 et 21h06.....</i>	<i>117</i>
<i>Figure III. 19. Images infrarouge de la dalle délaminée à 12,7 cm. Gauche) 14h16. Droite) 21h06... ..</i>	<i>117</i>
<i>Figure III. 20. Conditions initiales</i>	<i>119</i>
<i>Figure III. 21. Température de l'air imposée sur les faces extérieures</i>	<i>120</i>
<i>Figure III. 22. Schéma bilan des échanges modélisés</i>	<i>121</i>
<i>Figure III. 23. Température de surface des dalles au droit de délaminations de profondeur variables (Jour 2)</i>	<i>122</i>
<i>Figure III. 24. Optimum de détection des délaminations en fonction de leur profondeur</i>	<i>123</i>

Figure III. 25. Gauche) Température de l'air mesurée et simulée. Droite) Contrastes de température entre zones saine et délaminée obtenus expérimentalement et numériquement pour une délamination à 2 cm.....	124
Figure III. 26. Réponse thermique modélisée de la présence d'une délamination à 2 mm de profondeur à différents instants de la journée a) à 13h30 b) à 22h30	124
Figure III. 27. Influence de la profondeur de délamination sur les ΔT_{max} de la fin de matinée et leur temps d'apparition.....	125
Figure III. 28. Influence de la profondeur de délamination sur les ΔT_{max} du début de soirée et leur temps d'apparition.....	125
Figure III. 29. Evolution de la température de surface de la dalle et du gradient de température pour une délamination à 2 mm de profondeur	126
Figure III. 30. Evolution de la température de surface de la dalle et du gradient de température pour des délaminations à 2 mm et à 2 cm de profondeur.....	127
Figure III. 31. Amplitudes et temps d'apparition des gradients de température maximums.....	127
Figure III. 32. Evolution du gradient temporel de température des mesures expérimentales réalisées sur les dalles délaminées.....	129
Figure III. 33. Instants et valeurs des gradients temporels de température maximums obtenus expérimentalement.....	130
Figure III. 34. Plaque de polystyrène perforée utilisée comme délamination (\varnothing 6 mm)	132
Figure III. 35. Résultats des mesures effectuées sur la dalle D1 (délamination pontée à 2 cm)	134
Figure III. 36. Profil de température le long de la surface de la dalle D1 à 13h09 et 20h59	135
Figure III. 37. Images infrarouge de la dalle délaminée à 2 cm. Gauche) 13h09. Droite) 20h59.....	135
Figure III. 38. Comparaison des contrastes de températures ente zones 1 et 3 pour les délaminations pontée ou non pontée à 2 cm de profondeur.....	135
Figure III. 39. Résultats des mesures effectuées sur la dalle D4 (délamination pontée à 5 cm)	136
Figure III. 40. Comparaison des contrastes de températures ente zones 1 et 3 pour les délaminations pontée ou non pontée à 5 cm de profondeur.....	136
Figure III. 41. Représentation schématique des pontages à l'intérieur d'une délamination.....	138
Figure III. 42. Evolution de la température de surface (délamination 2 cm) en fonction du taux de pontage	139
Figure III. 43. Evolution du contraste de température entre zone saine et zone comportant une délamination à 2 cm de profondeur dont le taux de pontage évolue entre 0 et 15%	140
Figure III. 44. Atténuation du contraste de température de délaminations à différentes profondeurs en fonction de leur taux de pontage.....	141
Figure III. 45. Valeur du contraste de température de délaminations à différentes profondeur en fonction de leur taux de pontage.....	141

**CHAPITRE 4 : INTERET DU COUPLAGE DE DIFFERENTES TECHNIQUES DE CONTROLE
NON DESTRUCTIF : GESTION ET VALORISATION DE BASE DE DONNEES POUR
INTEGRATION A L'OUTIL DE FUSION DE DONNEES143**

Figure IV. 1. Gauche. Dispositif quadripôle, Droite. Dispositif Wenner [LMD, 09] 150

Figure IV. 2. Gauche. ROBOT de GEA-IEMN, Droite. Banc de mesure de l'IFSTTART 151

Figure IV. 3. Dispositif utilisé pour la mesure des ondes rétrodiffusées [GAR, 08¹] 151

Figure IV. 4. Mesure par impact-écho 152

Figure IV. 5. Gauche. Dispositif du LMDC. Droite. Antenne bi-statique modifiée de l'IFSTTAR..... 153

Figure IV. 6. Capteur capacitif associé à un jeu de trois électrodes 153

Figure IV. 7. Disposition des points de mesure sur les dalles N1 et N2 158

Figure IV. 8. Disposition des points de mesure sur les dalles N3 à N10..... 158

Figure IV. 9. Format normalisé du rendu des mesures SENSO pour centralisation 159

Figure IV. 10 Organisation de la base de données pour une technique et une gâchée à un état de saturation..... 160

Figure IV. 11. Représentation schématique des liens entre les différentes variabilités calculées..... 171

Figure IV. 12. Variabilités calculées pour 4 observables, a) Observable 27 : Capacité électrodes moyennes, b) Observable 4 : US Vitesse 1cm, c) Observable 11 : US Vitesse de transmission des ondes de compression, d) Observable 51 : Radar Temps d'arrivée OD offset 12,2 cm..... 172

Figure IV. 13. Nombre minimal d'essais requis pour atteindre une précision visée sur Sr [BRE, 11²] . 180

Figure IV. 14. Exemple de régression bilinéaire: vitesse des ondes de surface (Observable 2) en fonction de la porosité et du degré de saturation [PLO,11]..... 181

Figure IV. 15.Modèles de régression identifiées pour 4 observables en fonction de la porosité et du degré de saturation a) Observable 6 : US Vitesse 3 cm, b) Observable 9 : OS atténuation, écart-type c) Observable 36 : Résistivité électrique quadripôle 10 cm, d) Observable 51 : Radar Temps d'arrivée offset 13,2cm (d'après [BRE, 09])..... 183

Figure IV. 16. Couplage des mesures de différents observables sur la gâchée 3, état S3, dalle n°5 [LMD, 09]..... 183

Figure IV. 17. Identification de la distribution de possibilité des indicateurs pour l'observable 42 (d'après [PLO, 11])..... 184

Figure IV. 18.Exemples de distributions a) $V_{OS} = 2209$ m/s, b) $Capa_{petite\ élect.} = -162$, c) $V_{OD} = 14$ cm/s, d) $t_{arrivée\ 14.7\ cm} = 1.106$ [LMD, 09] 185

Figure IV. 19. Illustration de la fusion : détermination de la distribution de possibilité à partir de plusieurs observables [BRE, 09]..... 186

Figure IV. 20. Interface graphique du module Matlab [LMD, 09] 186

Figure IV. 21.Représentation 3D des distributions de possibilités et des surfaces fusionnées pour le cas de la figure Figure IV. 20 [LMD, 09] 187

Table des tableaux

CHAPITRE 1 : ETAT DE L'ART DES METHODES DE THERMOGRAPHIE INFRAROUGE : PRINCIPES ET APPLICATIONS.....	5
<i>Tableau I. 1. Propriétés thermiques de différents matériaux (d'après [DEV, 82]).....</i>	<i>11</i>
<i>Tableau I. 2. Emissivité du béton en fonction de la longueur d'onde (Source Raytek).....</i>	<i>20</i>
<i>Tableau I. 3. Synthèse des avantages et inconvénients des différents contrastes (d'après [OST, 05]).</i>	<i>39</i>
<i>Tableau I. 4. Applications, avantages et inconvénients des différentes techniques de thermographie infrarouge.....</i>	<i>47</i>
CHAPITRE 2 : ETUDES EXPERIMENTALES ET NUMERIQUES DE L'INFLUENCE DE PARAMETRES INTRINSEQUES AU MATERIAU BETON	49
<i>Tableau II. 1. Valeurs caractéristiques de la conductivité thermique des bétons (d'après [TAT, 94])... </i>	<i>52</i>
<i>Tableau II. 2. Effet du contenu en granulat, de la température et de l'état d'humidité (d'après [KIM, 03])</i>	<i>52</i>
<i>Tableau II. 3. Valeurs de conductivité thermique mesurées sur différents béton aux états sec et saturé (d'après [KHA, 02]).....</i>	<i>57</i>
<i>Tableau II. 4. Influence de la porosité et de la teneur en eau sur les propriétés thermiques du béton</i>	<i>62</i>
<i>Tableau II. 5. Composition et propriétés des dalles SENSO</i>	<i>68</i>
<i>Tableau II. 6. Variabilité des températures de surface des dalles d'une même gâchée.....</i>	<i>75</i>
<i>Tableau II. 7. Tableau récapitulatif des temps de prise des premières mesures des dalles de composition G1</i>	<i>77</i>
<i>Tableau II. 8. Valeurs des propriétés thermiques de roches utilisées comme granulats ([DEV, 82])</i>	<i>80</i>
<i>Tableau II. 9. Valeurs des différentes propriétés thermiques du béton issues de la littérature</i>	<i>80</i>
<i>Tableau II. 10. Valeurs recalculées des propriétés thermiques des différentes compositions de béton</i>	<i>81</i>
<i>Tableau II. 11. Degré de saturation réel des dalles</i>	<i>88</i>
<i>Tableau II. 12. Tableau récapitulatif des temps de prise des premières mesures de chaque série de dalle.....</i>	<i>91</i>
<i>Tableau II. 13. Valeurs recalculées des propriétés thermiques des différentes compositions de béton aux différents états de saturation.....</i>	<i>95</i>

**CHAPITRE 3 : ETUDE DE LA PRESENCE D'UN ENDOMMAGEMENT PARTICULIER DU
BETON : LA DELAMINATION..... 97**

Tableau III. 1. Tableau récapitulatif des dalles expérimentales coulées pour l'étude de l'influence de la profondeur de la délamination 111

Tableau III. 2. Tableau récapitulatif des gradients de température issus des modélisations et des mesures 130

Tableau III. 3. Tableau récapitulatif des dalles expérimentales coulées pour l'étude de l'influence du pontage des délaminations 132

Tableau III. 4. Tableau récapitulatif des résultats obtenus sur délaminations pleine et pontée..... 137

**CHAPITRE 4 : INTERET DU COUPLAGE DE DIFFERENTES TECHNIQUES DE CONTROLE
NON DESTRUCTIF : GESTION ET VALORISATION DE BASE DE DONNEES POUR
INTEGRATION A L'OUTIL DE FUSION DE DONNEES143**

Tableau IV. 1. Profondeurs carbonatées réelles de la tranche 2 155

Tableau IV. 2. Tableau récapitulatif du nombre de dalles utilisées dans la tranche 3 156

Tableau IV. 3. Seuils de sélection des critères de qualité et de pertinence des indicateurs 177

Tableau IV. 4. Observables retenus par les deux systèmes de classement 177

Tableau IV. 5. Observables retenus par seulement l'un ou l'autre des systèmes de classement..... 178

Tableau IV. 6. Nombre minimum de mesures pour l'estimation de E_{sat} à ± 500 MPa [BRE, 11¹]..... 180

Tableau IV. 7. Exemples de relation multilinéaire entre observables et indicateurs [LMD, 09]..... 182

INTRODUCTION



La deuxième partie du XX^{ème} siècle a vu l'essor industriel et économique des pays développés. Nombre d'ouvrages français ont été bâtis durant cette période de forte croissance économique. Il est courant que, par la suite, certains de ces ouvrages n'aient fait l'objet que de peu d'entretien, et le temps passant, les structures se sont dégradées. Le contexte socio-économique actuel, ralentissement de la croissance et prise de conscience environnementale, fait que de nos jours la réhabilitation des ouvrages anciens est souvent préférée à la construction de nouveaux bâtiments afin de limiter les déchets et les émissions de gaz à effet de serre... Touret [TOU, 98] a souligné l'importance de la surveillance et de la réhabilitation des ouvrages dans l'économie du BTP français, et a chiffré l'étendue du marché à près de 300 milliards de francs (soit environ 46 milliards d'euros). Un rapport plus récent du Sénat français [REI, 08], évalue à plus de 100M€/an le montant alloué par l'état pour le renforcement des seuls ouvrages d'arts du réseau national français. De plus, au niveau international, les enjeux liés à la gestion du patrimoine sont tels qu'en novembre 2010, la province du Québec a vu le dépôt d'un projet de loi¹ qui aborde cet aspect de la vie des ouvrages. Dans le corps de cette loi on retrouve des exigences pour le propriétaire, portant sur « l'application d'un programme d'entretien préventif, l'embauche de professionnels pour effectuer les inspections et la conservation de tous les rapports d'inspection et d'évaluation pendant la durée de vie du bâtiment ».

Dans ce contexte, les travaux d'entretien et de réhabilitation posent la question de la connaissance de l'état général de l'ouvrage. Cela nécessite la détection, la localisation, puis la caractérisation des défauts en termes de profondeur, d'extension, d'intensité... [LAT, 01] Le diagnostic peut être réalisé par des techniques classiques, destructives ou semi-destructives, telles que les essais d'arrachement ou le carottage (qui permet de prélever des échantillons pour les tester en laboratoire). Ce type d'essai présente l'avantage d'apporter des informations directes sur les propriétés physiques du matériau : grandeurs mécaniques ou indicateur de durabilité (résistance en compression, module d'Young, porosité, teneur en eau, ...). Il est en revanche intrusif et ne fournit que des informations ponctuelles difficilement généralisables à l'ensemble de la structure. Le contrôle non destructif (CND) ou l'évaluation non destructive (END) des ouvrages se présente comme un complément. Les techniques comme par exemple le RADAR, la résistivité électrique, ou l'impact-écho, présentent toutes, l'avantage de ne pas porter atteinte à l'intégrité de la structure. Il est donc envisageable de multiplier le nombre de points de mesure pour obtenir une vision plus globale de l'état des ouvrages et/ou de suivre son évolution. Cet avantage est toutefois souvent limité du fait de la difficulté à lier le paramètre physique mesuré à la grandeur utile à l'ingénieur en charge du re-calcul des performances de l'ouvrage. Une des voies de recherche pour améliorer les possibilités de diagnostic avec les outils de CND est la

¹ <http://www.premier.gouv.qc.ca/actualites/nouvelles/2010/novembre/2010-11-10.asp>

combinaison des résultats issus des différentes techniques. Ce travail a été récemment entrepris, notamment au travers du projet ANR SENSO, dont l'objectif était d'obtenir des valeurs quantifiées pour les indicateurs recherchés, avec un intervalle de confiance donné, en couplant différentes techniques de CND.

Parmi les différents outils de CND aujourd'hui à disposition de l'ingénieur, la thermographie infrarouge s'avère être bien adaptée. Elle est à l'heure actuelle principalement utilisée sous sa forme passive, dans le domaine du génie civil, pour détecter des anomalies thermiques. De par sa sensibilité aux variations des propriétés thermiques des matériaux, la TIR passive semble offrir des possibilités en termes de détection des variations des propriétés intrinsèques au matériau. Sa capacité à acquérir des données sans contact, sur de larges zones d'ouvrage et avec des vitesses d'acquisition permettant le grand rendement, la positionne comme l'une des mieux adaptées à l'ingénierie. La connaissance du domaine au travers de mon expérience au sein du laboratoire Exam BTP, m'a permis d'évaluer tout l'intérêt du développement de cette technique, aujourd'hui seulement utilisée dans le cadre de la détection-localisation d'anomalies (délamination, venues d'eau, etc., ...). Des résultats quantitatifs rapportés dans la littérature, issus de l'utilisation de la thermographie infrarouge active ont été obtenus pour la localisation de délaminations dans l'épaisseur du matériau. Ils nous portent à penser qu'une démarche de mesure adaptée pourrait fournir des informations quantifiées en thermographie infrarouge passive.

L'ensemble des questions évoquées sera traité dans ce manuscrit qui se découpe en quatre chapitres. La première partie du document présente la technique de thermographie infrarouge. Les facteurs influant sur la mesure sont passés en revue, et ses différents modes d'application sont expliqués. Dans la seconde partie, nous étudierons la sensibilité de la méthode aux variations de porosité ou de teneur en eau qui représentent deux facteurs d'état du matériau : ils sont à la fois liés aux conditions d'exposition et d'altération du matériau, et peuvent donc être révélateurs d'un endommagement, ou bien être des paramètres pouvant biaiser les autres investigations. La troisième partie porte sur l'étude de la détectabilité des délaminations en fonction de leur profondeur. Ces travaux adoptent une approche originale tenant compte notamment des pontages thermiques existant au sein de ces défauts. Les résultats obtenus sont issus de campagnes de mesures sur corps d'épreuve combinés à des études numériques par éléments finis. Pour finir, une méthodologie de classement et de sélection d'observables issus de différentes techniques de contrôle non destructif est présentée. Deux outils de combinaison des résultats y sont plus particulièrement considérés, conduisant à une évaluation quantitative des défauts. Pour terminer, la synthèse des travaux est réalisée, et idées de poursuites des travaux seront suggérées.

**CHAPITRE 1 : ETAT DE L'ART DES
METHODES DE THERMOGRAPHIE
INFRAROUGE : PRINCIPES ET
APPLICATIONS**

Ce premier chapitre pose les bases nécessaires à la compréhension des phénomènes mesurés en thermographie infrarouge. Un état de l'art de cette technique dans le domaine du génie civil est également présenté.

Dans un premier temps nous aborderons les notions élémentaires de transferts thermiques et les liens entre mesure par thermographie infrarouge (TIR) et température de surface d'un objet.

Dans un second temps, nous nous intéresserons aux propriétés physiques du matériau béton ayant un impact sur la répartition des températures à l'intérieur du matériau.

Pour terminer, nous évoquerons la thermographie infrarouge dans son application en tant qu'outil du contrôle non destructif des ouvrages.

L'objectif de ce chapitre est de faire un bilan sur les possibilités d'utilisation de la thermographie infrarouge passive : quels sont les paramètres influant sur la mesure, quelles applications sont faites à l'heure actuelle, quels outils de la thermographie infrarouge active pourraient être transposés à la TIR passive pour en améliorer le traitement...

I. Notions élémentaires sur les transferts thermiques

I.1. Définitions

I.1.1. Champ de température

Les transferts thermiques sont liés à l'évolution dans le temps et l'espace des valeurs de températures. Un champ de température est défini mathématiquement par l'équation [I. 1] :

$$T = f(x, y, z, t) \quad [I. 1]$$

La valeur de la température en tout point de l'espace à un temps donné est un champ scalaire dit **champ de température**. Celui-ci peut être de deux types :

- Permanent ou stationnaire. Il est indépendant du temps, on parle alors de champ de température en **régime permanent** ;
- Transitoire ou instationnaire. Il évolue avec le temps, on parle alors de champ de température en **régime transitoire**.

1.1.2. Surface isothermes

On appelle surface isotherme le lieu des points ayant, à chaque instant, la même température. En régime stationnaire les surfaces isothermes sont invariantes. En régime instationnaire elles sont essentiellement mobiles et déformables [DEV, 82].

Une surface isotherme, en un instant t_1 , satisfait à l'équation [I. 2] :

$$f(x, y, z, t_1) = t_1 \quad [I. 2]$$

Avec : t_1 Température commune à tous les points de la surface isotherme

Un point d'un milieu ne pouvant avoir qu'une seule température, les surfaces isothermes ne peuvent se couper sauf dans le cas où elles se terminent aux frontières d'un corps ou dans le cas où elles forment des surfaces fermées à l'intérieur d'un corps.

1.1.3. Gradient de température

Le gradient de température est défini comme la variation de température par unité de longueur [I. 3]. Le gradient est mesuré le long de la normale aux isothermes de température (lignes le long desquelles la température est constante) Figure I. 1.

$$\vec{\text{grad}}(T) = \vec{n} \frac{dT}{dn} \quad [I. 3]$$

Avec : \vec{n} Vecteur unitaire

$\frac{dT}{dn}$ Dérivée de la température le long de la normale

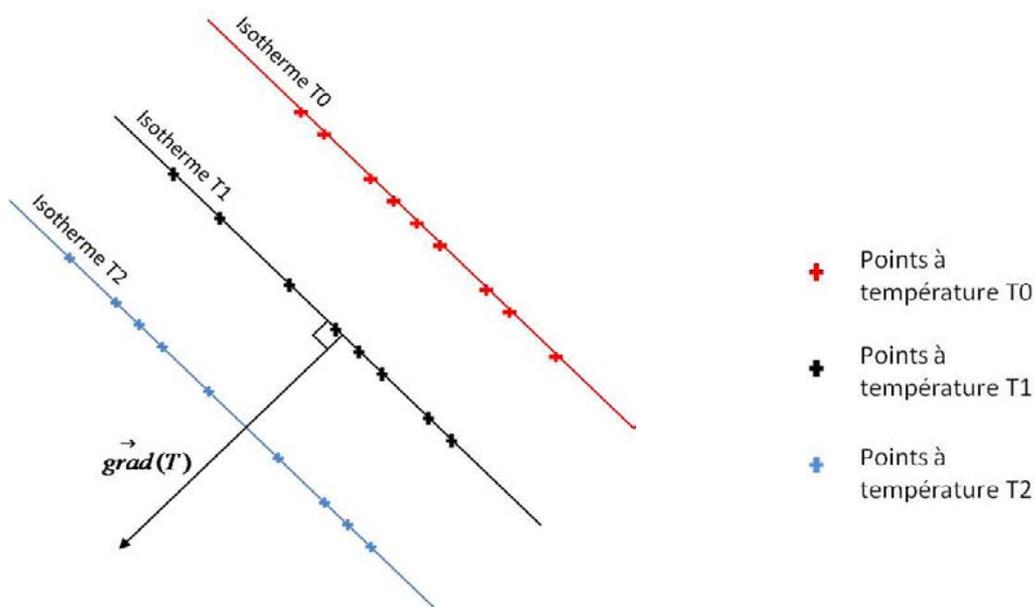


Figure I. 1. Notion de gradient dans un champ de température

1.1.4. Flux thermique et densité de flux thermique

On appelle **flux thermique** à travers une surface S la quantité de chaleur qui traverse cette surface par unité de temps [I. 4] :

$$\phi = \frac{dQ}{dt} = -\lambda \frac{dT}{dx} dS \quad [I. 4]$$

Avec :	ϕ	Flux de chaleur (W)
	dQ	Quantité de chaleur (J)
	t	Temps (s)
	λ	Conductivité thermique ($\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$)

La quantité de chaleur transmise par unité de temps et de surface est appelée **densité de flux de chaleur** [I. 5].

$$\varphi = \frac{d\phi}{dS} \quad [I. 5]$$

Avec :	φ	Densité de flux de chaleur (W.m^{-2})
	$d\phi$	Flux de chaleur (W)
	dS	Surface (m^2)

I.2. Les différents types de transfert thermique

1.2.1. Transfert thermique

Selon De Vriendt [DEV, 82] le transfert thermique entre deux corps peut être défini comme le transfert d'énergie résultant d'une différence de température entre ces deux corps. Les échanges naturels de chaleur se font des régions les plus chaudes vers les régions les plus froides.

1.2.2. Conduction

La conduction est le mode de transmission de la chaleur à l'intérieur d'un matériau homogène quelconque (solide, liquide ou gazeux) ou entre deux corps en contact physique. Ce transfert de chaleur se fait sans déplacement appréciable de matière.

La transmission de la chaleur par conduction est décrite par l'**équation de Fourier** [CAR, 59] [I. 6]:

$$\vec{\varphi}(x, y, z, t) = -\lambda \cdot \vec{\text{grad}} T(x, y, z, t) \quad [I. 6]$$

Rq : Dans cette équation le signe négatif rend compte du fait que l'énergie thermique se propage du chaud vers le froid, c'est-à-dire dans le sens opposé au gradient thermique

La conductivité thermique du matériau est le paramètre de référence dans les études de transferts de chaleur en **régime permanent**.

Dans le cadre de sollicitations thermiques quelconques, **régime transitoire**, le champ de température est solution d'une équation aux dérivées partielles appelée « **équation de la chaleur** » [1. 7].

$$\frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho.Cp} \left(\frac{\partial^2 T(x, y, z, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(x, y, z, t)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T(x, y, z, t)}{\partial z^2} \right) \quad [1. 7]$$

Avec ρ Masse volumique (kg.m^{-3})

Cp Chaleur massique ($\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$)

$\frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial t}$ Gradient de température dans le temps

$\frac{\partial^2 T(x, y, z, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(x, y, z, t)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T(x, y, z, t)}{\partial z^2}$ ou $\Delta T(x, y, z, t)$ Laplacien de la température

En régime transitoire, on introduit le terme de **diffusivité thermique** «a » en m.s^{-2} [1. 8]. Ce terme traduit la capacité du matériau à diffuser la chaleur. Elle caractérise la vitesse de propagation d'une sollicitation thermique dans un milieu donné [NEV, 00]. La conductivité et la diffusivité sont reliées par la relation suivante :

$$a = \frac{\lambda}{\rho.Cp} \quad [1. 8]$$

Avec : a Diffusivité thermique (m.s^{-2})

Vitesse de propagation de la chaleur et diffusivité thermique sont proportionnelles. La vitesse de propage d'autant plus vite que la valeur de « a » est élevée.

Le Tableau I. 1 présente les valeurs de propriétés thermiques de différents matériaux.

Tableau I. 1. Propriétés thermiques de différents matériaux (d'après [DEV, 82])

Matériau	Masse volumique (kg.m ⁻³)	Chaleur massique (J.kg ⁻¹ .K ⁻¹)	Conductivité thermique (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	Diffusivité thermique (m ² .s ⁻¹)
Béton Portland	2300	880	1.7	8,40.10 ⁻⁷
Bois (pin)	500	2720	0.13	9,56.10 ⁻⁸
Brique	1600	840	0.69	5,13.10 ⁻⁷
Acier doux (0,5C)	7860	465	54	1,48.10 ⁻⁵
Laine de verre	200	670	670	2,99.10 ⁻⁷
Roche calcaire	2300	900	900	5,31.10 ⁻⁷
Or	19300	129	317	1,27.10 ⁻⁴
Eau	1000	4186	0.597	1,42.10 ⁻⁷
Air	1	1005	0.026	2,56.10 ⁻⁵

1.2.3. Convection

A l'intérieur d'un fluide ou à la surface fluide/paroi, les transferts de chaleur se font par convection. Contrairement aux échanges par conduction, les échanges par convection nécessitent un déplacement de matière.

On distingue deux types de convection :

- La **convection libre** pour laquelle le transfert de chaleur est induit par des variations de densité du fluide associées aux variations de température. La différence de densité crée un écoulement descendant du fluide le plus froid (plus lourd) et ascendant du fluide le plus chaud (plus léger).
- La **convection forcée** pour laquelle les mouvements du fluide sont imposés par une source externe de mouvement ex : ventilateur.

L'échange de chaleur par convection entre un fluide et une surface est régi par la **loi de Newton** [SAC, 82] [I. 9].

$$q_c = h_c \cdot (T - T_a) \quad [I. 9]$$

Avec	q_c	Densité de flux de chaleur convective (W.m ⁻²)
	h_c	Coefficient d'échange par convection (W.m ⁻² .K ⁻¹)
	T	Température du matériau (K)
	T_a	Température de l'air « au large »(K)

Le coefficient d'échange par convection h_c n'est pas constant, il varie de point en point de la surface [DEV, 82]. Il dépend principalement de :

- l'état de surface et de la géométrie du système,
- la vitesse vectorielle du fluide au voisinage de la paroi,
- des propriétés physiques du fluide,
- dans certains cas de la différence de température ($T-T_a$).

h_c est une grandeur globale que l'on considèrera le plus souvent comme une constante.

1.2.4. Rayonnement

Le rayonnement est un mode de transmission de la chaleur ne nécessitant aucun support physique. L'écoulement de chaleur par rayonnement se fait à travers un milieu transparent (air ou vide). Il s'agit d'un rayonnement électromagnétique émis par la matière spontanément et en continu dès lors que sa température est supérieure au zéro absolu (-273,15°C). Le rayonnement est régi par la **loi de Stefan-Boltzmann** [1. 10] :

$$q_r = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad [1. 10]$$

Avec	q_r	Densité de flux de chaleur radiante ($W \cdot m^{-2}$)
	ε	Emissivité du matériau
	σ	Constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 \cdot 10^{-8} W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$)
	T	Température du matériau (°K)

II. Introduction générale sur la thermographie infrarouge

C'est en étudiant le spectre solaire que William Herschel découvrit en 1800 l'existence du rayonnement infrarouge qu'il nomma « chaleur radiative ».

Afin de déterminer si toutes les couleurs qui forment la lumière solaire apportent la même quantité de chaleur, Herschel utilisa un prisme de verre pour diffracter la lumière du Soleil (Figure I. 2). Il mesura la température associée à chacune des couleurs prismatiques en déplaçant son thermomètre du bleu au rouge. Il nota que la température augmentait régulièrement dans le spectre du visible. Il déplaça alors encore son thermomètre afin de mesurer la température de la pièce et à sa surprise la température continua d'augmenter. Herschel venait de détecter pour la première fois le rayonnement infrarouge émis par le Soleil.

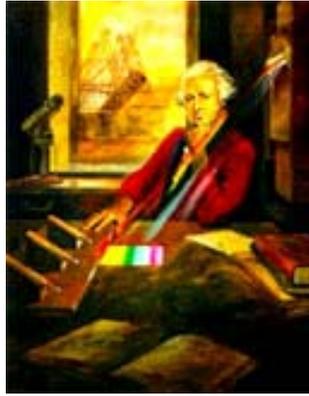


Figure I. 2. Principe de l'expérience de Herschel pour détecter l'infrarouge
(http://www.herschel.fr/fr/herschel/pourquoi_herschel.php)

Depuis leur découverte par Herschel, les longueurs d'onde de l'infrarouge ont été grandement exploitées et servent dans la vie de tous les jours (exemple : fonctionnement des télécommandes).

II.1. Origine et nature du rayonnement infrarouge

Tout corps ayant une température supérieure au zéro absolu ($-273,15^{\circ}\text{C}$) émet en permanence de l'énergie sous forme de **rayonnement électromagnétique**. Suivant leur longueur d'onde, les rayonnements électromagnétiques sont nommés selon la nomenclature définie sur la Figure I. 3. Le rayonnement émis dans la bande spectrale $0,75\text{-}1000\ \mu\text{m}$ est appelé rayonnement infrarouge.

Des détecteurs spécifiques permettent de capter ce signal dans certaines longueurs d'onde et de le retranscrire en valeurs de luminance liées à la température de surface de l'objet.

II.1.1. Définition

La norme AFNOR définit la thermographie infrarouge comme une « *technique permettant d'obtenir, au moyen d'un appareillage approprié, l'image thermique d'une scène thermique observée dans un domaine spectral de l'infrarouge* » [AFN, 87].

II.1.2. Le spectre infrarouge

Le spectre infrarouge correspond au domaine d'émission de la matière dont les températures sont celles trouvées à la surface de la Terre. Celui-ci se divise en trois parties (Figure I. 3) selon les capteurs utilisables pour les déceler [GAU, 84] :

- de $0,75$ à $1,5\ \mu\text{m}$ l'**infrarouge proche** décelé par les émulsions photographiques spécialisées (jusqu'à $1\ \mu\text{m}$), par les cellules photoémissives et par des détecteurs photoconducteurs et photovoltaïques,

- de 1,5 à 20 μm l'**infrarouge moyen** décelé par les détecteurs thermiques, photoconducteurs, photovoltaïques,
- de 20 à 1000 μm l'**infrarouge lointain** décelé uniquement par les détecteurs thermiques.

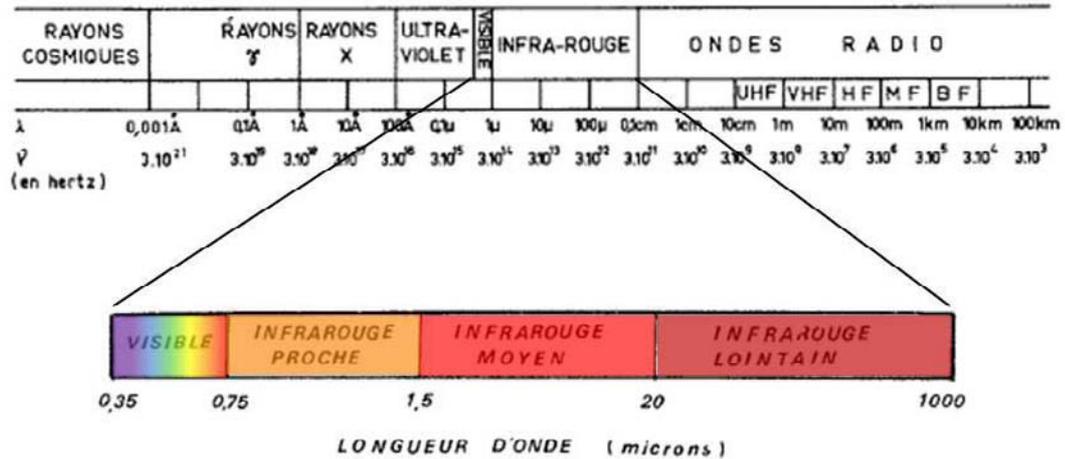


Figure I. 3. Nomenclature des ondes électromagnétiques [GAU, 84]

II.2.Principes physiques de la thermographie

II.2.1. Transfert d'énergie par rayonnement

II.2.1.1. Cas d'un corps commun

Pour un corps commun, le mécanisme de transfert d'énergie fait intervenir 4 phénomènes (Figure I. 4) :

- l'**émission** : le corps produit de la chaleur qui est transférée au milieu extérieur sous forme de rayonnement électromagnétique (R.E.M.) ;
- la **transmission** : le matériau peut transmettre tout ou une partie du R.E.M. incident ;
- la **réflexion** : la surface du matériau renvoie vers le milieu extérieur une partie du R.E.M. incident ;
- l'**absorption** : le corps récupère le R.E.M. incident pour le transformer en énergie calorifique.

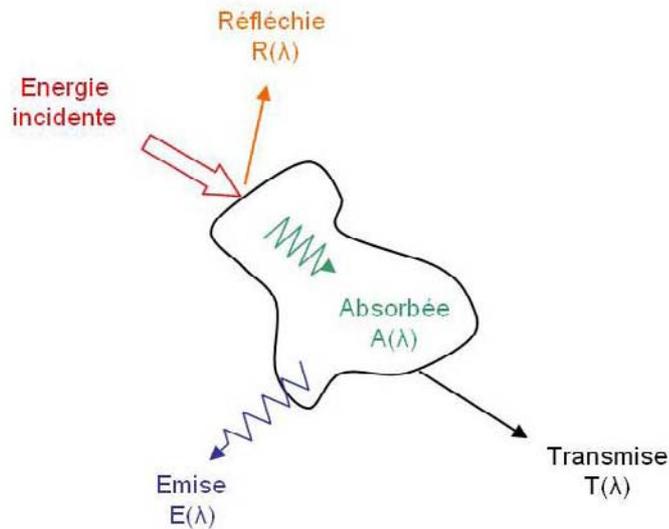


Figure I. 4. Transfert d'énergie entre rayonnement et corps commun

Suivant le **principe de conservation de l'énergie**, le bilan énergétique de ces différents flux est le suivant :

$$\phi_i = \phi_R + \phi_A + \phi_T \quad [I. 11]$$

Avec	ϕ_i	Flux incident
	ϕ_R	Flux réfléchi
	ϕ_A	Flux absorbé
	ϕ_T	Flux transmis

Parmi les quatre phénomènes décrits ci-dessus, certains peuvent ne pas se produire.

II.2.1.2. Cas du corps noir

Le corps noir est un **milieu idéal** qui absorbe toute l'énergie incidente et émet la même quantité d'énergie (Loi de Kirchhoff). Il ne réfléchit ni ne transmet d'énergie au milieu.

II.2.1.1. Cas des gaz

Le gaz est un milieu **transparent** ou **semi-transparent** ne réfléchissant pratiquement pas mais qui absorbe et transmet le rayonnement incident.

II.2.1.2. Cas du béton

Le béton se comporte comme un **corps opaque** c'est-à-dire que son pouvoir de transmission est nul. Le R.E.M. que l'on enregistre grâce à la caméra est donc une composée de l'énergie propre émise par l'objet et de l'énergie réfléchi à sa surface.

II.2.2. Lois fondamentales du rayonnement thermique

II.2.2.1. Luminance

La luminance L ($\text{W.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}$) est la densité de puissance radiative totale $d^2\phi$ émise par une surface élémentaire dS' , sous un angle solide $d\omega$ dont la normale n' forme un angle β avec la normale n de la surface émettrice dS :

$$L = \frac{d^2\phi}{d\omega.dS.\cos\beta} \quad [I. 12]$$

Un instrument de mesure ne capte cette luminance que sur une bande spectrale donnée. La luminance ainsi mesurée est la luminance spectrale directionnelle ($\text{W.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}.\mu\text{m}^{-1}$) :

$$L_\lambda = \frac{d^2\phi}{d\omega.dS.\cos\beta.d\lambda} \quad [I. 13]$$

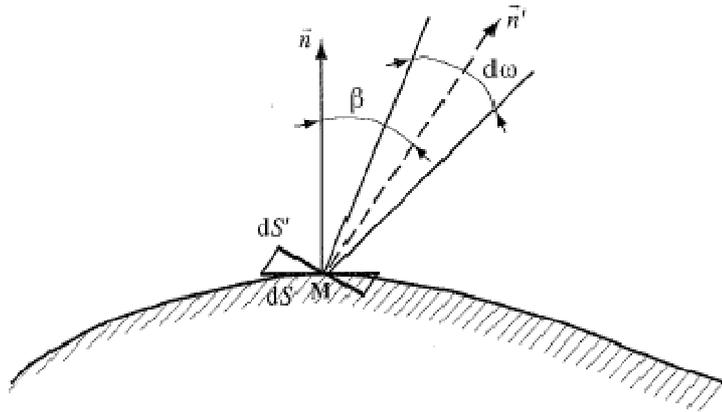


Figure I. 5. Définition géométrique des valeurs nécessaires à la définition de la luminance [BIA, 04]

II.2.2.2. Emittance

La quantité de flux de rayonnement émise par une surface élémentaire dS dans la demi-sphère limitée par son plan tangent traduit l'émittance hémisphérique totale E (W.m^{-2}). Celle-ci représente la densité de puissance totale émise par dS dans toutes les directions.

$$E = \frac{d^2\phi}{dS} = \int_{1/2\text{espace}} L.\cos\beta.d\omega \quad [I. 14]$$

De même que pour la luminance, il est possible de calculer l'émittance spectrale ($\text{W.m}^{-2}.\mu\text{m}^{-1}$) :

$$E_{\lambda} = \frac{d^2\phi}{dS.d\lambda} = \int_{1/2\text{espace}} L_{\lambda} \cdot \cos \beta . d\varpi \quad [I. 15]$$

II.2.2.3. Propriétés du corps noir

II.2.2.3.1. Loi de Planck

Un corps noir émet, une énergie sous forme de rayonnement, dans toutes les directions de l'espace et dans tout le spectre de longueur d'onde. L'énergie émise est caractérisée par une distribution spectrale régie par la loi de Planck (Figure I. 6). Cette loi décrit la courbe de variation d'énergie pour une longueur d'onde et une température donnée [GAU, 84] :

$$E_{\lambda}^0 = \frac{2.\pi.h.c^2.\lambda^{-5}}{e^{\frac{h.c}{\lambda TK}} - 1} \quad [I. 16]$$

Avec	E_{λ}^0	Emittance spectrale du corps noir ($\text{W.m}^{-2}.\mu\text{m}^{-1}$)
	h	Constante de Planck ($6,6256.10^{-34}$ J.s)
	c	Célérité de la lumière ($2,998.10^8$ m.s ⁻¹)
	λ	Longueur d'onde (m)
	T	Température (K)
	K	Constante de Boltzmann ($1,38054.10^{-23}$ J.K ⁻¹)

Rq : le symbole ⁰ indique qu'il s'agit d'une propriété du corps noir

Caractéristiques propres au rayonnement d'énergie (Figure I. 6) :

- Pour une longueur d'onde donnée la puissance émise décroît avec la température ;
- La fonction $E_{\lambda}(\lambda)$ admet un maximum pour une longueur d'onde λ_{max} ;
- La valeur de λ_{max} varie avec la température T, elle se déplace vers les courtes longueurs d'onde lorsque la température augmente.

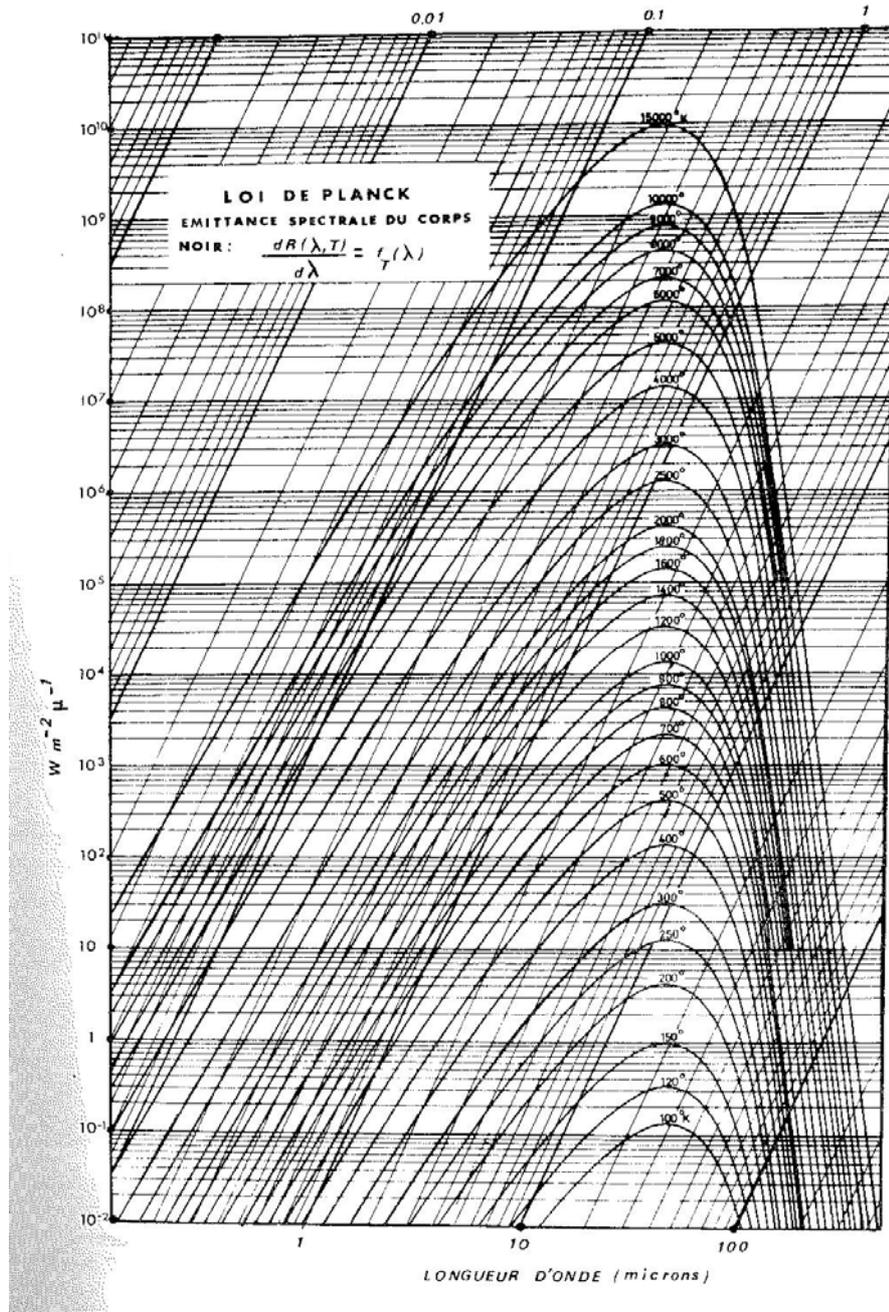


Figure 1. 6. Distribution spectrale du corps noir [GAU, 84]

Pour des températures « ordinaires », classiquement rencontrées sur la terre, le maximum de rayonnement est concentré entre 8 et 15 μm . Par conséquent, en contrôle non destructif la bande spectrale utilisée est l'infrarouge moyen, soit entre 2 et 15 μm [PAJ, 89].

D'après la loi de Planck, l'émission du corps noir est isotrope, c'est-à-dire indépendante de la direction ou de l'angle d'émission. Cette propriété appelée loi de Lambert permet de définir l'émittance comme :

$$E_{\lambda}^0 = \pi \cdot L_{\lambda}^0 \quad [1. 17]$$

II.2.2.3.2. Loi de Stefan-Boltzmann

L'intégration de l'émittance spectrale du corps noir sur tout le spectre donne l'émittance totale ou densité de puissance totale E^0 (W.m^{-2}) à la température T de la surface du corps :

$$E^0 = \int_0^{\infty} E_{\lambda}^0(\lambda, T) d\lambda = \sigma.T^4 \quad [I. 18]$$

Avec E^0 Emittance totale du corps noir (W.m^{-2})

σ Constante de Stefan-Boltzmann ($5,6696.10^{-8} \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$)

On a donc la luminance totale ($\text{W.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}$) :

$$L^0 = \int_0^{\infty} L_{\lambda}^0(\lambda, T) d\lambda = \frac{\sigma}{\pi}.T^4 \quad [I. 19]$$

II.2.2.4. Émissivité du matériau

L'**émissivité** ε est une propriété des surfaces qui traduit la capacité des matériaux à émettre de l'énergie. Elle est définie comme le rapport entre l'énergie rayonnée par un matériau à la température T et l'énergie rayonnée par un corps noir (corps idéal §II.2.1.2) à la même température. Les valeurs d'émissivité varient entre 0 (réflecteur parfait – miroir) et 1 (émetteur parfait – corps noir) car un corps réel émet toujours un flux inférieur à celui d'un corps noir à la même température.

On appelle émissivité spectrale le rapport entre la luminance spectrale d'un corps réel et la luminance spectrale d'un corps noir :

$$\varepsilon_{\lambda} = \frac{L_{\lambda}}{L_{\lambda}^0} \quad [I. 20]$$

L'émissivité prend des valeurs variables selon le matériau et varie pour un même matériau en fonction de :

- **l'état de surface** du matériau : une surface rugueuse ou oxydée aura une émissivité plus importante qu'une surface lisse (effet de miroir et donc apparition de réflexion en surface) ;
- **l'angle d'incidence** de la caméra : l'émissivité est maximale pour une incidence normale (0°) et diminue très fortement pour une incidence supérieure à 55° (Figure I. 7), on s'applique donc à maintenir un angle d'incidence élevé.

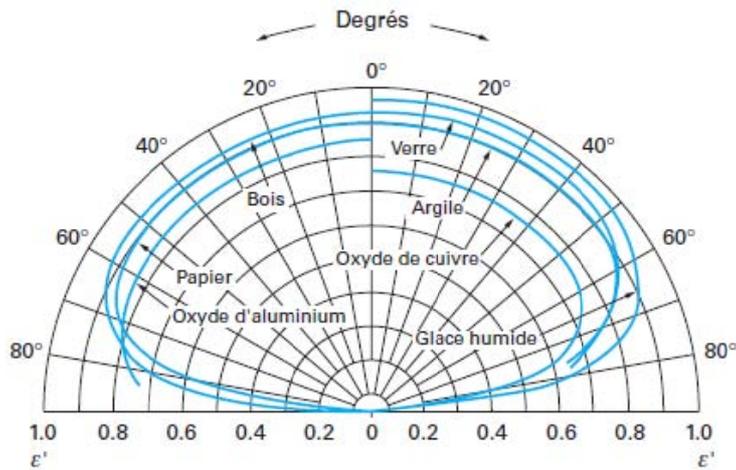


Figure 1. 7. Influence de l'angle d'incidence sur l'émissivité totale directionnelle [MAT,05]

La plupart des objets sont assimilables à des corps **lambertiens** (corps émettant la même énergie dans toutes les directions : émission homogène et isotrope) pour des incidences n'excédant pas 55° [GAU, 84].

- la **longueur d'onde** : l'émissivité spectrale varie, relativement lentement, avec la longueur d'onde pour les objets solides [GAU, 84]. Un corps pour lequel l'émissivité ne varie pas avec la longueur d'onde est appelé **corps gris**. A l'inverse, un corps dont l'émissivité varie avec la longueur d'onde est appelé **corps sélectif** [PAJ, 89]. Malgré tout, un corps sélectif peut se comporter en corps gris ou même en corps noir pour une bande spectrale donnée.

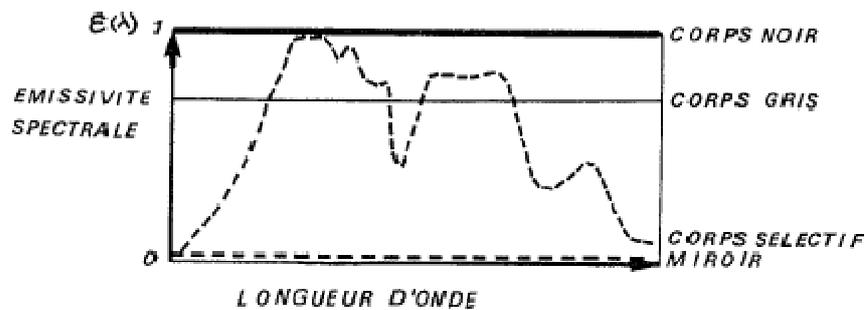


Figure 1. 8. Emissivité spectrale des différents types de corps [GAU, 84]

L'émissivité du béton évolue entre 0,65 et 0,95 (Tableau I. 2)

Tableau I. 2. Emissivité du béton en fonction de la longueur d'onde (Source Raytek²)

Longueur d'onde	1,0 μm	5,0 μm	7,9 μm	8-14 μm
Emissivité	0,65	0,9	0,95	0,95

² Valeurs d'émissivité données par le groupe Fluke

Dans la bande spectrale de mesure (pour notre caméra : bande 7-13 μ m) nous pouvons donc considérer le béton comme un corps gris d'émissivité 0,95 ;

- la **température du matériau** : l'émissivité varie lentement en fonction de la température. Cette variation est due aux modifications d'état de surface induites par les changements de température. Les matériaux autres que les métaux ont des émissivités élevées dont les valeurs ont tendance à diminuer avec la température [GAU, 84]. Nous faisons l'hypothèse que l'émissivité du matériau est constante sur les gammes de températures intéressant nos mesures.

A partir de l'équation [I. 20] on peut définir la luminance spectrale d'un corps réel comme :

$$L_{\lambda} = \varepsilon_{\lambda} \cdot L_{\lambda}^0 \quad [I. 21]$$

Les appareils de mesure infrarouge enregistrent la luminance spectrale d'une surface. Il est alors possible en connaissant la valeur d'émissivité du matériau de remonter à sa température de surface.

II.2.3. Principe de la mesure de température

La mesure du rayonnement infrarouge s'effectue au moyen d'une caméra de thermographie infrarouge, appareil de mesure ayant pour fonction de transcrire les rayonnements infrarouges émis par la surface d'un objet en températures et permettant la visualisation de la scène thermique visée sous forme de thermogrammes [PAJ, 89].

La caméra infrarouge que nous avons utilisée se compose d'une matrice de détecteurs qui reçoit le rayonnement émis par une petite surface de l'objet étudié, dans une direction donnée et pour une plage de longueur d'onde donnée.

Idéalement, tous les rayonnements reçus par la caméra proviennent de l'objet étudié. Dans la réalité, le capteur perçoit une luminance composée de trois parties : le rayonnement émis par l'objet, le rayonnement émis par l'environnement et réfléchi par la surface de l'objet et une troisième partie influencée par l'interaction de l'atmosphère, présente entre la surface de l'objet et le détecteur, avec le rayonnement (Figure I. 9).

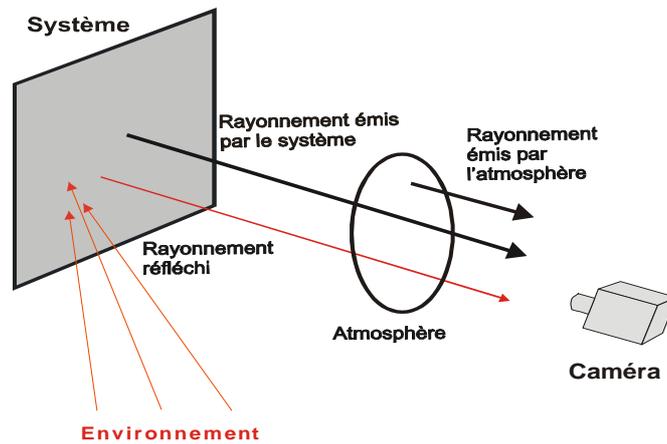


Figure I. 9. Composition du rayonnement reçu par un capteur thermique ([SIR, 05] d'après [WIL, 88])

La luminance reçue par la caméra peut être décomposée comme il suit [SIR, 05] :

$$L' = \tau_{atm} \left[\underbrace{\underbrace{\varepsilon \cdot L_0}_{\text{flux émis par l'objet}} + \underbrace{(1 - \varepsilon)L_e}_{\text{flux réfléchi par l'objet}}}_{\text{flux transmis au travers de l'atmosphère}} \right] + \underbrace{(1 - \tau_{atm})L_{atm}}_{\text{flux émis par l'atmosphère}} \quad [I. 22]$$

Avec	L'	Luminance perçue par la caméra ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$)
	L_0	Luminance propre de l'objet ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$)
	L_e	Luminance de l'environnement ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$)
	L_{atm}	Luminance de l'atmosphère ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$)
	ε	Emissivité de l'objet
	τ_{atm}	Coefficient de transmission de l'atmosphère

L'utilisation de cette équation nécessite de poser plusieurs hypothèses [HAM, 91] :

- la température T_0 de l'objet est constante sur chaque surface élémentaire de mesure ;
- l'environnement est assimilé à un émetteur parfait à une température uniforme T_e ;
- l'objet étudié se comporte comme un **corps gris** c'est-à-dire qu'il a une émissivité constante sur la bande spectrale utilisée.

Cette équation dite « **équation radiométrique** » permet alors de transcrire les valeurs de températures apparentes mesurées en valeurs de températures vraies.

II.2.4. Paramètres influençant la mesure

II.2.4.1. Émissivité du matériau

Les paramètres influençant l'émissivité du matériau, et donc indirectement la mesure, ont été présentés précédemment (§II.2.2.4)

Afin d'augmenter le pouvoir émissif des matériaux, on peut recouvrir leur surface d'une couche de peinture noire à haute émissivité. On s'affranchit ainsi de la plus grande partie des effets de réflexion.

En raison de la nature même des objets auscultés en génie civil, bâtiments composés de plusieurs types de matériaux, des variations d'émissivité peuvent exister sur une même scène thermique. Ces variations d'émissivité peuvent rendre l'interprétation des thermogrammes délicate.

II.2.4.2. Conditions environnementales

Les conditions environnementales ont des influences variables selon la nature des anomalies recherchées.

Le **vent**, en créant des phénomènes de convection en surface des objets, permet l'augmentation des transferts de chaleurs entre surface des objets et air. Si les pertes de chaleur par convection sont trop importantes, cela peut réduire la température de surface [BAL, 02]. L'ASTM D 4788-88 [AST, 01] recommande de ne pas réaliser de mesure pour un vent supérieur à 15 km/h.

De même, la présence de **pluie** perturbe la mesure de la température de surface des objets, d'une part car elle a généralement une température différente de celle du matériau, et d'autre part car elle entraîne par son évaporation un refroidissement des objets [CLA, 03].

II.2.4.3. Distance surface de l'objet-objectif caméra : influence de l'atmosphère

L'atmosphère n'est pas un milieu transparent inerte. Situé entre la scène thermique à analyser et la caméra, c'est un milieu semi-transparent à l'origine de perturbations [I. 22] [HAM, 91]. En effet, les molécules d'eau et de gaz carbonique contenues dans l'atmosphère absorbent et émettent des rayonnements électromagnétiques. Lorsque la distance surface de l'objet – objectif de la caméra devient trop importante, la présence de l'atmosphère peut biaiser les valeurs de température mesurées.

L'interaction rayonnement - atmosphère se situe à trois niveaux [CAN, 91] :

- L'absorption et la diffusion par les particules atmosphériques provoquent une atténuation du flux transmis par dissipation de l'énergie ;
- L'émission par thermorayonnance sélective des constituants de l'atmosphère, ou réflexion diffuse sur les particules, entraîne un flux émis (L_{atm} [I. 22]) qui se superpose à celui de la cible. L'influence de cette émission sur la mesure, effectuée par la caméra, dépend de l'épaisseur atmosphérique (grandeur d'influence pour les mesures à longue distance) ;
- Les mouvements de l'air entraînent des variations locales de température, de pression et d'humidité, provoquant des fluctuations de l'indice de réfraction de l'atmosphère. Cette turbulence atmosphérique déforme le front d'onde et infléchit la trajectoire des rayons énergétiques.

L'intensité de la transmission atmosphérique varie selon la longueur d'onde et il existe des fenêtres, 3-5 μm et 8-14 μm , pour lesquelles la transmission atmosphérique est importante (Figure I. 10). On appelle ces fenêtres « **fenêtres de transmission atmosphérique** ». Même si pour ces fenêtres le facteur de transmission est très élevé, il n'est pas nécessairement égal à 1. Le facteur de transmission diminue avec l'augmentation de l'épaisseur d'atmosphère entre l'objet d'étude et l'instrument de mesure (Figure I. 11). Néanmoins, dans de nombreuses applications pour lesquelles la distance entre la surface de l'objet et le détecteur est courte (inférieure à 10 m), l'absorption atmosphérique peut être considérée comme négligeable et donc le facteur de transmission pris égal à 1.

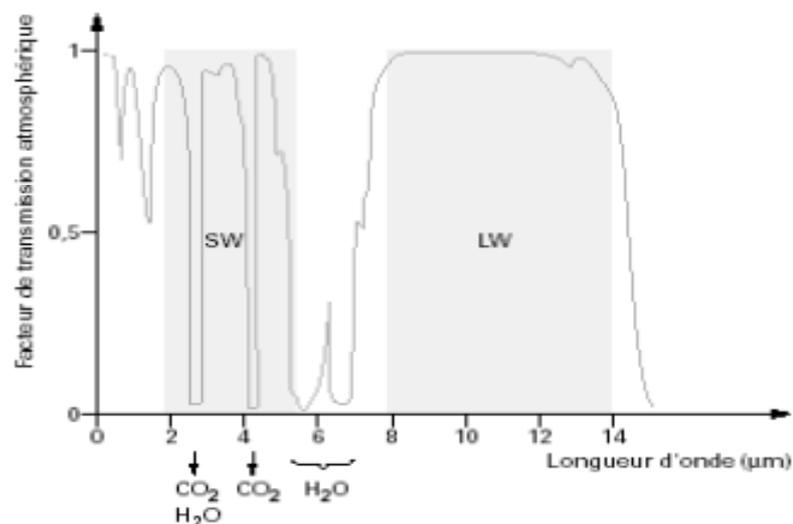


Figure I. 10. Influence de la longueur d'onde sur la transmission atmosphérique (d'après [GAU, 84])

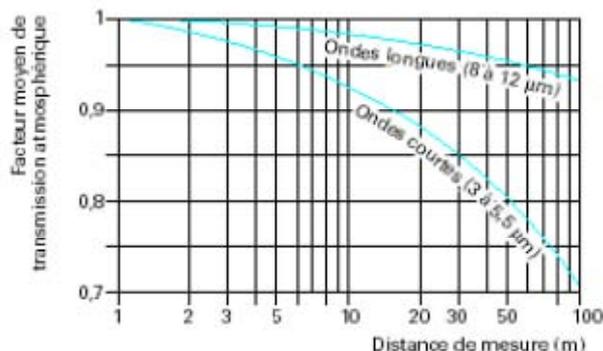


Figure I. 11. Facteur moyen de transmission atmosphérique en fonction de la distance et de la fenêtre d'observation [CAR, 06]

De manière plus générale, les courtes et moyennes longueurs d'onde sont plus sensibles aux hautes températures alors que les grandes longueurs d'onde sont plus sensibles aux basses températures [THO, 99]. La bande 8-13 μm sera préférée pour les détecteurs thermiques à haute performance du fait de leur plus grande sensibilité aux objets ayant une température proche de la température ambiante et de leur bonne transmission à travers la fumée. La bande spectrale 3-5 μm est plus appropriée aux objets ayant une température élevée ou lorsque la sensibilité est moins importante que le contraste [BAL, 02].

De plus, la taille du plus petit défaut observable diminue avec la distance [BAL, 02]. Si la scène thermique à observer est de grande taille, il sera nécessaire de faire un compromis entre finesse de détection et temps de mesure.

II.2.4.4. Teneur en eau du matériau

La présence d'humidité dans les matériaux poreux (remontée d'eau par capillarité) joue de plusieurs façons. D'une part elle entraîne des variations d'émissivité du matériau [AVD, 03³] et a donc une influence directe sur la mesure, mais elle joue également par son influence sur les propriétés thermiques des matériaux :

- la conductivité thermique augmente avec l'humidité du matériau [KHA, 02].
- la chaleur spécifique de l'eau est approximativement 5 fois plus élevée que celle d'un matériau poreux [AVD, 03²]. Cela signifie que les variations de températures s'effectueront plus lentement dans une zone contaminée par de l'eau.

II.2.4.5. Variation de couleur

Couleur du matériau et émissivité sont intimement liées. Un matériau foncé a une émissivité plus forte que le même matériau clair. Des variations de températures apparentes apparaîtront donc sur les thermogrammes sans nécessairement révéler un changement de température du matériau [BAR, 07].

II.3. Définition d'une anomalie en TIR

En thermographie infrarouge, on s'intéresse au champ de température obtenu par la mesure du rayonnement émis par la surface d'un objet. Seront considérés comme des anomalies toutes zones au niveau desquelles la température de surface diffère de celle des zones périphériques, alors considérées comme possédant la température de référence. On peut distinguer deux grands types de causes de variation de la température de surface :

- Les sources ou pompes de chaleur qui génèrent ou absorbent un flux de chaleur en propre. Ces anomalies thermiques sont aisément identifiables car elles possèdent une température différente de celles de leur milieu environnant. On peut citer quelques exemples de défauts de ce type : un plancher chauffant en fonctionnement à l'intérieur d'une dalle béton, un échauffement dû à une surchauffe électrique, un flux d'effluent relâché en pleine mer par un navire..., soit tout élément dégageant de la chaleur hors d'un contexte habituel.
- Le second type d'anomalie thermique est plus difficile à identifier car il nécessite un stimulus thermique. Les éléments dont les propriétés thermiques, chaleur spécifique et/ou de conductivité thermique, diffèrent de celles du milieu de référence entraînent des modifications locales des flux de chaleur imposés. Ces défauts apparaîtront alors en surface comme des zones ayant des températures différentes du milieu les environnant. On classe dans ce type de défaut les délaminations, les fissures, les vides, les ponts thermiques...

Une anomalie thermique de type 1 sera détectable dès que le contraste de température, entre elle et le milieu environnant, sera supérieur à la résolution thermique du capteur.

La détection d'une anomalie de type 2 est soumise à quatre conditions [SIR, 05] :

- Le contraste entre les propriétés thermophysiques de l'anomalie et du matériau sain doit être suffisamment important ;
- La sollicitation thermique doit avoir une amplitude suffisante pour que l'effet produit en surface par l'anomalie soit détectable ;
- Le rapport entre la taille du défaut et sa profondeur doit être suffisamment important. A défaut, la chaleur va « contourner » le défaut et son influence sur le champ de température en surface sera limitée ;
- Le défaut doit se trouver à une profondeur inférieure à trois fois la profondeur de pénétration des ondes thermique p ([I. 23]) pour être détecté.

$$p = \sqrt{\frac{a}{\pi \cdot f}} \quad [I. 23]$$

Avec : p Profondeur de pénétration des ondes ou épaisseur de peau (m)
 f Fréquence de sollicitation (Hz)

III. Propriétés thermiques du matériau béton

III.1. Conductivité thermique

La conductivité thermique λ caractérise l'aptitude d'un matériau à laisser passer la chaleur. Elle se définit comme le flux de chaleur qui traverse une surface unitaire quand le gradient de température est égal à l'unité [DEV, 82]. Elle s'exprime en $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$.

D'un point de vue thermique, les bétons sont des corps hétérogènes. Missenard [MIS, 65] a montré que la conductivité thermique d'un béton, dépend essentiellement de :

- la conductivité thermique du ciment,
- le dosage en ciment (rapport e/c),
- la conductivité thermique et la taille des granulats,
- la compacité du béton final.

De manière générale, la conductivité thermique d'un béton augmente avec la teneur en eau.

Pour les bétons traditionnels de masse volumique comprise entre 2200 et $2400 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ on a un λ_u (λ utile correspondant à un taux d'humidité interne moyenne de 4%) de $1,5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ [DRE, 95]. Neuville [NEV, 00] définit une gamme de variation plus large allant de $1,5$ à $3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$.

III.2. Chaleur massique et capacité calorifique volumique

III.2.1. Chaleur massique

La chaleur massique (ou chaleur spécifique ou capacité thermique massique) C_p représente la quantité d'énergie nécessaire pour élever, sous pression atmosphérique normale, 1 kg de corps, de 1°C , sans que celui-ci ne subisse de changement d'état. L'unité de la chaleur massique est le $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$.

La chaleur massique d'un béton est liée à la nature des granulats ainsi qu'à sa teneur en eau et à sa masse volumique.

Pour les bétons traditionnels, la chaleur massique varie entre 840 et 1170 J.kg⁻¹.K⁻¹[NEV, 00].

III.2.2. Capacité calorifique volumique

La capacité calorifique volumique C_v représente l'aptitude d'un matériau à stocker de la chaleur. Elle s'exprime par le produit de la masse volumique d'un corps par sa chaleur spécifique en J.m⁻³.K⁻¹ [I. 24].

$$C_v = \rho.C_p \quad [I. 24]$$

La capacité calorifique d'un matériau de composition hétérogène est obtenue en additionnant les capacités calorifiques des différents constituants pondérés par leur fraction volumique : pour le matériau béton, la capacité calorifique prend en compte les capacités calorifiques du ciment, des granulats, de l'eau éventuellement présente, et de l'air.

III.3. Diffusivité thermique

La diffusivité thermique caractérise la facilité avec laquelle un matériau atteint l'équilibre thermique avec son environnement c'est à dire l'aptitude du matériau à diffuser la chaleur. Plus la diffusivité thermique est élevée, plus les échanges thermiques sont rapides entre matériaux [BAR, 07]. La propagation de la chaleur est d'autant plus rapide que la conductivité du matériau est forte et que sa capacité calorifique volumique est faible.

La diffusivité thermique décroît avec la porosité et croît avec les faibles teneurs en eau. En effet, les variations de conductivité d'un matériau poreux peu humide sont plus importantes que celle affectant la capacité thermique. A l'inverse, la diffusivité décroît pour les teneurs en eau élevée car la capacité thermique augmente plus rapidement que la conductivité [MAJ, 90].

Pour un béton ordinaire, la diffusivité thermique varie de 1.67.10⁻⁶ à 5.56.10⁻⁷ m².s⁻¹ selon Neville [NEV, 00].

III.4. Effusivité

L'effusivité thermique traduit la capacité du matériau à absorber et stocker de la chaleur. Plus sa valeur est élevée, plus la capacité de stockage d'énergie est grande et plus il faut de temps pour atteindre l'équilibre thermique [BAR, 07].

Le calcul de l'effusivité se fait par l'équation [I. 25] :

$$e = \sqrt{\lambda \cdot \rho \cdot C_p} \quad [I. 25]$$

Pour le béton, la valeur de l'effusivité est d'environ $2800 \text{ J.m}^{-2}.\text{s}^{-1/2}.\text{K}^{-1}$ [NEV, 00].

III.5. Inertie thermique

L'inertie thermique est la prédisposition d'un matériau à conserver sa température initiale lorsqu' intervient une perturbation de son équilibre thermique. L'inertie thermique traduit la "lenteur" avec laquelle le matériau atteint un nouvel équilibre.

- Si le matériau est très inerte, il atteindra cet équilibre au bout d'un temps long.
- Si le matériau est peu inerte, il attendra cet équilibre au bout d'un temps bref.

L'inertie thermique est essentiellement caractérisée par :

- la diffusivité thermique « a » du matériau ;
- l'épaisseur « d » du matériau considéré. En réalité, le temps caractéristique associé à l'inertie thermique dépend de ces deux paramètres, puisqu'il est de l'ordre de $\frac{d^2}{a}$
- l'effusivité thermique.

Globalement, plus les matériaux sont denses et plus ils sont inertes.

IV. La thermographie infrarouge outil du contrôle non destructif dans la construction

La thermographie infrarouge est actuellement utilisée sous deux formes :

- Une première forme dite « passive » pour laquelle on mesure des contrastes de température naturellement présents dans le matériau ou induits par des sollicitations naturelles (soleil, température de l'air...);
- Une seconde forme dite « active » avec laquelle on mesure des contrastes de températures induit par la stimulation artificielle du spécimen à analyser.

Les deux formes de thermographie sont employées mais chacune dans des domaines d'applications différents. Cette partie présente les deux approches, leurs applications actuelles ainsi que leurs avantages et limites.

IV.1. Thermographie infrarouge passive

IV.1.1. Méthode

La thermographie infrarouge passive est simple à mettre en place. Le dispositif de mesure se compose essentiellement d'une caméra infrarouge qui permet de visionner (et, selon le type de caméra d'enregistrer) les rayonnements émis par la surface sous auscultation, et optionnellement d'un ordinateur pour l'enregistrement et le post-traitement des thermogrammes (Figure I. 12).

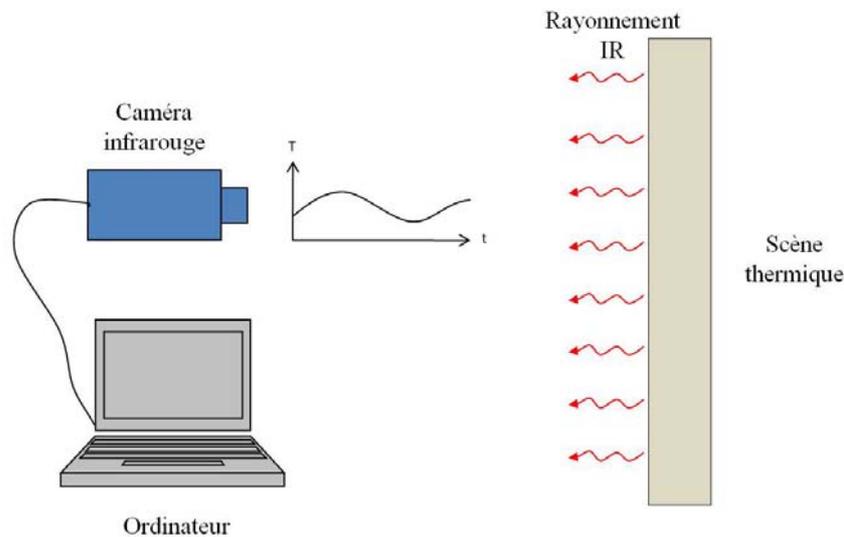


Figure I. 12. Dispositif de mesure en thermographie infrarouge passive

La caméra permet de visionner la scène thermique dans le spectre infrarouge. Par un rapide traitement, les cartes de luminance sont transformées en carte de températures apparentes. Une image de l'objet sous contrôle est enregistrée et traitée par la caméra afin d'obtenir le thermogramme de la scène thermique.

Selon le type d'anomalie recherchée, le protocole de mesure diffère. Si l'on recherche des anomalies du premier type, une image à un instant t quelconque suffit pour déceler le défaut (Figure I. 13). Si au contraire on recherche des anomalies du second type (Figure I. 14), il peut s'avérer nécessaire d'enregistrer des images de la scène thermique à différents instants et de traiter ensuite les thermogrammes obtenus grâce à des logiciels dédiés. La Figure I. 14 montre une inversion des écarts de température entre zone saine et défaut en fonction du moment de la journée où sont réalisées les mesures. Ces images ont

été obtenues dans le cadre du projet RGC&U, lors d'une précédente thèse [NAA, 06], en sous face, coté amont, du tablier du Pont de la Poudrerie près de Toulouse. Les images ont été prises à l'aide d'une caméra infrarouge ThermoCAM™ SC 2000, placée à 4,5 mètres de la scène thermique (la taille de l'image est d'environ 1,4 x 1,9 m²). Les mesures ont été réalisées le matin, entre 10 et 11h, et l'après-midi, entre 17h30 et 18h. La température ambiante était respectivement de 16°C et de 12,5°C lors des séances de mesure. On voit ici apparaître l'importance de la notion de mesures temporelles en infrarouge : la réponse de l'objet est fonction de l'instant de la mesure. Un suivi temporel et une analyse mathématique de l'évolution de la température de surface pourra être porteuse d'informations.

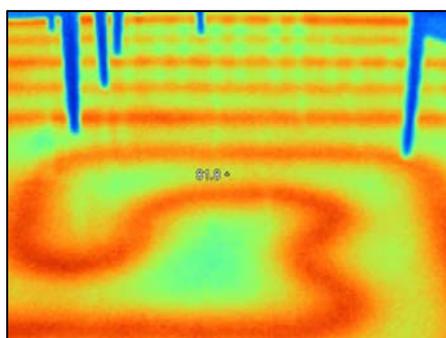


Figure I. 13. Localisation infrarouge d'un plancher chauffant (Source EXAM BTP)

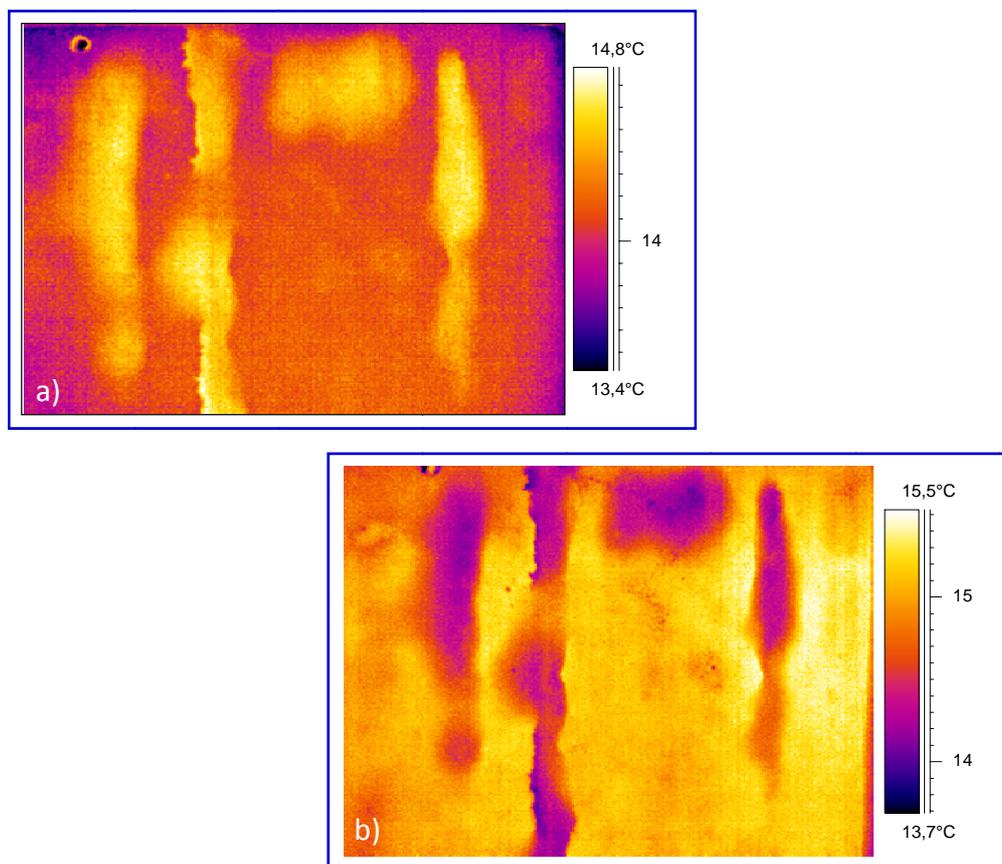


Figure I. 14. Réponse thermique de la présence de délaminations en conditions réelles
a) Mesures réalisées le matin b) Mesures réalisées l'après-midi [NAA, 06]

IV.1.2. Analyse et traitement

On peut qualifier de « simple » l'analyse de thermogramme pour le repérage de défaut. En effet, celle-ci consiste en général en une analyse qualitative des thermogrammes : détection et repérage d'anomalies thermiques sans quantification (dimension, profondeur...). Les observations se font en différences relatives de température entre zones. Néanmoins l'obtention de valeurs de température vraie est envisageable en connaissant précisément les valeurs des différents paramètres entrant en jeu dans l'équation radiométrique [I. 22] et notamment l'émissivité du matériau [AVD, 03²].

Cependant, du fait des nombreux biais de mesure pouvant exister en thermographie infrarouge passive, l'analyse du thermogramme doit être réalisée avec précaution. Afin de faciliter et d'améliorer la qualité de cette analyse, il s'avère primordial de coupler les images infrarouges à des images dans le spectre du visible. Celles-ci permettent un repérage et un contrôle des anomalies thermiques détectées en éliminant certains artefacts de mesure.

L'infrarouge dual-band est une réponse possible pour s'affranchir de certains défauts. Cette méthode consiste à enregistrer une même scène thermique dans deux fenêtres de longueur d'onde (3-5 et 8-12 μm) simultanément. Les deux fenêtres n'étant pas réceptives aux mêmes longueurs d'onde, les variations d'émissivité de surface sont compensées et on s'affranchit ainsi de certains artefacts de mesure tels que l'ombre de la végétation sur une chaussée [KHA, 98] [WAS, 98].

Pour passer à une étude plus approfondie, l'approche quantitative nécessite la résolution du problème de conduction de la chaleur en régime transitoire [GRI, 98] ou une analyse statistique plus approfondie des données.

IV.1.3. Applications

A l'heure actuelle, la thermographie infrarouge passive est surtout utilisée pour la réalisation de diagnostics qualitatifs avec pour objectif la mise en lumière d'anomalies thermiques [AVD, 03³].

Dans le domaine du génie civil, toutes les constructions sont naturellement soumises à des variations de température, soit entre l'intérieur et l'extérieur (bâtiments), soit entre la face supérieure et la face inférieure (tablier de pont, toitures), ceci principalement sous l'influence diurne ou saisonnière. Lorsque des anomalies sont présentes, les transferts de chaleur engendrés dans le matériau par les sollicitations thermiques peuvent faire apparaître ces anomalies dans le domaine de l'infrarouge. C'est dans ce contexte que la thermographie infrarouge passive trouve de multiples applications parmi lesquelles la détection :

- de ponts thermiques [BAL, 02] ;



Figure I. 15. Ponts thermiques en façade d'une maison

- de traces d'humidité [MAR, 80]. La Figure I. 16 illustre des traces d'humidité à l'intrado de la paroi béton dans une station de métro de Montréal. La ligne nommée « front thermique » marque le niveau piézométrique de la nappe à l'extrado de la paroi ;

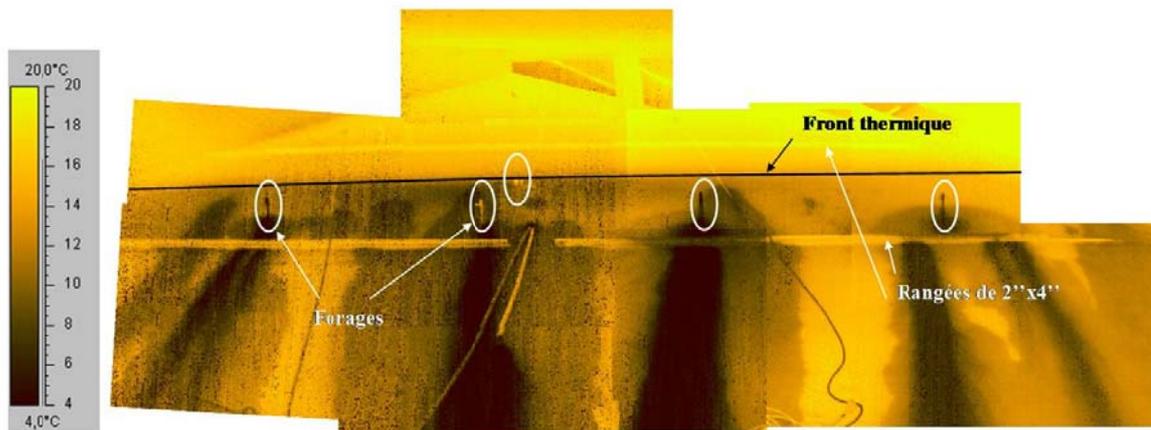


Figure I. 16. Images visible et infrarouge de la paroi de la station de métro Assomption à Montréal (Image Samuel NAAR)

- de la présence de vides dans les digues () [OST, 05], dans les chaussées (délaminations) [MOR, 00] [MOR, 01] ;

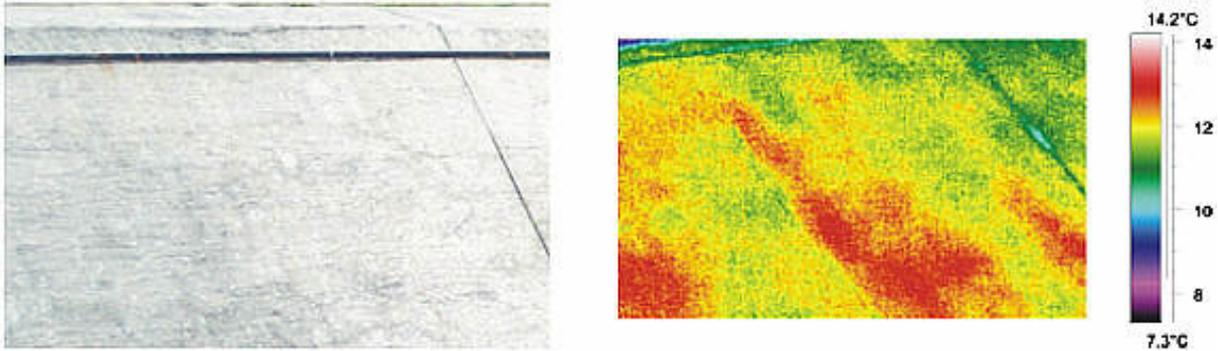


Figure I. 17. Détection de vides derrière une paroi béton de digue [OST, 03]

- de foyer d'incendie dans les terrils miniers [CAR, 06].

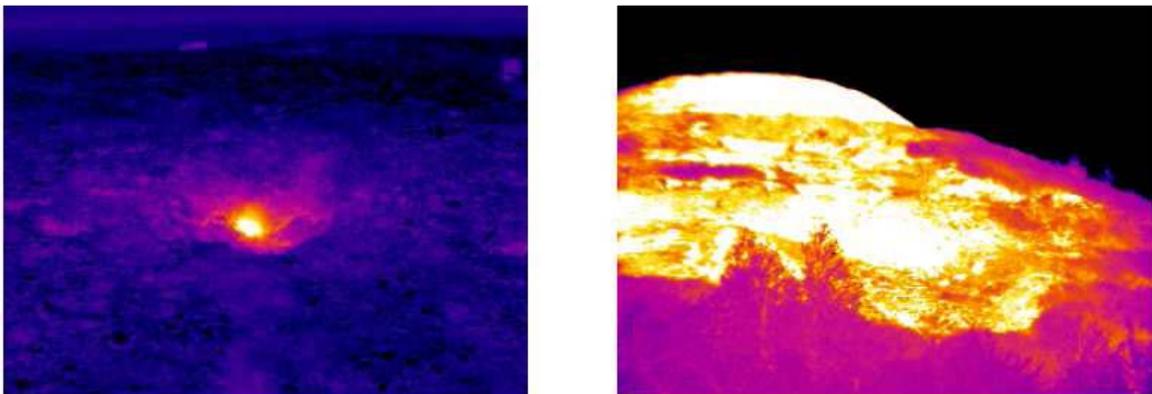


Figure I. 18. Exemple de zones en auto-combustion sur des terrils miniers (gamme de température 18-62°C) [CAR, 06]

- De délaminations dans les bétons. La Figure I. 19 montre la présence d'une multitude d'anomalies thermiques (délaminations) dues à la corrosion des armatures au droit des écarteurs [GIL, 07]

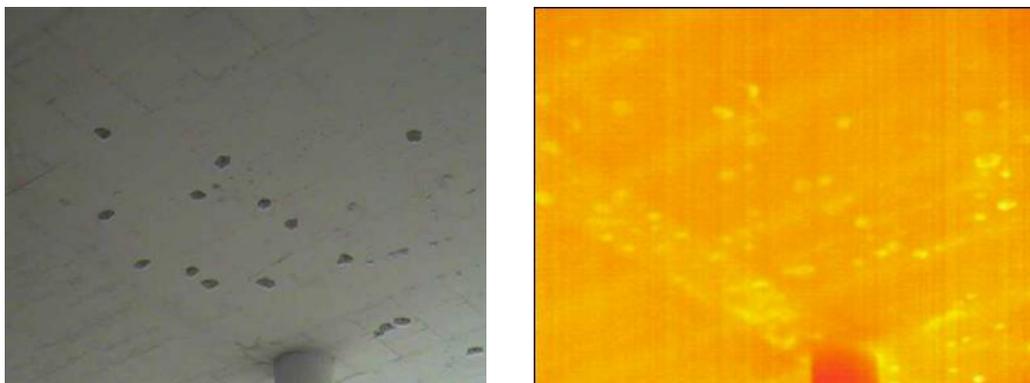


Figure I. 19. Images visible et infrarouge de la sous face d'un pont présentant une multitude d'anomalies thermiques [GIL, 07]

Toutes ces applications ont pour objectifs la détection d'anomalies thermiques mais aucune ne cherche à caractériser ces anomalies en termes de profondeur (pour les vides ou les planchers chauffants) ou d'intensité (teneur en eau). De plus, dans la majorité des cas, le travail s'effectue sur des variations relatives de température.

IV.1.4. Avantages

La thermographie infrarouge passive, de par sa relative facilité, présente de nombreux avantages :

- C'est une méthode de contrôle à grand rendement. Le matériel étant maniable et léger, les mesures peuvent s'effectuer rapidement sur de grandes surfaces. Elles permettent également d'ausculter des surfaces à grandes distance, ce qui réduit les coûts d'intervention ;
- Il s'agit d'une méthode non destructive et sans contact pour laquelle on interfère très peu avec la surface à ausculter.
- Les résultats sont relativement faciles à interpréter lorsque l'on se limite à une appréciation qualitative.

IV.1.5. Limites

Il faut noter en premier lieu que la mesure de thermographie infrarouge étant très sensible à de nombreux paramètres (§II.2.4), les biais de mesure sont d'autant plus nombreux. Il est donc préférable de toujours coupler les mesures infrarouges à des mesures dans le visible afin de vérifier que les anomalies thermiques détectées sur les thermogrammes soient bien dues à des modifications locales des propriétés thermiques du matériau et non à des artefacts de mesure (présence de débris sur des chaussées, présence d'ombres, de lichens...). La technique est très dépendante des conditions environnementales.

Un second inconvénient de la technique reste le positionnement des mesures sur site. Il est nécessaire de disposer des marqueurs thermiques sur la zone d'auscultation et d'avoir un protocole de mesure rigoureux.

De plus, une limite majeure de la technique est la profondeur d'investigation. Dans le cas de détection de défauts de type 2, la profondeur d'investigation n'est pas très élevée : de l'ordre de quelques centimètres.

Enfin, dans l'avancée actuelle de la technique, la thermographie infrarouge passive reste un outil de diagnostic qualitatif sans évaluation quantitative de la profondeur du défaut.

IV.2. Thermographie active

IV.2.1. Méthode

La thermographie infrarouge active se distingue de la méthode passive par le recours à une source thermique extérieure contrôlée afin de créer artificiellement un contraste de température entre zones saines et zones contenant un défaut. Les stimulations employées peuvent être : soit une sollicitation thermique directe (lampe, flash, ...), soit une sollicitation indirecte qui entraîne un échauffement local dans le matériau (vibrations mécaniques, induction [OST, 05] [DUT, 10]...).

En thermographie active, les caractéristiques des sources de stimulation étant connues et maîtrisées, il est possible d'obtenir des résultats quantitatifs sur les hétérogénéités présentes dans le matériau.

IV.2.1.1. Thermographie pulsée (PT)

La thermographie infrarouge pulsée (Pulsed/Impulse thermography) consiste à générer une impulsion thermique (lampe, flash, laser, jet d'air...) à la surface d'un échantillon puis à enregistrer l'évolution de la température de surface de l'objet dans le temps. La Figure I. 20 donne une représentation schématique du montage expérimental.

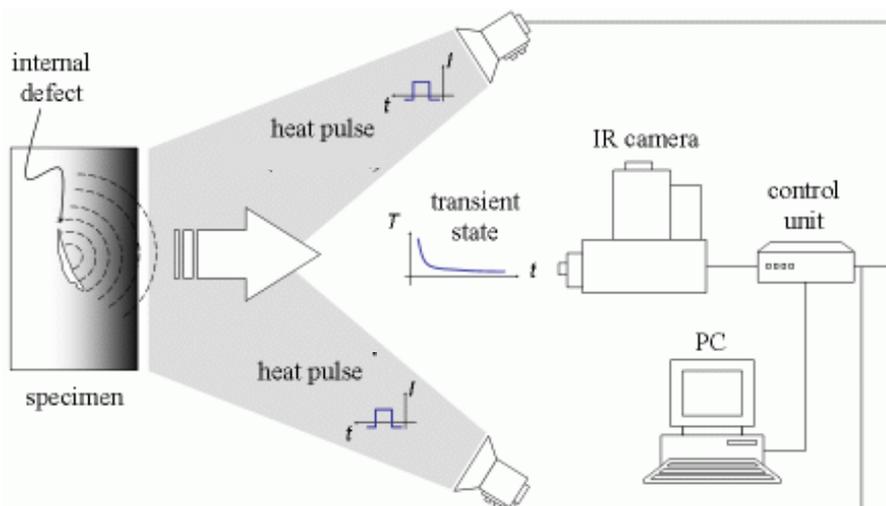


Figure I. 20. Représentation schématique du montage expérimental utilisé en thermographie infrarouge pulsée (d'après [BEN, 09])

La durée de l'impulsion initiale est variable, de quelques microsecondes à quelques secondes, selon l'épaisseur et les propriétés thermiques du matériau à ausculter (tout spécialement de sa conductivité thermique) [MAL, 96].

Suite l'impulsion, un gradient de température apparaît en surface. Le front de chaleur se propage ensuite par diffusion à l'intérieur du matériau, créant ainsi l'état transitoire nécessaire à l'inspection. Dans un milieu homogène la chaleur se répartit uniformément

mais la présence d'un défaut dans l'épaisseur du matériau modifie localement la diffusivité. On observe ainsi en surface des différences de températures entre zones saines et zones défectueuses. Ces différences de température apparaissent une fois que le front thermique a atteint les défauts. Par conséquent, plus un défaut est profond, plus il apparaîtra tardivement et avec un contraste moindre [MAL, 90].

L'enregistrement de thermogramme commence simultanément à l'impulsion thermique ou dès que celle-ci se termine. L'enregistrement s'effectue à pas de temps constant. On obtient ainsi une séquence de thermogrammes, ensemble de pixels de coordonnées (i,j) , pour lesquels il est possible d'extraire à chaque pas de temps une valeur de température de surface T . On peut ainsi tracer pour chaque pixel la courbe d'évolution de la température de surface (Figure I. 21).

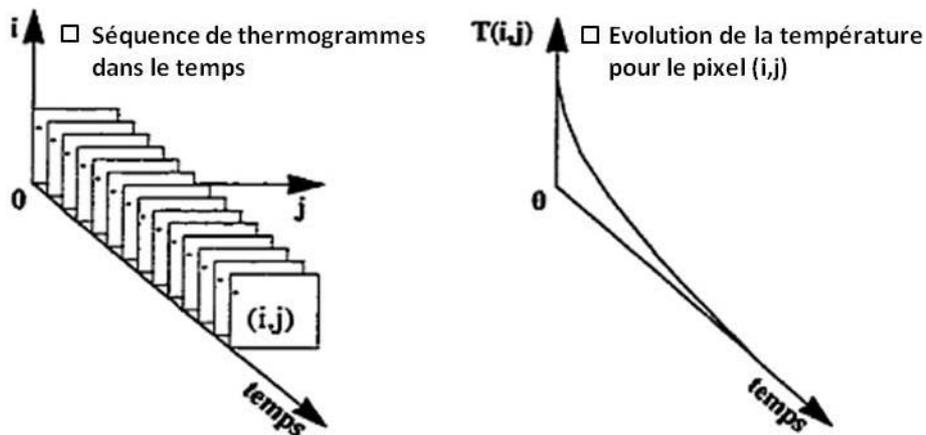


Figure I. 21. Illustration des enregistrements effectués en PT (adapté de [COU, 97])

Le traitement classique des thermogrammes en PT repose sur l'étude des contrastes thermiques entre zones saines et zones présentant des défauts. La Figure I. 22 présente un exemple de courbes obtenues en PT sur du béton.

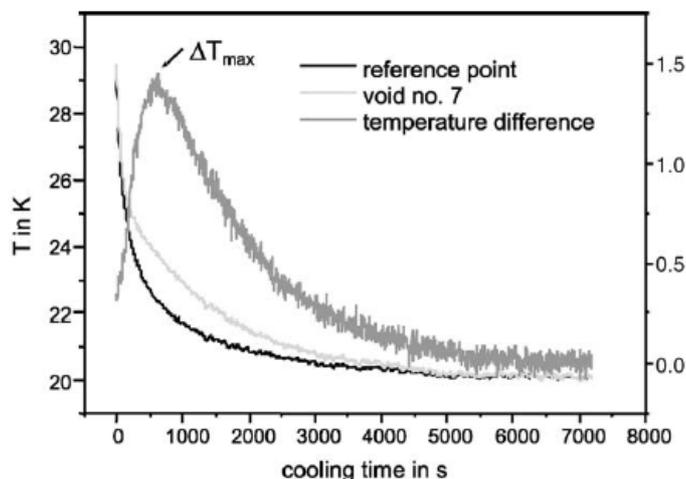


Figure I. 22. Température de surface au droit du matériau sain, du matériau altéré et différence de température entre les deux zones avec localisation du contraste maximum (d'après [MAI, 03])

Un contraste maximum ΔT_{\max} apparaît pour un temps particulier t_{\max} , qui dépend de la profondeur du défaut mais également de ses dimensions, des propriétés du matériau ainsi que du temps de chauffage [MAL, 01].

Cielo *et al.* [CIE, 87] ont montré que le temps d'observation nécessaire pour détecter un défaut est fonction du carré de la profondeur [l. 26]. Ce résultat est obtenu par approximation à partir de l'équation [l. 23]. Quand à la perte de contraste c , Allport *et al.* [ALL, 88] ont montré qu'elle était proportionnelle au cube de la profondeur [l. 27].

$$p = \sqrt{\frac{a}{\pi \cdot f}} \Leftrightarrow t \approx \frac{z^2}{a} \quad [l. 26] \quad \text{et} \quad c \approx \frac{1}{z^3} \quad [l. 27]$$

Avec : $f = \frac{1}{t}$ Fréquence (Hz) est égale à l'inverse de la période (s)
 z Profondeur (m)

L'équation [l. 27] montre une perte de contraste très rapide avec la profondeur. Il est donc nécessaire si l'on souhaite observer des défauts profonds d'utiliser une stimulation de longue durée de manière à transférer un front thermique plus intense jusqu'au défaut et ainsi à améliorer la réponse.

Plusieurs définitions du contraste sont utilisées. Le Tableau I. 3 ci-après récapitule l'ensemble des formules utilisées pour le calcul du contraste ainsi que les avantages et inconvénients de ces différentes méthodes.

Empiriquement il a été montré que le rayon du plus petit défaut visible doit être au moins une à deux fois supérieure à sa profondeur sous la surface. Cette règle est valable pour les matériaux homogènes et isotropes [VAV, 82].

Cette technique a été utilisée avec succès par Maierhofer *et al* [MAI, 02] pour détecter des délaminations, à l'intérieur de corps d'épreuve en béton, jusqu'à une profondeur de 10 cm et par Valluzzi *et al.* [VAL, 08] pour détecter des défauts de collage à l'interface béton/composites, dans le cadre du renforcement de poutres béton par des matériaux composites.

Un avantage non négligeable de cette technique de mesure par rapport aux autres techniques de contrôle non destructif est qu'elle est très peu sensible à la présence de ferrailage [MAI, 07]. De plus il s'agit d'une technique relativement rapide. Les inconvénients de la PT sont son faible rapport signal sur bruit, la profondeur d'investigation limitée, ainsi que les diverses erreurs qui peuvent affecter la mesure : variation d'émissivité de la surface, non uniformité de chauffage, ..., qui peuvent masquer la visibilité des défauts.

Tableau I. 3. Synthèse des avantages et inconvénients des différents contrastes (d'après [OST, 05])

	Contraste	Avantages	Inconvénients
Absolu $C^a(t)$	$C^a(t) = \Delta T(t) = T_{def}(t) - T_s(t)$	Meilleure visualisation des défauts par rapport à l'environnement	Linéairement relié à l'énergie absorbée.
Running $C^r(t)$	$C^r(t) = \frac{C^a(t)}{T_s(t)} = \frac{T_{def}(t) - T_s(t)}{T_s(t)}$	Moins affecté par les propriétés optiques surfaciques. Dépend moins de l'énergie absorbée	Traitement apparemment très sensible aux bruits de mesure
Normalisé $C^n(t)$	$C^n(t) = \frac{C^a(t)}{T_s(t_m)} = \frac{T_{def}(t) - T_s(t)}{T_s(t_m)}$	Calculé à partir du temps de température maximum. t_m est fonction de la simulation	T_m doit être identifié. Traitement apparemment très sensible aux bruits de mesure
Standard $C^s(t)$	$C^s(t) = \frac{T_{def}(t) - T_s(t_0)}{T_s(t) - T_s(t_0)}$	Supprime la contribution de l'environnement	Normalisé par rapport à l'environnement. Traitement apparemment très sensible aux bruits de mesure
<p>T_{def}, température de surface d'une zone altérée</p> <p>T_s, température de surface d'une zone saine</p> <p>t_m, instant où la température est maximale</p> <p>t_0, début de la stimulation</p>			

IV.2.1.2. Thermographie modulée (LT)

Le principe de la LT (Lock-in thermography) est d'étudier le déphasage et l'amplitude de la réponse en température d'un spécimen par rapport à une sollicitation thermique sinusoïdale en régime établi.

Pour cela, l'échantillon est soumis à un chauffage sinusoïdal de pulsation ω appliqué en surface [BUS, 92]. Celui-ci introduit des vagues thermiques qui seront fortement atténuées et dispersées à l'intérieur du matériau. Le champ thermique résultant est enregistré à l'aide d'une caméra thermique qui capte les émissions infrarouges de la surface.

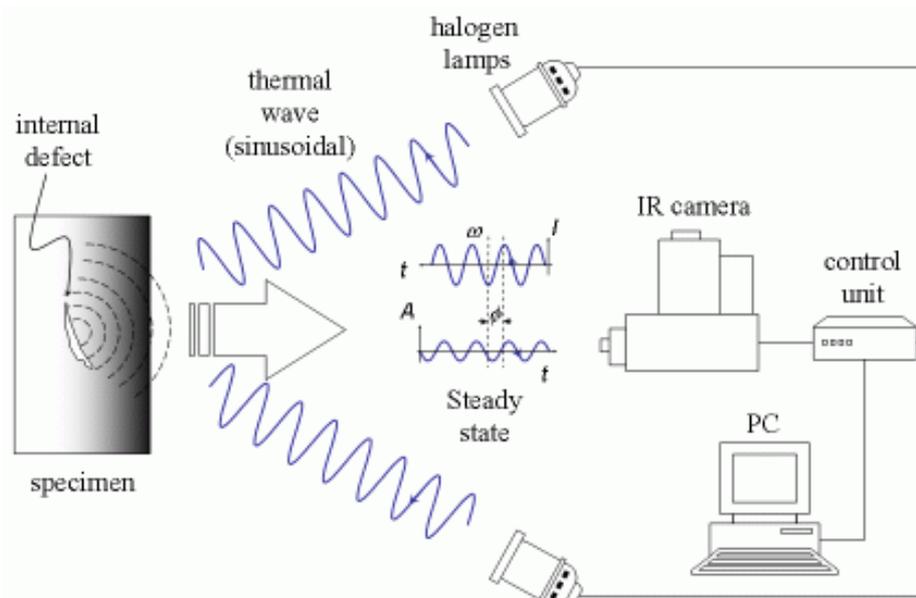


Figure 1. 23. Représentation schématique du montage expérimental utilisé en thermographie modulée

Le traitement numérique consiste à appliquer une transformée de Fourier rapide (FFT) sur chaque pixel de l'image. On extrait ainsi la phase et l'amplitude en régime permanent. On peut ainsi obtenir une image en amplitude et en phase pour la fréquence de stimulation.

L'intérêt majeur de la méthode est que le déphasage est indépendant des caractéristiques optiques et infrarouge (absorption, émission) de la surface de l'objet. Les images de phase ne sont donc pas sensibles aux problèmes de non uniformité de chauffage d'où une plus grande facilité d'emploi sur de larges surfaces que la PT [MAL, 01]. Ceci la rend également particulièrement intéressante pour l'investigation de mosaïques, de fresques ou de peintures [MEO, 05]. De plus, les images en phase sont caractérisées par la capacité de pouvoir sélectionner la profondeur d'inspection en fonction de la fréquence de stimulation. La profondeur d'investigation d'une image de phase est approximativement donnée par la profondeur de pénétration des ondes thermique p [I. 23] [MAL, 97]. Plus la fréquence de stimulation diminue plus l'inspection est profonde.

Cette caractéristique est également un des désagréments de la méthode. En effet, ne connaissant pas à priori la profondeur des défauts, il est nécessaire d'expérimenter différentes fréquences, ce qui augmente d'autant le temps de mesure. Cette méthode est donc plus longue que les méthodes impulsionnelles mais elle permet d'obtenir un bon rapport signal sur bruit.

IV.2.1.3. Thermographie de phase pulsée (PPT)

La PPT (Pulsed phase thermography) correspond à la réunion des techniques de thermographie pulsée et de thermographie modulée. En effet, elle se base sur la combinaison d'une excitation impulsionnelle (PT) et d'une analyse fréquentielle de l'évolution des phases et des amplitudes des températures (LT).

Par définition, une impulsion de Dirac ($\delta(t)$) possède dans le domaine fréquentiel un spectre dont l'énergie est répartie également entre toutes les fréquences de 0 à l'infini. L'impulsion de Dirac est une notion idéale qui ne peut être créée artificiellement. Une stimulation thermique réelle a dans le domaine temporel une durée et une amplitude finies qui se traduisent dans le domaine fréquentiel par un spectre ne couvrant pas l'intégralité des fréquences et dont les amplitudes ne sont pas toutes égales (Figure I. 24). On simplifie l'analyse de la stimulation thermique réelle en la représentant par une onde en créneau [I. 27] carré dans le domaine temporel.

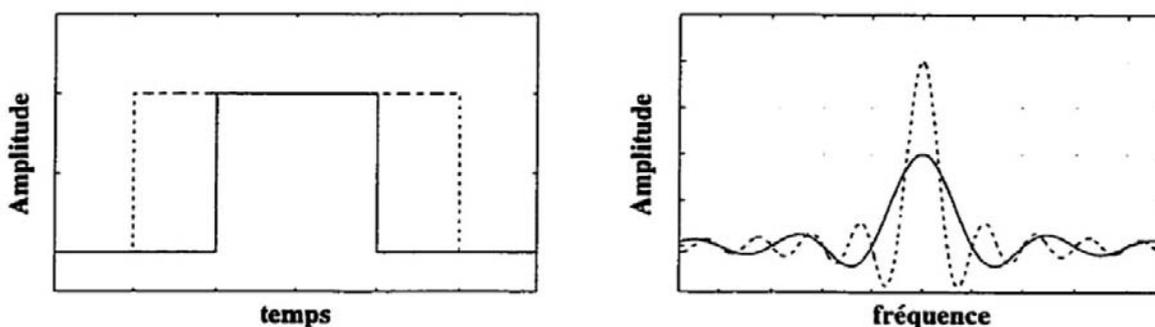


Figure I. 24. Représentation en domaine temporel et fréquentiel d'une stimulation thermique réelle simplifiée (d'après [MAL, 97])

On note que les stimulations les plus longues dans le domaine temporel ont les spectres les plus étroits dans le domaine fréquentiel : plus la durée de l'impulsion est élevée, plus l'énergie spectrale se concentre dans les basses fréquences.

La diffusion thermique dans le matériau étant inversement proportionnelle à la fréquence d'excitation [I. 23], les hautes fréquences permettent une analyse en surface, et les basses fréquences se propagent plus profondément dans le matériau [AVD, 03¹]. On améliorera donc la visibilité des défauts en profondeur en augmentant le temps de chauffage.

Le processus expérimental de la PPT est similaire à celui de la PT et de la LT à savoir que l'on enregistre à pas de temps constant la réponse du spécimen après la stimulation thermique. On obtient ainsi une séquence de thermogrammes qui va être traitée et analysée numériquement dans le domaine fréquentiel. Le passage au domaine fréquentiel s'effectue

par la transformée de Fourier discrète [l. 28] appliquée sur chacun des pixels de la séquence de thermogrammes.

$$F_n = \sum_{k=0}^{N-1} T(k) e^{2\pi i k n / N} = \text{Re}_n + i \text{Im}_n \quad [l. 28]$$

- Avec :
- i nombre imaginaire ($i = \sqrt{-1}$)
 - Re Partie réelle de la transformée
 - Im Partie imaginaire de la transformée
 - n Incrément de fréquence

Les images de phase et d'amplitude sont formées pour une fréquence donnée en répétant ce processus pour chacun des pixels.

La Figure I. 25 montre des images en phase et en amplitude obtenues à différentes fréquences en PPT et en LT ainsi qu'une image de contraste maximum obtenue en PT pour le même échantillon test de graphite époxy contenant deux inclusions de téflon de 20 cm de diamètre à 2 (défaut 1) et 3 mm (défaut 2) de profondeur. Les images de phase présentées montrent les mêmes résultats en LT et en PPT pour des fréquences similaires. On note que le défaut 1 (défaut le plus superficiel) n'est plus visible pour la dernière fréquence testée 0.02Kz alors qu'il l'est à la fréquence 0.063Hz. Les images de phase sélectionnent une profondeur maximale avec une visibilité réduite pour les profondeurs intermédiaires. L'image en amplitude met en évidence les défauts jusqu'à une certaine profondeur liée à la fréquence de stimulation, d'où la visibilité des deux défauts pour la plus basse fréquence. L'image de contraste maximum révèle quand à elle seulement le défaut le plus superficiel.

La PPT combine ainsi les avantages des deux méthodes, à savoir, la rapidité d'exécution de la PT, avec l'analyse de plusieurs fréquences simultanément pour une stimulation thermique courte, et la non sensibilité aux chauffages non uniformes et aux caractéristiques spectrales de la surface de l'échantillon sur les images de phase.

La thermographie à phase pulsée a déjà été employée en Génie Civil mais a montré ses limites. Le béton étant un matériau diffusif, la sollicitation est appliquée à la surface du spécimen à l'aide de flashes ou de radiateurs puissants. Dans cette configuration, les pertes thermiques par convection et rayonnement ne sont pas négligeables en surface et représentent un facteur pénalisant en termes de rendement. L'utilisation de sources

puissantes, supérieures à 10KW/m^2 conduit des températures atteintes à la surface de l'échantillon, supérieures à 100°C , qui ne sont pas compatibles avec le béton [DUT, 10].

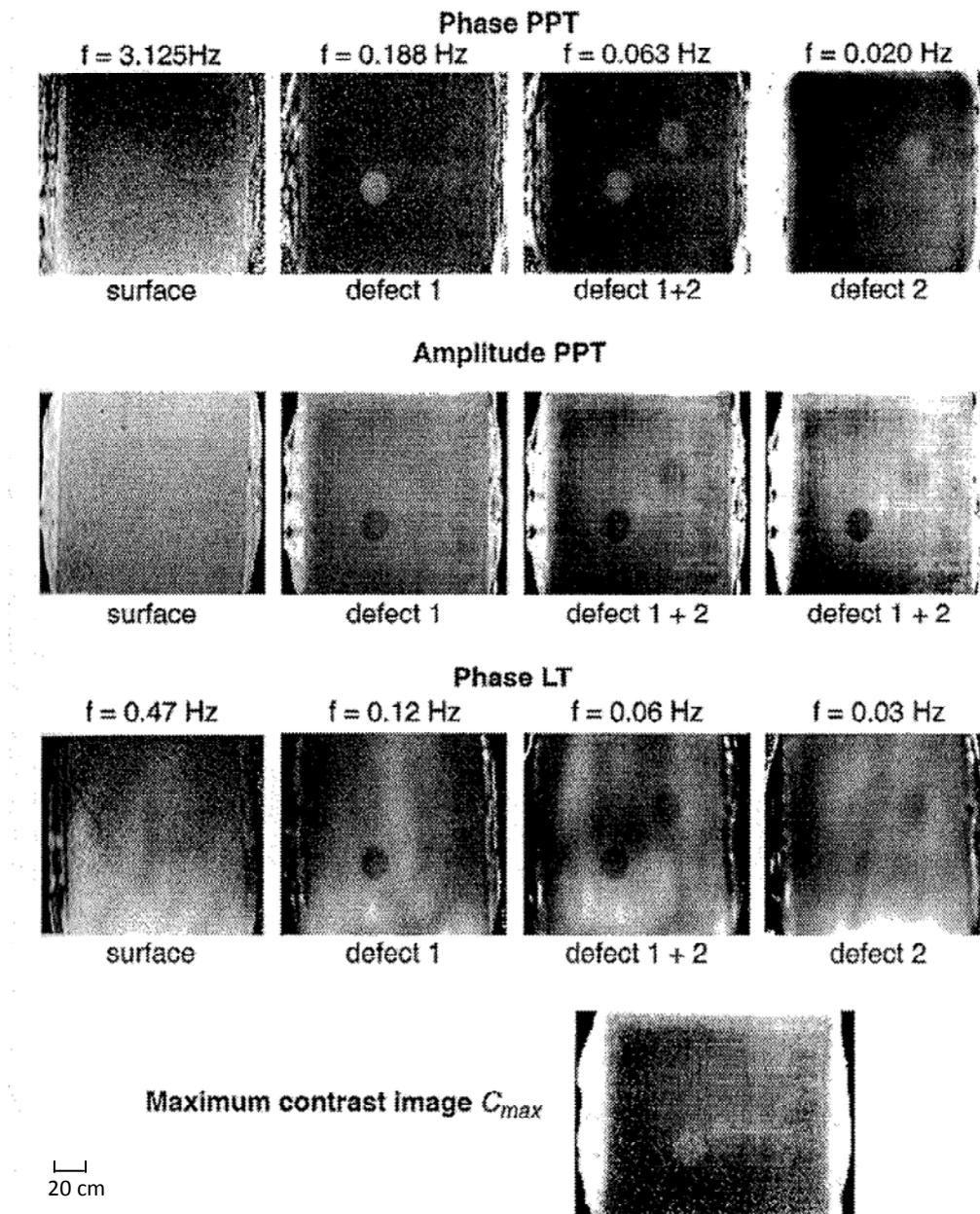


Figure 1. 25. Exemples d'images en phase et en amplitude obtenues pour différentes fréquences en PPT et LT, et d'image de contraste maximum obtenue en PT [d'après MAL, 01]

IV.2.1.4. Vibrothermographie stimulée par ultrason(VT)

La VT (vibrothermography) utilise le principe de conversion de l'énergie mécanique en énergie thermique. Sous l'effet de vibrations mécaniques, de la chaleur est relâchée par friction au niveau des défauts présentant des surfaces de contact tels que des fissures ou des délaminations.

Le principe est le suivant : un émetteur à ultrasons est placé à la surface du corps à ausculter, il crée des ondes acoustiques qui se propagent dans le matériau. Ces ondes

mécaniques se propagent librement dans un matériau homogène. En revanche, la présence de défauts produit un ensemble d'atténuation, de diffusion et d'absorption qui se traduit sous forme de chaleur. Cette chaleur se propage ensuite par conduction dans le matériau. La signature thermique de ces défauts en surface est enregistrée à l'aide d'une caméra infrarouge.

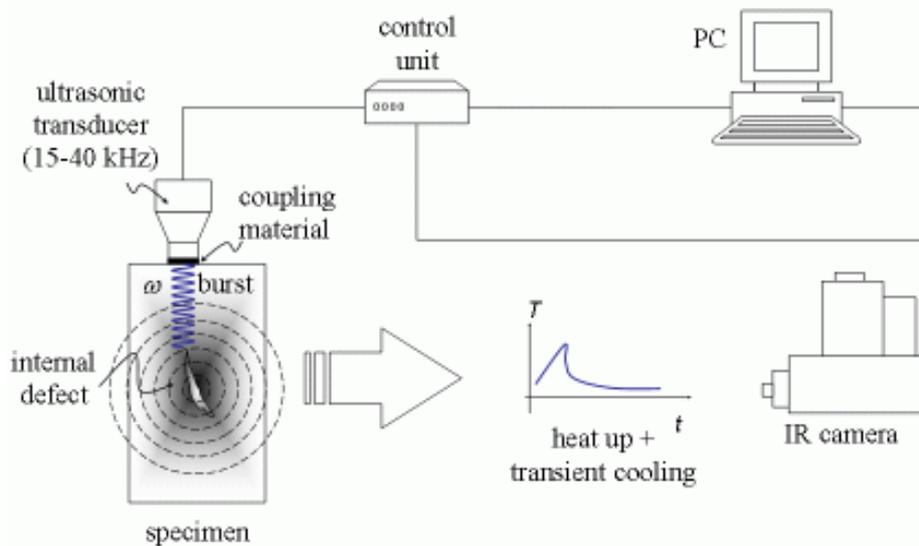


Figure I. 26. Représentation schématique du montage expérimental utilisé en vibrothermographie [PIA, 08]

La vibrothermographie stimule directement les défauts internes sans chauffer la surface comme les techniques de thermographie conventionnelles. Elle présente donc l'avantage d'être moins sensible à la température ambiante et ne pose pas le problème de l'homogénéité du chauffage. Cette technique permet de détecter des défauts jusqu'à quelques millimètres de profondeur.

Toutefois, la vibrothermographie n'est limitée qu'au cas où les ondes acoustiques entraînent la vibration de deux surfaces en contact : les deux lèvres d'une fissure ou d'une délamination, contact entre deux pièces serties.... Les défauts sans surface de contact, tel que des vides de coulage ou tout autre défaut volumique, ne seront pas détectables.

Sous sa forme actuelle, la vibrothermographie est une méthode globale de sub-surface c'est-à-dire qu'elle permet de localiser des défauts dans l'espace mais pas dans l'épaisseur du matériau. De plus, celle-ci est limitée à une faible profondeur d'investigation. La VT peut être associée à une autre méthode utilisant des ultrasons : l'impact écho qui permettra une localisation dans la profondeur. En outre, la vibrothermographie est une méthode relativement lente car elle ne permet pas d'investiguer de grandes surfaces. Si on veut réaliser une étude sur une surface étendue, il faudra déplacer le transducteur, appliquer une nouvelle stimulation et acquérir de nouvelles images infrarouges. Elle paraît donc peu applicable en génie civil sur des ouvrages réels.

IV.2.1.5. Chauffage Interne et Détection Externe par Thermographie Infrarouge (CIDETI)

Ce procédé repose sur l'échauffement par effet Joules des câbles de précontrainte soumis au passage d'un courant électrique. La chaleur est diffusée à travers le béton jusqu'à la surface, où une caméra infrarouge enregistre l'évolution de la température de surface [DUT, 10]. Afin de s'affranchir des problèmes de non homogénéité du chauffage, les fonctions de transfert de chaque pixel sont calculées, travaillées pour obtenir une image de phase de la scène thermique.

Les premiers essais réalisés nécessitaient l'ouverture de fenêtres dans le béton pour brancher directement aux câbles, un générateur électrique. L'utilisation d'un inducteur électrique est proposée par le Laboratoire de Génie Civil et géoEnvironnement (LGCgE) de l'Université de Lille Nord de France. Celui-ci présente l'avantage d'être sans contact et de ne nécessiter aucun accès aux câbles de précontraintes ou aux armatures. Les premiers essais réalisés ont montré la possibilité de détecter des défauts d'injection à l'intérieur des gaines de précontraintes [DUT, 10] ainsi que l'obtention de couples diffusivité du béton – profondeur de couverture [BRA, 11].

L'inconvénient majeur de cette technique est qu'elle ne permet d'ausculter que de petites surfaces.

IV.2.2. Avantages

Le principal avantage de la thermographie infrarouge active est le contrôle et/ou la connaissance des sollicitations thermiques (forme, intensité, fréquence, durée) appliquées sur le système étudié.

De plus, le traitement en domaine fréquentiel pouvant être appliqué sur certains types de thermographie active (LT et PPT) permet de s'affranchir des problèmes de variation des propriétés optiques et infrarouge de la surface du matériau.

Enfin, une évaluation quantitative des mesures est possible permettant de remonter à une information chiffrée sur la profondeur de défauts.

IV.2.3. Limites

Il est très difficile d'obtenir une stimulation de forte intensité, uniforme et brève sur une grande surface. La non uniformité du chauffage pose problème pour les traitements en contraste de température [GRI, 98] et le manque d'énergie limite les profondeurs d'investigation par réflexion.

Le coût de l'équipement est assez élevé.

Le travail s'effectue sur des zones de dimensions réduites limitées par les caractéristiques du système de stimulation thermique.

A l'heure actuelle ce type de méthode est surtout utilisé en laboratoire car le système de chauffage peut être très lourd à mettre en œuvre *in situ* mais les techniques se développent.

V. Conclusion

L'un des inconvénients majeurs de la thermographie infrarouge, quelle que soit sa forme, est que l'on ne mesure pas directement des valeurs de température. La caméra infrarouge mesure le rayonnement incident parvenant jusqu'au détecteur. Ce rayonnement est composé de trois parties : le rayonnement émis par la scène thermique observée, le rayonnement émis par l'environnement et reflété à la surface de la scène, et le rayonnement absorbé et émis par l'atmosphère entre la scène et l'optique de la caméra. Bien que l'équation radiométrique prenne en compte tous ces phénomènes, la correction est rarement complète du fait d'incertitudes sur la température de l'environnement ou sur l'émissivité de la surface. Tout ceci entraîne une dégradation du signal reçu et des difficultés à remonter aux valeurs de température vraie de la surface auscultée du matériau.

Malgré cela, la mesure de température de surface demeure riche d'informations : elle traduit les phénomènes thermiques présents dans l'épaisseur du matériau et permet de mettre en exergue la présence de défauts en profondeur.

Le Tableau I. 4 dresse un bilan des principales applications de thermographie infrarouge dans le domaine du génie civil, ainsi que des avantages et inconvénients des différentes techniques.

Tableau I. 4. Applications, avantages et inconvénients des différentes techniques de thermographie infrarouge

Technique	Application Génie Civil	Avantages	Inconvénients
IR passif	Détection de ponts thermiques	Rapide Sans contact	Pas d'informations quantifiées sur les profondeurs de défauts
	Détection de délamination	Mesure sur de grandes surfaces	
	Détection de nids d'abeilles		
	Détection de venues d'eau		
PT	Détection de vides, de délaminations	Rapidité d'analyse des résultats	Observation en relatif : choix de la zone de référence
	Détection de défauts de collage à l'interface béton-matériau composite	Possibilité de remonter à la profondeur du défaut	Sensible à la non uniformité du chauffage
LT	Détection de vides, de délaminations	Image de phase non sensible à la non uniformité du chauffage Profondeur du défaut connue	Lente car les fréquences de stimulation doivent être testées une à une pendant une durée suffisamment longue
PPT	Détection de vides, de délaminations	Image de phase non sensible à la non uniformité du chauffage Profondeur maximale du défaut connue	<i>In situ</i> problème de pertes thermiques en surface
VT	Détection de fissures, de délaminations	Pas de problèmes liés à la non uniformité du chauffage	Possible uniquement pour des défauts ayant deux surfaces de contact Faible profondeur d'investigation Méthode lente Pas d'information sur la profondeur du défaut
CIDETI	Détection de vide d'injection dans les gaines de précontrainte Détermination de couples diffusivité / profondeur d'enrobage	Chauffage interne sans contact	Hétérogénéité de la sollicitation Auscultation de petites surfaces

Les éléments du tableau permet de souligner l'intérêt des méthodes actives en termes de performances pour la détermination des profondeurs, soit en augmentant les domaines de détection, soit en permettant d'estimer la profondeur des défauts. Toutefois elles présentent généralement des limites liées à la sollicitation initiale du système par une source maîtrisée (problème liées à l'uniformité des sollicitations, temps de chauffage nécessaires) sans évoquer les contraintes techniques et matérielles que cela entraîne. Ainsi l'un des intérêts majeurs de la thermographie infrarouge passive est qu'elle permet du fait de la sollicitation solaire diffuse, d'obtenir un chauffage uniforme et global des surfaces à ausculter (pour des ouvrages entièrement à l'ombre ou entièrement au soleil). Elle est donc plus facile et plus rapide à mettre en application.

Les approches temporelles exploitées par les différentes techniques « actives » permettent toutefois une meilleure évaluation des propriétés du matériau, et des altérations. Il semble donc que l'évaluation des phénomènes transitoires associés aux transferts de chaleurs pourrait devenir une solution pour améliorer le potentiel de la technique « passive ».

Les travaux présentés dans la suite du document visent donc à étudier une méthodologie d'utilisation de la TIR Passive reposant sur une mesure des variations temporelles des températures de surface des structures de Génie Civil.

**CHAPITRE 2 : ETUDES
EXPERIMENTALES ET NUMERIQUES DE
L'INFLUENCE DE PARAMETRES
INTRINSEQUES AU MATERIAU BETON**

La thermographie infrarouge est souvent présentée comme une méthode de détection de défaut. Très peu d'études se sont intéressées à la capacité de la technique à mettre à jour des variations de nature ou d'état du béton.

Cette étude, s'inscrivant dans le cadre du projet ANR-SENSO, vise à étudier la capacité de la thermographie infrarouge à évaluer l'état du béton. Ceci englobe un nombre conséquent d'applications possibles comme par exemple la détermination de la teneur en eau, de la porosité, de la profondeur carbonatée ou la teneur en chlorures.

Dans une première partie les relations entre les propriétés physiques et thermiques sont décrites. Par la suite, des études expérimentales et numériques sur la détection de variations de porosité et de nature de granulat par thermographie infrarouge sont menées. Dans un dernier temps l'influence de la teneur en eau est étudiée.

I. Revue des facteurs affectant les propriétés thermiques des bétons

La connaissance des propriétés thermiques du matériau impliquées dans le processus de transfert de chaleur est essentielle pour la prédiction des profils de température et des flux de chaleur à travers le matériau.

Le problème de transfert de la chaleur dans le béton est complexe de par la nature hétérogène du matériau : mélange de ciment, granulats fins, granulats grossiers, air et eau formant à l'état durci un matériau composé de trois phases (squelette solide, air, eau). Afin de faciliter la compréhension du phénomène de conduction thermique dans le béton, celui-ci peut être subdivisé en ses différents constituants : mortier, granulats, et pores.

Des études ont montré que le type de granulat, la porosité et le taux d'humidité ont une influence très importante sur la conductivité thermique des bétons [CAM, 63] [MAR, 72]. Dans le cas de bétons ordinaires, la conductivité thermique du béton dépend largement de la nature pétrographique des granulats. Si l'on s'intéresse au cas particulier des bétons légers, l'influence du granulat est masquée par l'importance des vides et de leur taux d'humidité [TAT, 94].

Cette section présente l'influence des différentes propriétés intrinsèques au béton sur la conductivité thermique et la chaleur massique des matériaux.

I.1. Conductivité thermique

I.1.1. Nature et densité de granulat

Les roches utilisées pour la fabrication de granulats, ont des conductivités thermiques comprises entre 1,16 et 8,6 W.m⁻¹.K⁻¹ [KHA, 02]. Le Tableau II. 1 renvoie des valeurs classiques de la conductivité thermique de béton incorporant différents types de granulats.

Tableau II. 1. Valeurs caractéristiques de la conductivité thermique des bétons (d'après [TAT, 94])

Type de granulat	Béton sec		Béton saturé	
	Masse volumique (kg/m ³)	Conductivité thermique W.m ⁻¹ .K ⁻¹	Masse volumique (kg/m ³)	Conductivité thermique W.m ⁻¹ .K ⁻¹
Marbre	2290	1,7	2440	2,2
Grès	1920	1,4	2200	2,9
Granite			2420	2,6
Calcaire	2020	1,4	2420	2,2
Baryte	2880	1,2	3040	2,0
Basalte			2350	1,9
Schiste expansé	1430	0,62	1590	0,85

La conductivité thermique d'une roche augmente avec sa cristallinité. On voit dans ce tableau que la nature minéralogique et pétrographique du granulat influe grandement la conductivité du béton de même que l'état de saturation. Le passage de l'état sec à l'état saturé s'accompagne d'une augmentation de sensiblement 50% de la conductivité thermique et de 10% de la masse volumique. De manière générale, les granulats aux conductivités les plus faibles conduisent aux bétons ayant les conductivités les plus faibles.

De plus, Kim *et al.* [KIM, 03], ont montré expérimentalement que, pour un e/c constant, lorsque le ratio granulat/béton augmente de 34%, la conductivité thermique du béton augmente d'environ 30% (Tableau II. 2 et Figure II. 1).

Tableau II. 2. Effet du contenu en granulat, de la température et de l'état d'humidité (d'après [KIM, 03])

Nom échantillon	E/C (%)	Ciment (kg/m ³)	Eau (kg/m ³)	Granulat (kg/m ³)	Conductivité thermique (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)					
					Etat saturé			Etat sec		
					20°C	40°C	60°C	20°C	40°C	60°C
C-GC1	40	350	140	1805	2,46	2,50	2,30	1,96	1,94	1,83
C-GC2	40	452	181	1619	2,32	2,34	2,22	1,94	1,88	1,80
C-GC3	40	550	220	1439	2,24	1,98	1,88	1,76	1,68	1,60
C-GC4	40	650	260	1258	1,96	1,96	1,78	1,53	1,48	1,38
C-GC5	40	850	340	891	1,71	1,74	1,64	1,28	1,27	1,15
C-GC6	40	1050	420	527	1,39	1,43	1,35	1,00	0,96	0,89
P-WC4	40	1394	558	-	1,16	1,13	1,03	0,77	0,76	0,72

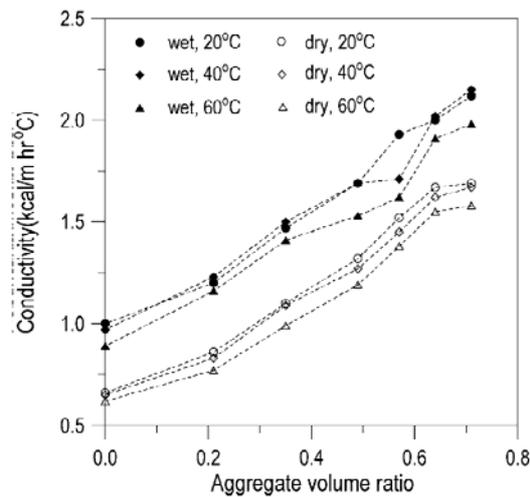


Figure II. 1. Influence de la proportion de granulats dans un béton sur sa conductivité thermique [KIM, 03]

Leurs résultats font également apparaître une influence de la teneur en eau et de la température. Pour une même composition, la présence d'eau tend à augmenter de manière générale la conductivité thermique tandis que la température tend à la diminuer.

1.1.2. Porosité

D'une manière générale, la conductivité thermique d'un matériau est d'autant plus faible que la porosité est importante [DOS, 03]. Ceci s'explique par le fait que l'air piégé dans les pores a une faible conductivité qui tend à diminuer la conductivité globale du matériau. Ce phénomène est d'autant plus vrai que la taille des pores est petite, empêchant ainsi la formation de courants convectifs en leur sein [BIA, 04].

Il existe de nombreux modèles permettant de décrire les liens entre porosité et conductivité thermique. On peut distinguer deux grandes familles :

- Modèles reposant sur la loi d'Ohm :

Ces modèles sont basés sur une analogie entre comportement électrique et thermique des matériaux. Le béton est alors assimilé à un matériau composé de 2 phases, l'une représentant la partie solide du béton composée du ciment et des granulats et une seconde composée de la porosité.

Deux configurations de base sont envisageables (Figure II. 2) et mènent à une modélisation du transfert thermique soit en série soit en parallèle.

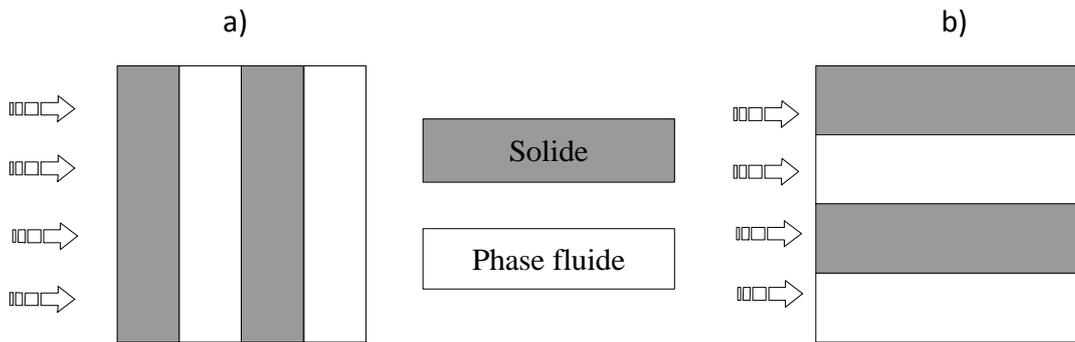


Figure II. 2. a) Modèle série b) Modèle parallèle

Modèle série :

$$\lambda^s = \frac{\lambda_f \cdot \lambda_s}{n \cdot \lambda_s + (1-n) \cdot \lambda_f} \quad [II. 1]$$

Modèle parallèle :

$$\lambda^p = n \cdot \lambda_f + (1-n) \cdot \lambda_s \quad [II. 2]$$

Avec λ_s Conductivité thermique de la phase solide ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)

λ_f Conductivité thermique du fluide ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)

n Porosité

Or, ces deux modèles ne fournissent qu'un minimum et un maximum absolu de la conductivité thermique équivalente. Baron [BAR, 88] a montré que la conductivité thermique équivalente du milieu réel se situe entre les valeurs fournies par les deux équations précédentes (Figure II. 3).

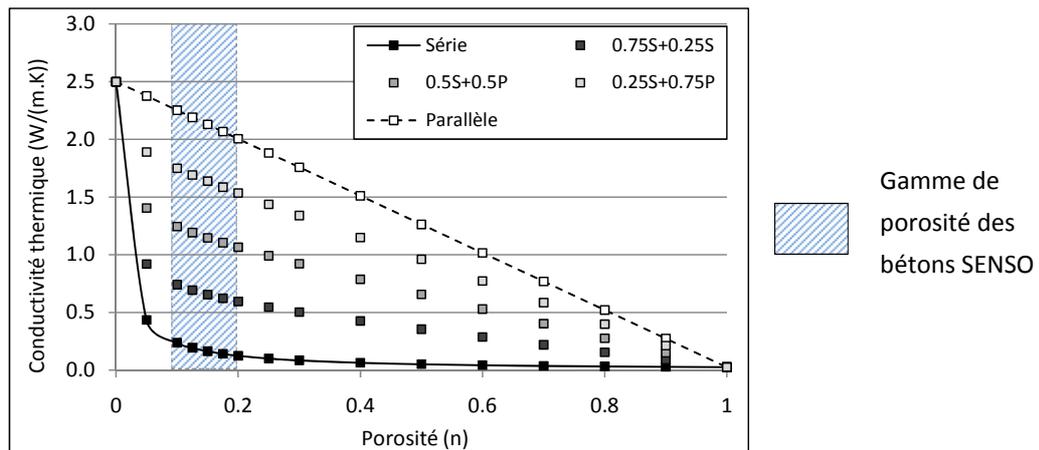


Figure II. 3. Estimation de la conductivité thermique équivalente par la loi d'Ohm

L'équation de la conductivité thermique équivalente prend la forme :

$$\lambda = \alpha.\lambda^p + (1-\alpha).\lambda^s = \alpha[\lambda_s.(1-n_p) + \lambda_f.n_p] + (1-\alpha)\frac{\lambda_f.\lambda_s}{n_s.\lambda_s + (1-n_s).\lambda_f} \quad [II. 3]$$

Avec α Fraction du milieu représentée par le modèle parallèle

$1-\alpha$ Fraction du milieu représentée par le modèle série

La difficulté de cette approche consiste à estimer la part à affecter aux modèles série et parallèle, mais elle permet néanmoins d'obtenir les valeurs extrêmes de conductivité thermique équivalente.

- Modèles par approximation du milieu effectif :

Il s'agit de modèles physiques permettant d'estimer les propriétés effectives (macroscopiques) d'un milieu en se basant sur les propriétés et les fractions relatives de ses différents composants.

En se plaçant dans l'hypothèse d'un système à deux phases, la première représentant la partie solide et la seconde la porosité, où l'on prend la conductivité thermique de la seconde phase égale à 0, on peut utiliser la relation suivante dérivée de l'équation de Maxwell [II. 4] [DOS, 03]:

Modèle 1 :
$$\lambda = \frac{\lambda_s(1-n)}{1+0,5.n} \quad [II. 4]$$

Avec λ Conductivité thermique à la porosité n ($W.m^{-1}.K^{-1}$)

n Porosité

Loeb [LOE, 54] propose une forme modifiée de l'équation [II. 4].

Modèle 2 :
$$\lambda = \lambda_s(1-\beta.n) \quad [II. 5]$$

Avec β Facteur multiplicatif obtenu expérimentalement

β est lié à la géométrie et à l'orientation de la porosité vis-à-vis de la direction du flux de chaleur. L'équation [II. 5] suppose une relation linéaire entre la conductivité thermique et la porosité.

Harmathy propose une expression simplifiée du modèle de Hamilton-Crosser, pour une application aux bétons, que l'on assimile à des solides biphasiques aux propriétés thermiques distinctes [HAR, 70].

Modèle 3 :

$$\lambda = \frac{(1-n).\lambda_s + \delta.n.\lambda_p}{(1-n) + \delta.n} \quad [II. 6]$$

Avec $\delta = \frac{b.\lambda_s}{(b-1)\lambda_s + \lambda_p}$ Conductivité thermique de la phase solide

b Facteur de forme donné par la formule $n=3/\psi$ avec ψ la sphéricité des pores ($b = 3$ pour des particules sphériques). Pour les milieux poreux ordinaires $b=1.5$ [HAR, 70].

La Figure II. 4 illustre les valeurs de conductivité thermique équivalente obtenues, pour les trois modèles d'approximation du milieu effectif, en fonction de la porosité. Ces valeurs ont été calculées pour un béton à l'état sec avec un même λ_s .

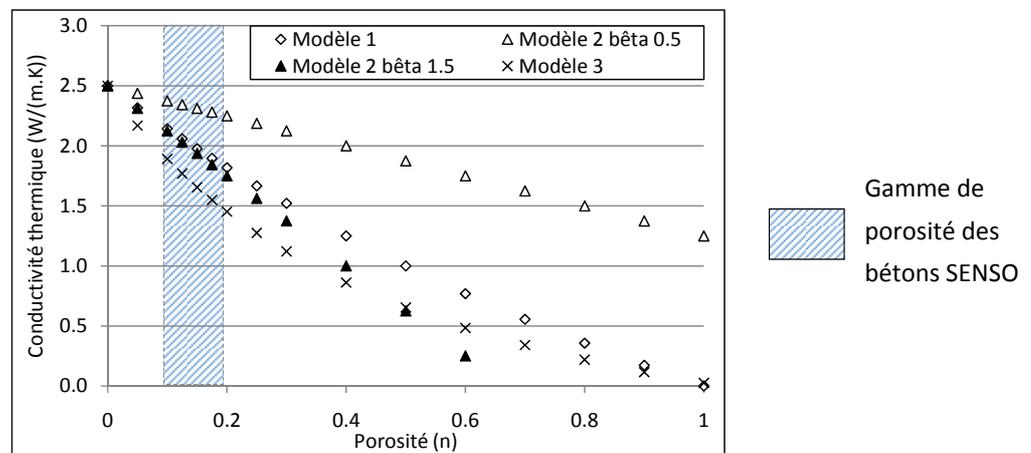


Figure II. 4. Valeurs de conductivité équivalente issues des modèles par approximation du milieu effectif

Le modèle 1 est pseudo-linéaire, très proche des résultats que donneraient le modèle 2 (linéaire) si son coefficient β était connu. Tout deux sont équivalents au modèle parallèle présenté précédemment. Le modèle 3 est quant à lui non linéaire, et plus proche des modèles intermédiaires.

D'autres modèles plus complexes existent. Ils prennent en compte le type de porosité, ouverte ou fermée, ou encore la forme des pores [ZIM, 89]. Filali [FIL, 06] présente dans sa thèse une liste quasi exhaustive des modèles de calcul de la conductivité apparente des milieux granulaires bi-phasiques.

1.1.3. Teneur en eau

La quantité d'eau libre dans le béton a une influence plus importante que la masse volumique sur les variations de conductivité thermique [TAT, 94]. En effet, même si l'eau est

un mauvais conducteur comparée au béton, sa conductivité thermique est élevée face à celle de l'air (plus d'une vingtaine de fois supérieure).

Le Tableau II. 3 donne des valeurs de conductivité thermique pour des bétons contenant des granulats de différentes natures en fonction de leur état de saturation.

Tableau II. 3. Valeurs de conductivité thermique mesurées sur différents béton aux états sec et saturé (d'après [KHA, 02])

Conductivité (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)				
Type de sable	Sable de quartz extrait de terre rougeâtre		Sable de rivière grisâtre contenant des micas	
Etat du béton	Sec	Saturé	Sec	Saturé
Basalte	2,26	3,52	1,97	3,24
Calcaire	2,03	2,92	1,60	2,71
Grès	2,21	3,61	1,91	2,90

La conductivité thermique augmente avec la teneur en eau (Figure II. 1, Tableau II. 1, Tableau II. 3). Campbell-Allen & Thorne [CAM, 63] ont montré que la conductivité thermique d'un béton saturé peut être jusqu'à 70% supérieure à celle d'un béton sec.

Un modèle permet de calculer la conductivité thermique d'un matériau lorsqu'il y a présence d'eau dans la porosité. Ce modèle empirique décrit par Beziat [BEZ, 87] donne la conductivité thermique d'un matériau poreux comme égale à la moyenne géométrique des conductivités de chaque composant (solide, eau et air) pondérés par leur fraction volumique :

$$\lambda = \lambda_s^{(1-n)} \cdot \lambda_e^{n \cdot Sr} \cdot \lambda_a^{n \cdot (1-Sr)} \quad [II. 7]$$

Avec λ_e Conductivité thermique de l'eau

λ_a Conductivité thermique de l'air

Sr Indice de Saturation

La Figure II. 5 illustre l'évolution de la conductivité thermique d'un béton en fonction de sa teneur en eau et de sa porosité, calculée par le modèle de Beziat. Les résultats obtenus par ce modèle semblent cohérents avec la réalité :

- La conductivité thermique diminue avec la porosité ;
- La conductivité thermique augmente avec la teneur en eau.

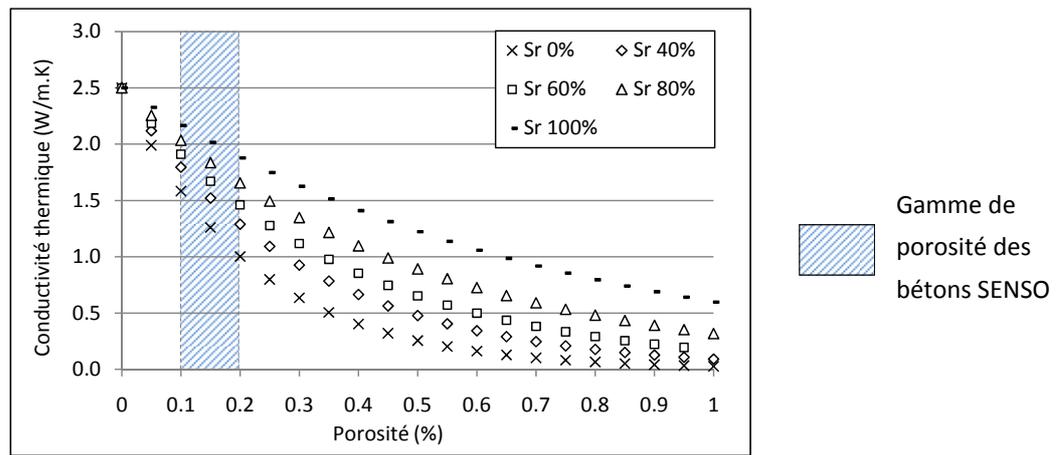


Figure II. 5. Evolution de la conductivité thermique d'un béton en fonction de sa porosité et de sa teneur en eau

On constate sur cette figure que la variation de conductivité thermique entre 10 et 20% de porosité est beaucoup plus importante pour de faibles valeurs de teneur en eau : diminution de 13,7% pour l'état saturé et de 37,5% pour l'état sec.

Ce modèle de calcul de la conductivité thermique est le seul à prendre en compte la saturation du matériau. Or, un béton n'est jamais sec. Nous utiliserons donc dans la suite de ce manuscrit ce modèle [II. 7] pour toute estimation de conductivité thermique.

1.1.4. Température

De nombreuses études ont montré l'existence d'une relation entre température et conductivité thermique [MORa, 01] [KIM, 03]. Cette dernière diminue linéairement avec l'augmentation de la température de l'échantillon (pour des valeurs de températures rencontrées dans la nature).

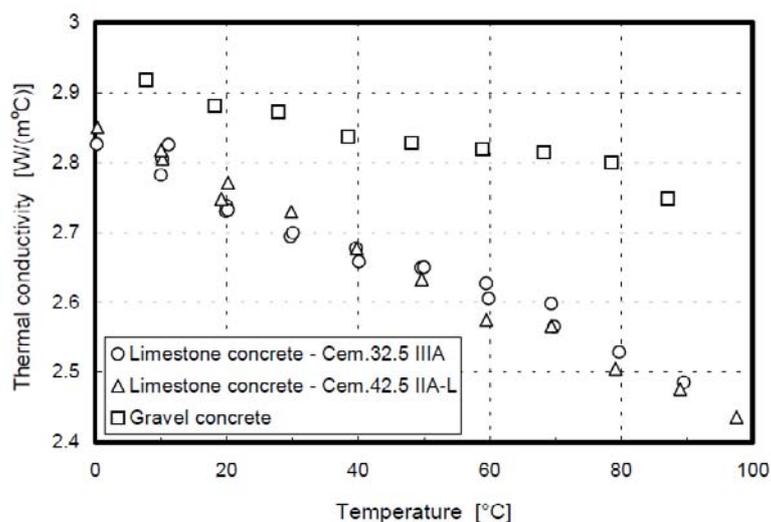


Figure II. 6. Evolution de la conductivité thermique des bétons en fonction de la température du matériau [MORa, 01]

Morabito propose l'utilisation d'une relation linéaire entre la température d'un béton et sa conductivité thermique. Relation de la forme [II. 8]

$$\frac{\lambda_T - \lambda_0}{\lambda_0} = \beta_\lambda \cdot (T - T_0) \quad [II. 8]$$

Avec	λ_T	Conductivité thermique à la température T
	λ_0	Conductivité thermique à la température de référence
	T_0	Température de référence
	β_λ	Pente de la relation déterminée expérimentalement, liée à la nature du granulat

Kim *et al.* [KIM, 03] ont obtenu expérimentalement, pour un béton de rapport e/c de 0,4, l'équation [II. 9].

$$\lambda = 1.05 - 0.0025T \quad [II. 9]$$

Avec	T	Température du matériau (°C)
------	-----	------------------------------

On trouve dans la littérature de nombreuses relations permettant de décrire les liens existants entre conductivité thermique et température du matériau [MORa, 01], [KIM, 03], [DOS, 00]. Toutes sont issues de cas d'études particuliers et nécessitent un calage du modèle sur les échantillons que l'on possède. Cependant, la variation linéaire décrit de manière satisfaisante le comportement observé.

1.1.5. Conclusion

De nombreux paramètres affectent la conductivité thermique d'un béton et il est difficile d'en découpler les effets. Par exemple, lorsque l'on augmente la portion de granulats (conductivité élevée) on augmente également les vides donc la porosité (air conductivité faible). Cependant, la nature du granulat, la porosité et la teneur en eau semblent être les facteurs prédominants sur la conductivité thermique du béton.

Les bétons avec lesquels nous avons travaillé, présentent une gamme de variation de la porosité entre 10 et 20% et une teneur en eau variant de l'état sec à un degré de saturation de 80%. L'équation [II. 7] prédit une plage de variation de la conductivité thermique entre 1 et 2 W.m⁻¹.K⁻¹ pour nos bétons. Si on découple les effets :

- l'évolution de la porosité, d'un béton à l'état sec, entre 12,5 et 18,1% entraîne une diminution de la conductivité thermique de 23% ;
- Le passage de l'état sec à un degré de saturation de 80% pour des porosités de 12,5 et 18,1% conduit respectivement à des augmentations de 26 et 36% de la conductivité thermique.

Les gammes de variations induites par la porosité ou la teneur en eau sont approximativement du même ordre de grandeur même si l'influence de la teneur en eau devient prédominante avec l'augmentation de la porosité.

I.2. Chaleur massique

I.2.1. Nature du granulat

La nature du granulat affecte peu la chaleur massique du béton [TAT, 94], [NEV, 00].

I.2.2. Porosité

La chaleur massique augmente avec la porosité [DOS, 03]. Comme dans le cas de la conductivité thermique, l'air ayant une chaleur massique plus importante que celle du matériau béton (environ 1005 contre 880 J.kg⁻¹.K⁻¹) l'augmentation de la présence d'air dans la porosité augmente la chaleur massique globale du matériau.

I.2.3. Teneur en eau

La chaleur spécifique de l'eau (environ 4000 J.kg⁻¹.K⁻¹) est très supérieure à celle du matériau et de l'air donc en présence d'eau la chaleur spécifique du matériau augmente [DOS, 03] [NEV, 00].

La chaleur massique d'un matériau composé de plusieurs phases peut être calculée selon l'équation de Newmann-Kopp [Il. 10] [DOS, 00], sous la forme d'une loi des mélanges.

$$C_p(t) = \sum_{i=1}^n F_i \cdot C_i(T) \quad [Il. 10]$$

Avec	n	Nombre de phases
	F_i	Fraction massique de chaque phase
	$C_i(T)$	Chaleur spécifique de chaque phase

La Figure II. 7 illustre l'évolution de la chaleur massique en fonction de la teneur en eau et de la porosité pour un béton composé de 3 phases : solide, eau, air.

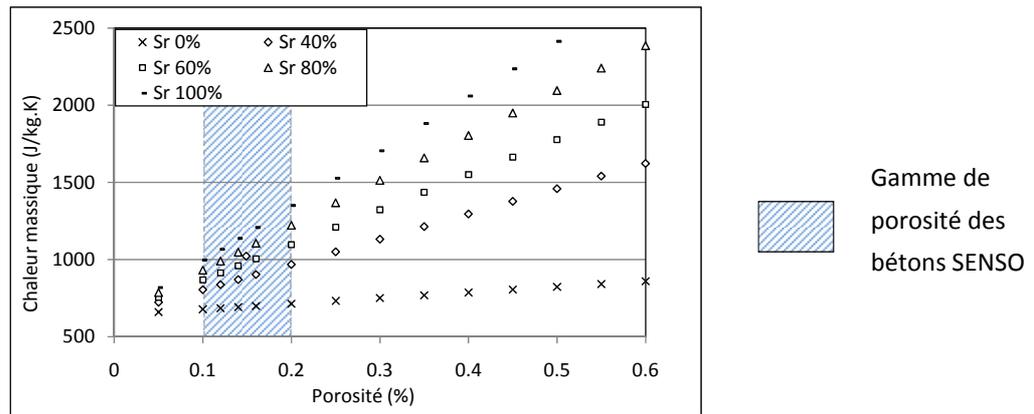


Figure II. 7. Evolution de la chaleur massique en fonction de la teneur en eau et de la porosité du béton

La chaleur massique évolue de façon linéaire avec la porosité. L'influence de la teneur en eau est d'autant plus importante que la porosité est forte.

1.2.4. Température

La chaleur spécifique augmente avec la température Figure II. 8.

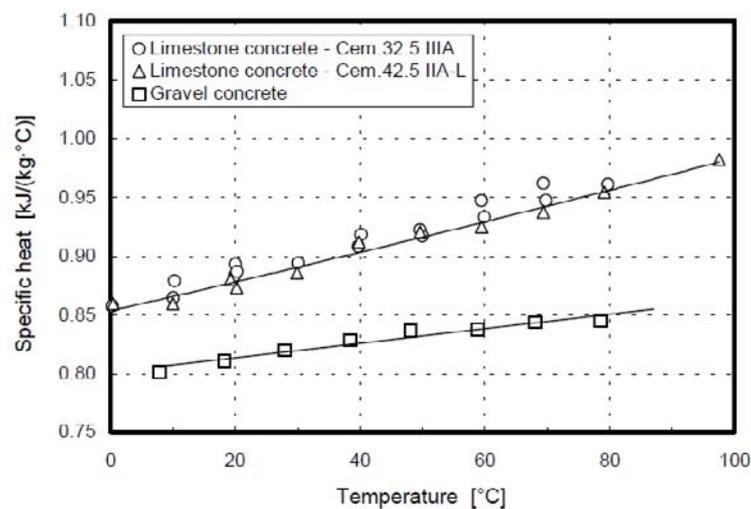


Figure II. 8. Evolution de la chaleur spécifique en fonction de la température du béton [MORa, 01]

La relation entre la température d'un béton et sa chaleur spécifique est linéaire [II. 11]

$$\frac{Cp_T - Cp_0}{Cp_0} = \beta_{Cp} \cdot (T - T_0) \quad [II. 11]$$

Avec Cp_T Chaleur spécifique à la température T

Cp_0 Chaleur spécifique à la température de référence

T_0 Température de référence

β_{Cp} Pente de la relation déterminée expérimentalement

1.2.5. Conclusion

La chaleur massique du béton répond à une loi des mélanges entre les chaleurs massiques des différentes phases qui le compose.

De la même façon que pour la porosité il est possible de déterminer, à l'aide de l'équation [II. 10] les valeurs théoriques de chaleur massique des bétons servant dans notre étude. Pour une porosité variant entre 12,5 et 18,1, la chaleur massique augmente de 3% à l'état sec et de 14% pour un degré de saturation de 80%. A une porosité donnée, l'augmentation de la chaleur massique est beaucoup plus importante, de l'ordre de 32% pour une porosité de 12,5 et de 36% pour une porosité de 18,1.

La teneur en eau semble être le facteur prédominant sur la chaleur massique du matériau.

1.3. Bilan : Influence sur les mesures des variations de propriétés thermiques du béton

Les facteurs influençant principalement les propriétés thermiques du béton sont la porosité, la teneur en eau et la nature du granulat. Le Tableau II. 4 récapitule les effets de la porosité et de la teneur en eau sur l'évolution des propriétés thermiques du matériau.

Tableau II. 4. Influence de la porosité et de la teneur en eau sur les propriétés thermiques du béton

Alors Si	Conductivité thermique (Chap.2 § I.1)	Chaleur massique (Chap.2 § I.2)	Diffusivité thermique (Chap.1 §III.3)
Porosité augmente	↘	↗	↘
Teneur en eau augmente	↗	↗	↘

L'inertie thermique du matériau est étroitement liée à sa diffusivité thermique : l'inertie augmente lorsque la diffusivité diminue. Pour rappel, la diffusivité thermique décroît avec l'augmentation de la porosité et de la teneur en eau [MAJ, 90] (Part 1 §III.5). Il y a donc augmentation du temps de réponse des matériaux avec la porosité et la teneur en eau. Si cet effet est suffisamment important, un suivi temporel du matériau, qui devra être en phase de retour à l'équilibre thermique avec son environnement, devrait permettre d'identifier ces variations de propriétés et donc des variations de porosité et/ou de teneur en eau.

Maierhofer *et al* [MAI, 07] ont étudié numériquement l'influence des variations des propriétés du béton sur la détection de vides par thermographie infrarouge pulsée. La Figure II. 9 illustre l'évolution du contraste de température maximum ΔT_{max} et l'instant où apparaît ce ΔT_{max} en fonction de la conductivité thermique ou de la masse volumique du béton. Les résultats présentés ont été obtenus pour un temps de chauffage simulé de 30 min pour un défaut situé à 6 cm de profondeur.

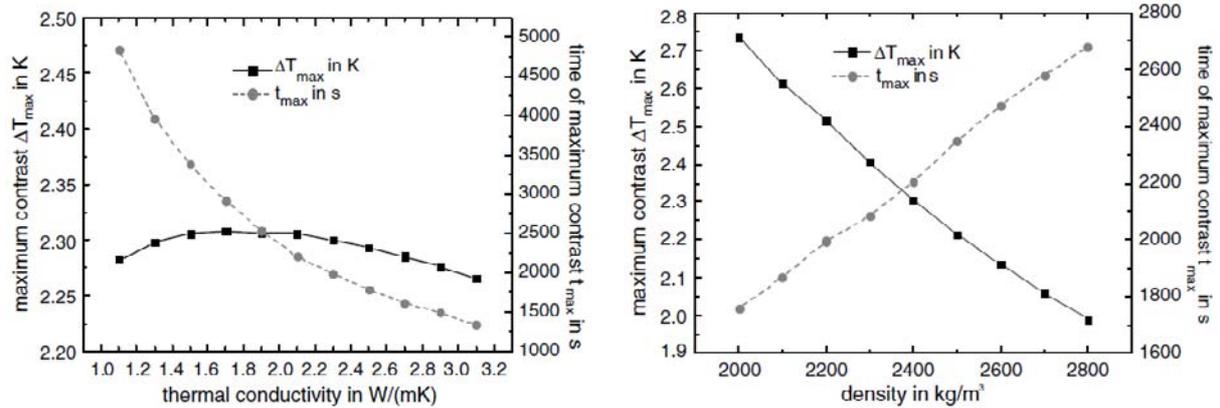


Figure II. 9. Evolution du contraste de température maximum ΔT_{max} et temps t_{max} en fonction (Gauche) de la conductivité thermique, (Droite) de la masse volumique [MAI, 07]

Leur étude montre qu'une augmentation de 182% de la conductivité thermique entraîne une variation de +/- 2% du contraste de température alors qu'une augmentation de 40% de la masse volumique entraîne une diminution de 27% du contraste de température. L'influence de la masse volumique du béton (et par analogie de la chaleur massique) est donc prédominante sur celle de la conductivité thermique.

II. Etude de l'influence de la composition des bétons sur leur réponse aux sollicitations thermiques

Les résultats présentés dans cette étude ont été obtenus dans le cadre du projet ANR-SENSO « Stratégie d'Evaluation Non Destructive pour la Surveillance des Ouvrages en béton ».

Dans un premier temps une description du projet ainsi que de ses objectifs est faite puis on décrira plus précisément les corps d'épreuve ainsi que les mesures expérimentales réalisées. Nous terminerons par l'analyse des résultats obtenus.

II.1. Projet SENSO

II.1.1. Présentation

Le Projet SENSO « Stratégie d'Évaluation Non Destructive pour la Surveillance des Ouvrages en béton » est un projet national de recherche ANR-Réseau Génie Civil et Urbain. Débuté en janvier 2006 pour une durée de trois ans, ce programme de recherche est piloté par le Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions (LMDC) basé à l'INSA et à l'Université Paul Sabatier de Toulouse. Le projet regroupe 12 partenaires des domaines privés et publics de toute la France. Il vise à établir des procédures d'auscultation non destructive des ouvrages conduisant à une évaluation quantitative des principaux indicateurs *in situ* de la qualité du béton, ceci sans porter atteinte à la structure.

Les indicateurs ciblés sont : la porosité, la teneur en eau, la teneur en chlorures, la rigidité, la résistance mécanique, les indicateurs de macro-fissuration (ouverture, profondeur, remplissage), le coefficient de perméabilité, le coefficient de diffusion, la profondeur de béton carbonaté... [LMD, 09]. Pour accéder à ces indicateurs, les différentes équipes doivent déterminer la sensibilité de leurs techniques d'investigation pour tel ou tel paramètre et améliorer la procédure d'analyse, en particulier, en développant l'utilisation combinée des résultats issus de plusieurs méthodes.

Les familles de techniques d'investigation utilisées par les différentes équipes sont : le RADAR, la résistivité et la capacité électrique, la thermographie infrarouge et les ultrasons.

L'objectif final de ce projet est de déterminer des combinaisons de méthodes (non destructives) complémentaires qui permettront d'estimer au mieux l'état d'endommagement des ouvrages.

II.1.2. Stratégie générale

Le projet SENSO peut se découper en trois grands volets (Figure II. 10):

✓ Un volet expérimental

On trouve à l'intérieur de ce volet deux étapes de mesure en laboratoire et une étape de mesures *in situ*. Il va permettre d'acquérir un ensemble de données qui serviront pour les deux volets suivants.

Les mesures en laboratoire sur dalles homogènes s'effectuent en quatre campagnes : première campagne : dalles sèches S1, deuxième campagne : dalles saturées S5, troisième campagne: dalles avec des taux de saturation intermédiaire S2, S3, S4, et dernière campagne regroupant l'étude des chlorures et de la carbonatation.

Trois maquettes « murs » ont été réalisées pour faire le lien entre dalles expérimentales et conditions réels de mesure *in situ*. Elles ont des compositions similaires à celle des dalles de laboratoire.

Deux ouvrages réels ont été retenus comme sites test : les quais du Port Autonome de Nantes – Saint-Nazaire (PANSN) et la base sous-marine de Bordeaux. Les mesures réalisées sur ces ouvrages constituent une base de données. Elles servent de base au diagnostic des ouvrages, en employant les outils développés dans le deuxième volet. Des tests destructifs avec essai en laboratoire ont été réalisés une fois toutes les mesures effectuées.

✓ Un volet de modélisation et d'analyse de données

La réussite de ce volet repose sur la rigueur de toutes les équipes lors des mesures. En effet, pour chacun des objets étudiés une nomenclature stricte et des points de mesures référencés ont été définis. Cette rigueur permet d'obtenir des données comparables entre méthodes pour un point donné. De plus, chaque équipe doit fournir les « observables » (exemple pour la résistivité électrique : la résistivité apparente) de sa technique à un format prédéfini. Ce formatage des données est nécessaire à la constitution de la base de données ainsi qu'à l'analyse statistique.

La démarche générale de ce volet consiste donc à centraliser et consolider les données de chacune des équipes, pour obtenir une base de données « propre ». A partir de cette base de données, une analyse statistique (détaillée au Chapitre 4) permet la sélection des observables les plus pertinents pour la recherche des indicateurs visés. Ceci est rendu possible par l'élaboration de critères de qualité. Les observables ainsi sélectionnés sont intégrés dans des procédures de combinaison et de fusion de données, aboutissant à un diagnostic du matériau.

✓ Un volet de validation des résultats

Ce volet a permis de clore le projet SENSO en testant les méthodologies d'investigation et de fusion de données retenues. Lors de la « Journée de restitution des connaissances », qui s'est déroulée en juillet 2009 à l'Université Paul Sabatier de Toulouse, des essais en aveugle sur des dalles de béton ont été réalisés. Ces essais ont permis de mettre en œuvre en direct, chacune des techniques de CND utilisées ainsi que la méthodologie développée dans SENSO. Les résultats de la démarche générale ont été concluants et ont suscité un réel intérêt de la part des participants.

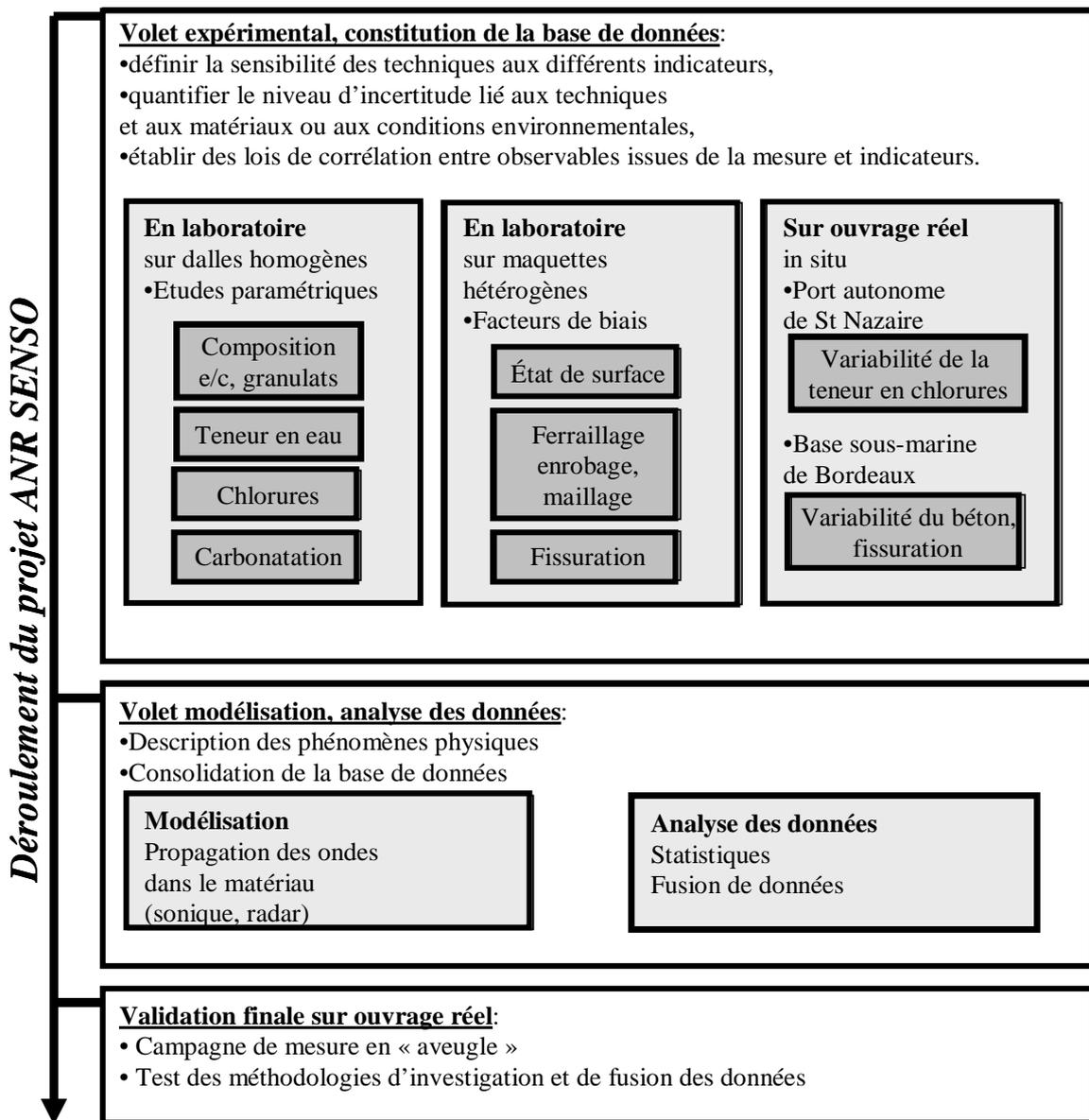


Figure II. 10. Déroulement du projet SENSO

Les résultats présentés dans la suite de ce chapitre appartiennent au volet expérimental du projet SENSO, et plus précisément à la phase de mesures sur éprouvettes béton de composition maîtrisée.

II.1.3. Qu'attend-on nous de la thermographie infrarouge ?

La thermographie infrarouge fait partie des 6 familles de techniques sélectionnées par le projet. On souhaite étudier la capacité de cette mesure à identifier les indicateurs recherchés. Néanmoins, connaissant les paramètres influents sur la mesure (propriétés thermiques du matériau dont les facteurs de variation ont été décrits précédemment) on se limitera à la recherche de variations de porosité et de teneur en eau.

La réponse des matériaux aux sollicitations thermiques est liée à leurs propriétés thermiques. L'augmentation de la conductivité thermique ou la diminution de la chaleur

massique entraîne une diminution de l'inertie thermique des matériaux. A partir de cette remarque on s'attend à observer :

- Une augmentation de l'inertie thermique du béton avec la porosité. L'étude bibliographique a montré que la conductivité thermique diminue avec la porosité tandis que la chaleur massique augmente ;
- Une influence moindre de la teneur en eau, les effets de la conductivité thermique et de la chaleur massique étant opposés. Cependant la chaleur massique ayant une influence prédominante sur la diffusivité thermique (Chap.2 §1.3), l'augmentation de la teneur en eau entraînera également une augmentation de l'inertie thermique.

Lorsque des matériaux aux propriétés thermiques différentes sont à l'équilibre thermique avec leur milieu ils présentent tous la même température de surface. Il est nécessaire pour observer leurs variations de propriétés de les soumettre à une sollicitation thermique. On peut alors enregistrer l'évolution de leurs températures de surface et travailler sur le « temps de réponse » des différents bétons. Les résultats des études expérimentales et numériques menées sur la capacité de la thermographie infrarouge à détecter des variations de porosité et de teneur en eau sont présentés dans la suite de ce chapitre.

II.2. Etude expérimentale de l'influence de la porosité et de la nature de granulats sur la mesure de thermographie infrarouge

II.2.1. Objectifs

Afin de définir l'aptitude de la thermographie infrarouge à déterminer la composition d'un béton, nous avons étudié l'influence de la porosité et de la nature du granulats sur les cinétiques de refroidissement de corps d'épreuve. Pour cela, des mesures ont été réalisées sur des dalles en béton dont le rapport e/c, la nature ou la taille du granulats varie.

II.2.2. Présentation des corps d'épreuves

Les dalles utilisées pour le volet expérimental ont pour dimensions 50 x 25 x 12.5 cm (Figure II. 11). 9 gâchées de 10 dalles ont été coulées, les caractéristiques des 9 gâchées sont regroupées dans le Tableau II. 5 :



Figure II. 11. Dalle SENSO de dimensions 50x25x12,5 cm

Tableau II. 5. Composition et propriétés des dalles SENSO

Gâchée	G1	G2	G3	G3a	G7	G8	G4	G5	G6
Nature et taille des granulats	Siliceux roulés 0-1 2,5mm						Siliceux roulés 0-20mm	Siliceux concassés 0-1 2,5mm	Calcaires concassés 0-1 2,5mm
Rapport E/C	0,30	0,45	0,55	0,55	0,65	0,90	0,55	0,55	0,55
Porosité mesurée à l'eau (%)	12,5	14,3	15,5	16	15,9	18,1	14,2	15,2	14,9
Masse volumique sèche (kg/m ³) [CV %]	2354 [0,62]	2305 [0,31]	2287 [0,50]	2277 [0,20]	2288 [0,34]	2230 [0,23]	2290 [0,34]	2306 [0,44]	2377 [0,34]
Masse volumique humide (kg/m ³) [CV %]	2416 [0,34]	2432 [0,67]	2429 [0,97]	2427 [0,24]	2432 [0,30]	2396 [0,35]	2441 [0,34]	2447 [0,42]	2525 [0,26]

Les dalles représentent un cas d'étude idéal : elles sont homogènes (absence de ferrailage), entre chacune des gâchées un seul paramètre varie par rapport à la gâchée de référence (G3), les surfaces de mesure sont lisses et propres.

Le choix de ne faire varier qu'un seul paramètre dans chacune des gâchées repose sur le besoin de connaître pour chaque méthode les facteurs ayant une influence prédominante sur la mesure :

- les gâchées G3 et G3a sont de même composition. Ceci va permettre de voir les gammes de variations de chaque mesure pour deux bétons de compositions identiques mais mixés et coulés en deux fois ;

- entre les gâchées G1, G2, G3, G7, G8, seul le rapport massique e/c varie. Celui-ci conditionne la porosité et va donc permettre de déterminer si la méthode est sensible ou non à ce facteur ;
- entre les gâchées G3 et G4 seule la taille des granulats ;
- les gâchées G3 et G5 ont été fabriquées pour déterminer la sensibilité à la forme du granulat (roulés ou concassés) ;
- les gâchées G3 et G6 ont des granulats respectivement siliceux et calcaire, elles permettront de mesurer l'influence de la nature pétrographique du granulat.

II.2.3. Protocole expérimental

Toutes les mesures présentées ont été réalisées à l'aide d'une caméra ThermaCAM™ SC 2000 FLIR Systems (Figure II. 12) qui capte les rayonnements dans une **fenêtre 7 – 13 μm**. La caméra utilisée est parfaitement adaptée aux conditions de mesures en génie civil avec des gammes de températures équivalentes aux variations naturelles de températures.

Caractéristiques de la caméra [FLI, 01] :

- Étendue de mesure : -40 à 500°C
- Champ de vue : 24° x 18°; grand angle 45°x 34° (objectif souvent utilisé dans le projet SENSO)
- Distance minimale de focalisation : 0,5 mètre
- Résolution spatiale (IFOV) : 1,3mrad en standard et 2,6 mrad avec le grand angle ;
- Résolution thermique : 1°C
- Sensibilité thermique : <0,08°C à 30°C
- Précision des mesures : 2%



Figure II. 12. Caméra ThermaCAM™ SC 2000 FLIR Systems

Rq : La caméra infrarouge est un outil complexe composé de plusieurs éléments. Lorsqu'elle est éteinte, ses différents composants sont froids. Après allumage la caméra chauffe et si l'on mesure une surface on observe une dérive de la température apparente de cette surface jusqu'à une stabilisation. L'étalonnage de la caméra a donné un temps de stabilisation d'une heure de chauffe.

II.2.3.1. Conditionnement des corps d'épreuves

Afin d'étudier uniquement l'influence de la porosité et de la nature du granulat sur les mesures, les corps d'épreuve ont été séchés jusqu'à masse constante et conservés en étuve à une température d'environ 60°C.

Rq : La répartition de la chaleur à l'intérieur de l'étuve n'étant pas homogène (variation de la température entre 50 et 70°C), toutes les dalles ne présentent pas à la sortie de l'étuve la même température.

II.2.3.2. Protocole de mesure³

Les mesures consistent à enregistrer au cours du temps l'évolution de la température de surface des dalles. Celles-ci, conservées à une température d'environ 60°C en étuve, se refroidissent progressivement pour atteindre l'équilibre thermique avec l'air environnant (Figure II. 13). Pour des raisons logistiques les mesures n'ont pas pu être réalisées durant la nuit, entraînant un trou dans l'acquisition des mesures.

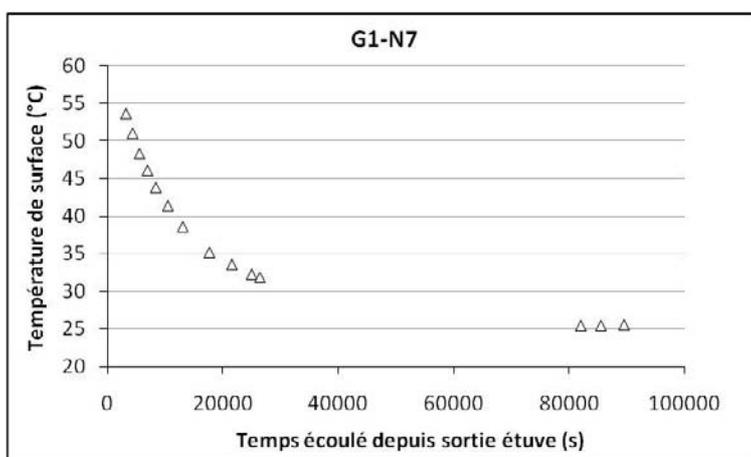


Figure II. 13. Exemple d'enregistrement de la température de surface d'une dalle

Le nombre de dalles étant très élevé (90) il n'est pas envisageable de les suivre individuellement. Les mesures ont donc été réalisées par groupe de 9 dalles (soit 10 configurations), disposées en mosaïque comme présenté à la Figure II. 14. Chaque configuration, numérotée de A à J, contient une dalle de chaque gâchée (Annexe II. 1).



Figure II. 14. Disposition des dalles pour les mesures de thermographie infrarouge (Configuration B)

³ Le protocole de mesure et les mesures ont été définis et réalisés dans le cadre de travaux antérieurs à cette thèse, par Stéphane Lanot-Grousset. Les résultats présentés dans ce chapitre reposent donc sur des données existantes.

Rq : Les conditions de refroidissement des dalles sont différentes (Figure II. 16) selon leur positionnement dans la série du fait de conditions aux limites différentes (Figure II. 15) :

-  Condition n°1 : dalle au centre avec une seule surface d'échange ;
-  Condition n°2 : quatre dalles avec deux surfaces d'échange ;
-  Condition n°3 : quatre dalles avec trois surfaces d'échange avec l'air.

1	2	3
4	5	6
7	8	9

Figure II. 15. Surfaces d'échanges air – dalle

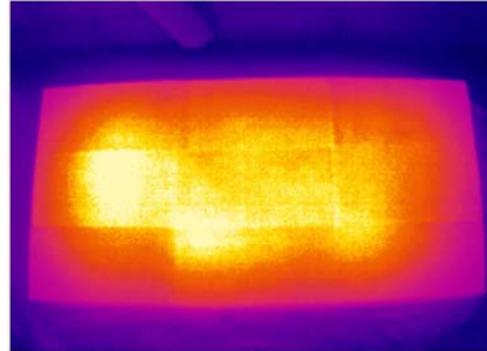


Figure II. 16. Effet de bords (Config B à $t=21000s$)

Pour étudier l'influence des conditions aux limites, un système de configuration tournante a été utilisé. On fait tourner la position d'une gâchée entre chaque configuration (la configuration A est doublée par la J). De cette manière, chaque béton se voit exposé à tous les types de conditions aux limites (Annexe II. 1).

L'étude veut montrer la capacité de la thermographie à distinguer des bétons de porosité ou de nature de granulats différentes. Pour cela, on souhaite comparer directement l'évolution des courbes de refroidissement des différents bétons. Or, la répartition des températures à l'intérieur de l'étuve n'étant pas homogène, les températures initiales des dalles ne seront pas les mêmes pour tous les échantillons. Pour tenter de pallier ce problème, la semaine précédant les mesures, les dalles ont été réorganisées dans l'étuve de manière à ce que les 9 dalles d'une série se trouvent au même niveau dans l'étuve (Annexe I. 1).

Les corps d'épreuve ont été sortis de l'étuve par palette : 45 dalles.

L'enregistrement des images est réalisé manuellement à l'aide de la caméra infrarouge. Celle-ci est positionnée sur une table face à la série de dalles à enregistrer. Les mesures sont réalisées avec un objectif grand angle par vue plongeante. L'agencement général des séries est donné sur la Figure II. 17.

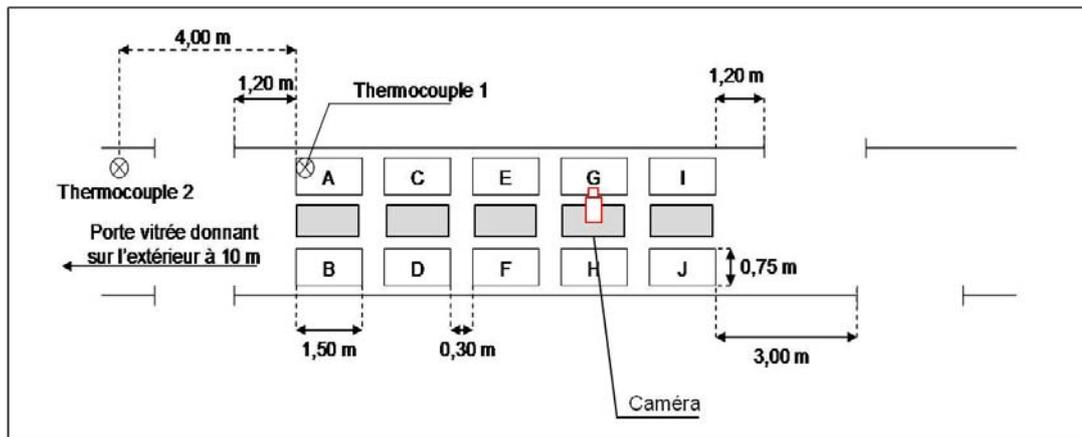


Figure II. 17. Schéma d'installation des séries de dalles pendant les mesures à l'état sec (Série G)

II.2.4. Traitements des mesures

L'extraction des données est réalisée à l'aide du logiciel Thermacam Researcher 2001. Ce logiciel spécifique permet de lire les images infrarouge enregistrées par la caméra et d'obtenir des valeurs de températures apparentes pour la surface étudiée.

La récupération des températures de surface des dalles s'effectue sur des surfaces rectangulaires finies. La dimension et l'emplacement de ces zones (« masques ») ont été choisis a posteriori afin d'avoir une surface la plus homogène possible et peu affectée par les effets de bords (Figure II. 18). On obtient ainsi à chaque pas de temps et pour chacune des dalles une température de surface apparente moyenne sur la zone étudiée.

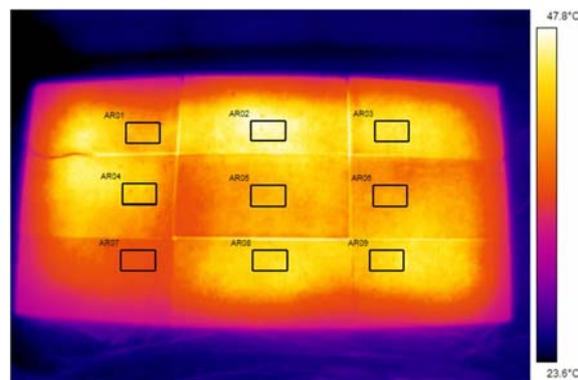


Figure II. 18. Surfaces utilisées pour le calcul de la température moyenne de surface (Config A)

Les données numériques ainsi récoltées sont ensuite utilisées dans un tableur (Excel) pour analyse des résultats.

II.2.5. Résultats des mesures

On obtient pour chaque dalle une courbe de refroidissement, fonction des propriétés intrinsèques du béton. On s'intéresse à la cinétique de ces courbes pour identifier ou non

des comportements différents entre les bétons. Pour cela, on va tout d'abord comparer les courbes entre elles puis caler des modèles empiriques pour remonter à des valeurs de chaleur massique et de conductivité thermique.

Lors du dépouillement des images, de nombreux biais sont apparus, parmi lesquels :

- La non homogénéité des températures initiales des dalles due à une répartition non homogène des températures dans l'étuve ;
- Des effets de bords importants ;
- Questionnement sur le choix du t_0 des mesures. Le moment où la palette est sortie de l'étuve est-il le meilleur t_0 ou aurait-il fallu prendre pour chaque dalle un t_0 différent correspondant à l'instant moment où la surface de la dalle est mise au contact direct avec l'air (moment où la dalle supérieure sur la palette est retirée) ?

Ces différents biais de mesure posent la question de la fiabilité de la mesure et des résultats qui en découlent. Pour limiter le plus possible l'impact de ces biais, on a :

- Vérifié par une étude de l'influence des conditions aux limites, que les petites zones sur lesquelles on a effectué les mesures étaient homogènes entre configurations ;
- Recherché les dalles ayant les mêmes températures initiales.

II.2.5.1. Influence des conditions aux limites

Comme décrit précédemment, les dalles possèdent selon leur emplacement dans les séries des conditions aux limites qui varient. Afin d'étudier l'influence de ces différentes conditions aux limites, une étude comparative de l'évolution des températures de surface en fonction des conditions aux limites gâchée par gâchée a été menée. Les résultats présentés par la suite sont ceux obtenus sur la gâchée de référence G3. Les résultats obtenus pour les autres gâchées sont similaires et visibles en Annexe II. 2.

Les courbes de température de chacune des 9 dalles de la gâchée G3 ont été récupérées et compilées pour produire le graphique présenté en Figure II. 19. La dalle numérotée n°1 provient de la configuration C, la n°2 de la configuration B, la n°3 de la configuration A ..., le numéro de la dalle faisant référence à son emplacement comme défini sur la Figure II. 15.

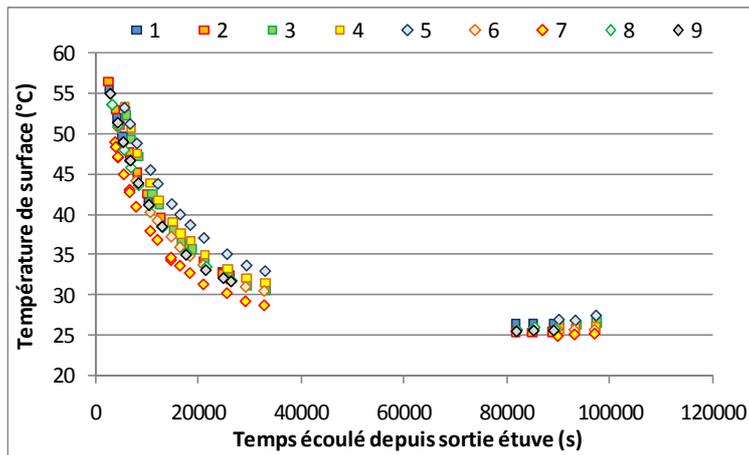


Figure II. 19. Evolution des températures de surface des dalles de la gâchée G3 en fonction de leur position dans les séries de mesure

La Figure II. 19 montre que l'allure générale de l'ensemble des courbes est identique suivant une décroissance exponentielle des températures en fonction du temps. Cependant, on note que les températures initiales de toutes les dalles ne sont pas identiques, induisant des refroidissements différents entre les dalles d'une même gâchée. Ceci entraîne une forte variabilité de la mesure. Néanmoins il a semblé intéressant de comparer les mesures par palette ainsi que par type de conditions aux limites afin de déterminer ce qui de l'emplacement dans l'étuve (dont d'écoule la température initiale) ou de la position dans la configuration a l'influence la plus marquée sur la mesure.

Les Figure II. 20 et Figure II. 21 présentent l'évolution des températures de surface des dalles de composition G3 entreposées respectivement sur les palettes 1 ou 2. La légende donne le numéro des dalles suivant l'ordre des mesures.

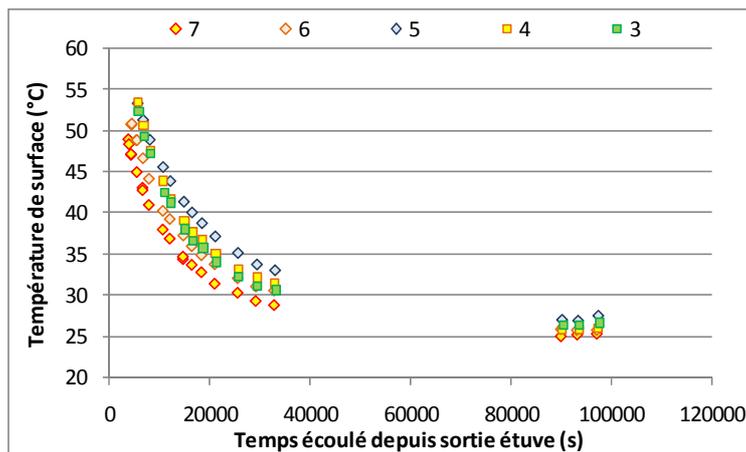


Figure II. 20. Evolution des températures de surface des dalles de composition G3 entreposées sur la palette 1

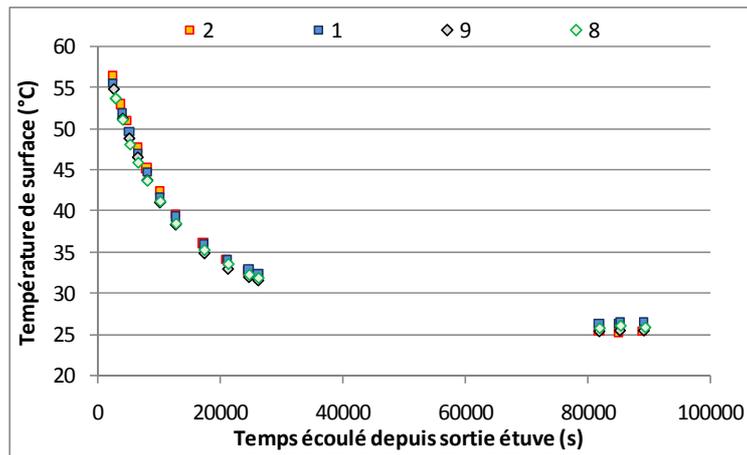


Figure II. 21. Evolution des températures de surface des dalles de composition G3 entreposées sur la palette 2

On constate une répartition très hétérogène des courbes de refroidissement des dalles issues de la palette n°1 avec des températures initiales variant de 49 à 53,5°C. La dalle n°7 est la première à avoir été installée et mesurée. Malgré cela, elle présente la température initiale la plus faible. On a donc un gradient de température verticale dans l'étuve avec les températures les plus faibles en haut (palette 1).

En revanche, les courbes de température des dalles entreposées sur la palette n°2 (dalles possédant 2 ou 3 surfaces d'échanges avec l'air) sont proches avec des températures de surface initiales comprises entre 55 et 56,5°C. Si on s'intéresse à la partie des courbes où les dalles sont en équilibre thermique avec le milieu (après 80000 s), on voit apparaître une variabilité des mesures. Le Tableau II. 6 présente les écarts de températures maximums relevés entre deux dalles d'une gâchée.

Tableau II. 6. Variabilité des températures de surface des dalles d'une même gâchée

Gachée	G1	G2	G3	G3a	G7	G8	G4	G5	G6
Ecart de Température maximum (°C)	0,30	0,80	1,00	1,00	0,60	0,60	1,00	0,90	0,50

Dans les conditions expérimentales présentes, un écart de 1°C minimum nous paraît donc nécessaire pour être sûr d'observer des variations significatives de température. En dessous, on sera en présence de bruit de mesure.

Les résultats observés pour les autres gâchées montrent les mêmes tendances à savoir une variabilité très importante entre les mesures issues des dalles entreposées sur la palette n°1 et une faible dispersion entre les mesures issues des dalles de la palette n°2. On choisira donc pour l'étude de l'influence de la porosité sur la cinétique de refroidissement des bétons des dalles issues préférentiellement de la palette n°2. Les mesures issues de la palette n°1 apparaissent inexploitable du fait d'une variabilité trop importante des mesures.

Les Figure II. 22 et Figure II. 23 montrent l'évolution de la température de surface des dalles de composition G3 en fonction de leurs conditions aux limites.

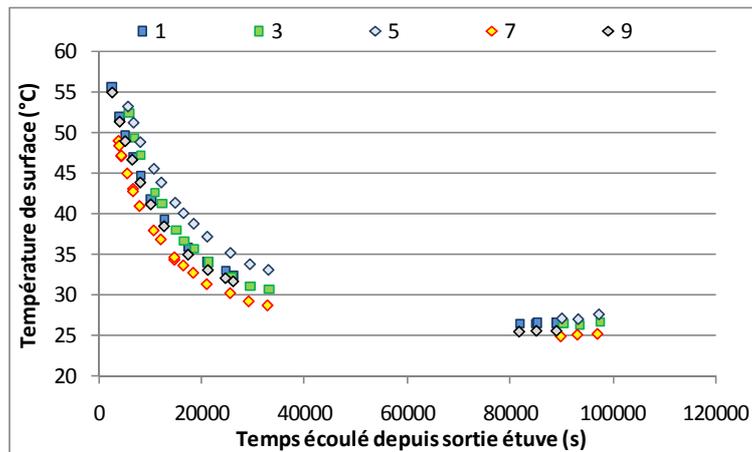


Figure II. 22. Températures de surface des dalles G3 ayant 1 ou 3 surfaces d'échange avec l'air

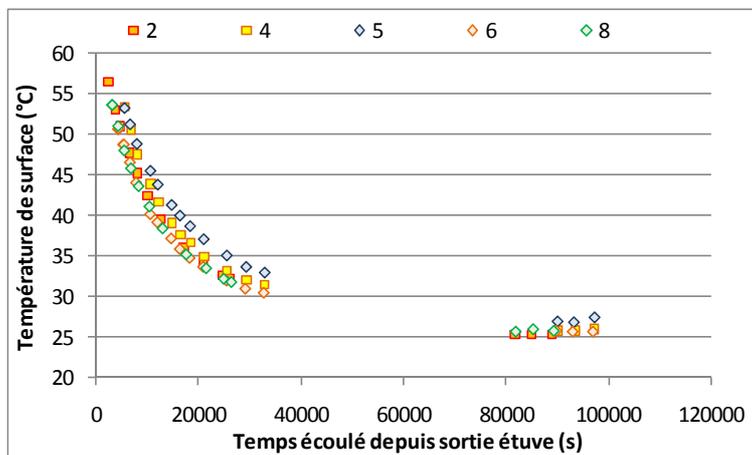


Figure II. 23. Températures de surface des dalles G3 ayant 1 ou 2 surfaces d'échange avec l'air

La variabilité des mesures observée sur les Figure II. 22 et Figure II. 23 est importante, avec une amplitude d'environ 5°C à 20000 secondes.

Le lien éventuel entre les conditions aux limites des dalles et leur refroidissement est masqué par la variabilité due à la palette d'origine. Cette observation va permettre de poser des hypothèses simplificatrices pour l'adaptation d'un modèle numérique aux mesures.

L'étude sur l'influence des conditions aux limites des dalles a permis de montrer que :

- Il sera préférable d'utiliser pour l'étude de l'influence de la porosité et de la nature du granulat les dalles issues de la palette 2 ;
- Les conditions aux limites n'ayant pas d'influence notable sur la mesure de température de surface (sur la zone de référence utilisée pour le dépouillement), il est possible d'utiliser un modèle de conduction de la chaleur 1D ;

- Un écart de température de 1°C minimum sera nécessaire pour être sûr d'être en présence d'une variation des propriétés thermiques du matériau.

II.2.5.2. Influence de la porosité

La gamme de variation de porosité étudiée dans le projet SENSO est large (d'un béton G1 de porosité 12,5 % à un béton G8 de porosité 18,1 % Tableau II. 5). A partir des observations faites précédemment, l'étude de l'influence de la porosité a été menée exclusivement sur les dalles issues de la palette 2.

Le t_0 des mesures correspond à l'instant où la palette 2 a été sortie d'étuve. Aucune mesure infrarouge n'ayant été réalisée à cet instant la température initiale des dalles est inconnue. L'instant de la première mesure varie entre $t=2460$ et $t=3060$ secondes. Le Tableau II. 7 contient les temps auxquels ont été prises les premières images infrarouges pour les dalles de la gâchée G1 des configurations F à I.

Tableau II. 7. Tableau récapitulatif des temps de prise des premières mesures des dalles de composition G1

Configuration	F	G	H	I
Temps première mesure (s)	2460	2580	2760	3060

Lorsque l'on s'intéresse au début du signal, entre $t=0$ et $t=8000$ s, on observe une décroissance exponentielle de la température de surface des dalles (Figure II. 24). Il est alors possible en utilisant les courbes de tendance Excel d'estimer la température initiale des dalles. Nous avons appliqué ce traitement à chacune des dalles de la palette 2 et sélectionner pour la suite de l'étude les dalles dont les températures initiales sont comprises dans un intervalle de 1°C (limite de variabilité déterminée précédemment).

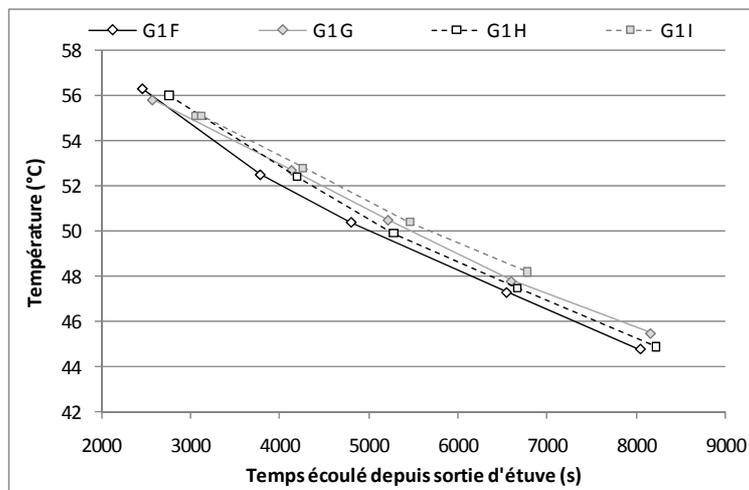


Figure II. 24. Décroissance exponentielle de la température de surface des dalles

La Figure II. 25 illustre, pour une dalle de chaque composition, les courbes d'évolution de la température de surface.

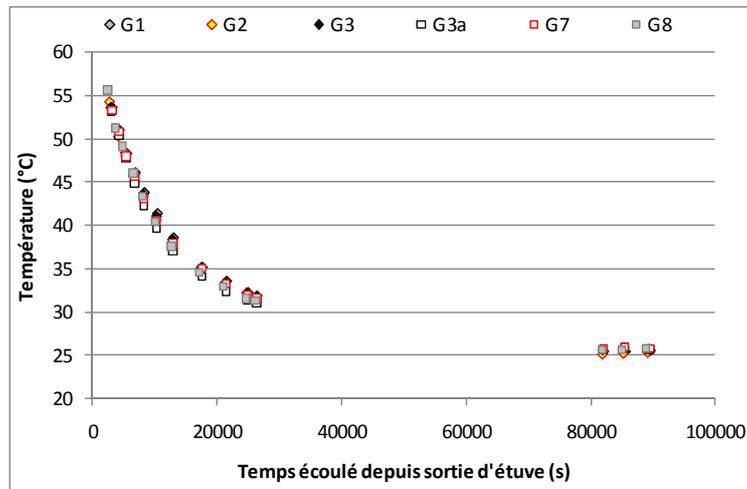


Figure II. 25. Influence de la porosité sur les courbes de refroidissement des bétons

Les 6 courbes de refroidissement sont quasiment superposables. Il n'est pas possible avec ces seules courbes de trancher sur l'existence d'un lien entre porosité et vitesse de refroidissement. Pour ce faire, on a calculé à chaque pas de temps de contraste de température absolu (Chap.1 §IV.2.1.1) entre la température de surface de la gâchée G3 (béton de référence) et celles des autres gâchées. Les résultats de ces calculs sont visibles sur la Figure II. 26. On s'est également intéressé aux contrastes de température entre deux gâchées ayant approximativement la même porosité, G3a et G7 de porosités respectives 16 et 15,9%, et entre deux gâchées aux porosités éloignées, G1 et G8, de porosités respectives 12,5 et 18,1%. Ces résultats sont donnés sur la Figure II. 27.

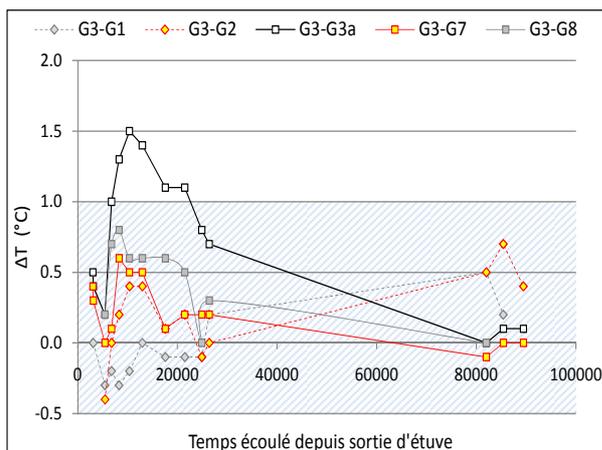


Figure II. 26. Contrastes de température entre la gâchée de référence G3 et les autres gâchées

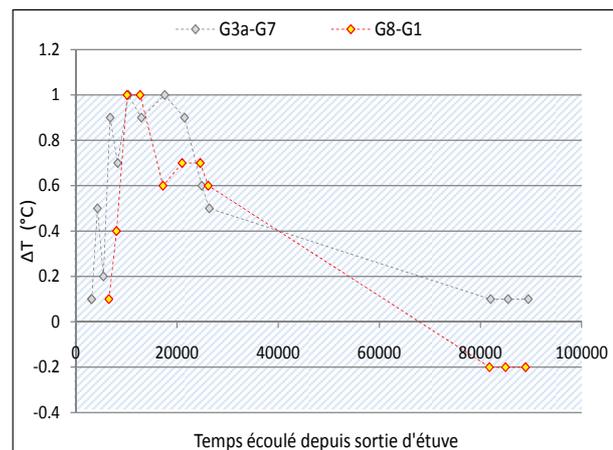


Figure II. 27. Contrastes de température entre les gâchées aux porosités les plus proches et les plus éloignées

La zone hachurée représente les contrastes de température considérés comme non significatifs. Sur la Figure II. 26 seule la gâchée G3a se démarque. Ce résultat est surprenant

car la gâchée G3a a une porosité intermédiaire entre celles des gâchées G1 et G8 noyées dans la masse.

D'une manière générale, il apparaît que la thermographie infrarouge n'est pas apte à identifier des variations de porosité, dans la plage 12,5 – 18,1, avec le protocole expérimental utilisé. Ceci est confirmé par les contrastes observables sur la Figure II. 27. En effet, les variations de contraste de température, entre deux gâchées de porosités proches ou de porosités éloignées, sont de mêmes amplitudes.

II.2.5.3. Influence de la nature du granulat

En utilisant les dalles béton issues de la palette n°2, il a été possible de s'intéresser à l'influence de la nature (siliceux ou calcaire), de la taille (0 – 12,5 mm et 0 – 20 mm) ou de la forme des granulats (roulés ou concassés). Pour cela, on a mené une étude comparative des courbes de refroidissement des bétons de composition G3, G4, G5 et G6. En utilisant la même démarche de sélection des dalles que précédemment (corps d'épreuve de la palette 2 présentant des températures initiales recalculées comprises dans un intervalle de 1°C maximum) on a obtenu les courbes de la Figure II. 28. On a également tracé pour chaque composition le contraste de température avec la gâchée de référence G3 (Figure II. 30).

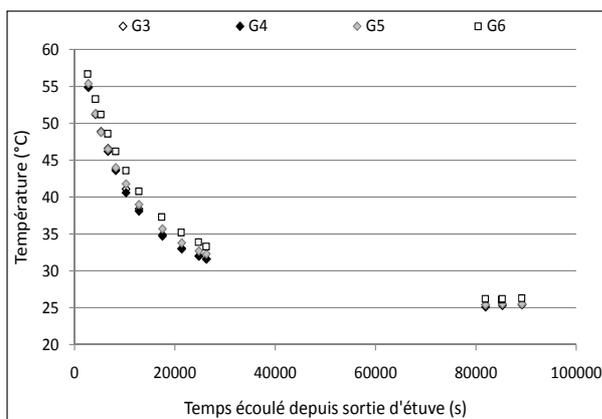


Figure II. 28. Influence de la nature du granulat sur les courbes de refroidissement des bétons

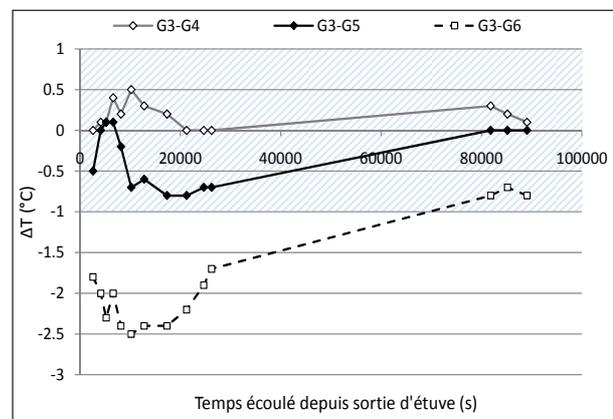


Figure II. 29. Contrastes de température entre la gâchée de référence G3 et les autres gâchées

On observe ici une bonne superposition des courbes de refroidissement des trois bétons contenant des granulats siliceux roulés, quelles que soient leurs tailles ou leurs formes. La non sensibilité de la technique à ces grandeurs s'explique par le fait qu'elles n'induisent pas de variations des propriétés thermiques du matériau.

En revanche, le béton comportant des granulats calcaires se différencie nettement avec un contraste de température allant jusqu'à -2,5°C. Il existe donc un lien entre la cinétique de refroidissement et la nature du granulat. Ceci est dû aux propriétés thermiques très différentes des deux types de granulats (calcaires ou siliceux). Le Tableau II. 8 donne les

ordres de grandeur de ces propriétés pour des roches calcaires et gréseuses (exemple de roche contenant généralement de la silice). La conductivité thermique du calcaire est inférieure de 40% à celle du grès, sa chaleur massique 26% plus élevée, et leurs masses volumiques sont équivalentes. Le calcaire possède une diffusivité thermique bien plus faible que le grès.

Tableau II. 8. Valeurs des propriétés thermiques de roches utilisées comme granulats ([DEV, 82])

Roches	ρ (kg.m ⁻³)	λ (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	C_p (J.kg ⁻¹ .K ⁻¹)	a (m ² .s ⁻¹)
Calcaire	2300	1,1	900	5,3.10 ⁻⁷
Grès	2200	1,8	710	1,2.10 ⁻⁶

II.2.6. Calage d'un modèle numérique sur les données expérimentales

L'étude expérimentale semble montrer que la thermographie infrarouge ne permet pas de discerner des variations de porosité de l'ordre de 7 %. Or, cette étude a également montré que les données étaient très bruitées. Une étude numérique va permettre de confirmer ou d'infirmer les conclusions de l'expérimentation car elle permet d'obtenir des données propres et non bruitées.

Nous allons donc commencer par caler un modèle sur les courbes expérimentales puis on va simuler différents bétons en intégrant des différences dans les propriétés thermiques qui gouvernent les transferts de chaleur.

II.2.6.1. Calcul des propriétés thermiques des différents bétons

L'équation de la chaleur (Chap.1 [I. 6]) met en exergue trois paramètres jouant un rôle majeur dans la diffusion de la chaleur à l'intérieur d'un corps : la conductivité thermique, la masse volumique et la chaleur massique. Seule la masse volumique du matériau, dont les valeurs sont données dans le Tableau II. 5, a été mesurée sur les éprouvettes SENSO. La bibliographie donne des ordres de grandeur pour ces paramètres. Le Tableau II. 9 résume les valeurs trouvées dans la littérature.

Tableau II. 9. Valeurs des différentes propriétés thermiques du béton issues de la littérature

Grandeur	ρ (kg.m ⁻³)	λ (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	C_p (J.kg ⁻¹ .K ⁻¹)
Bianchi <i>et al</i> [BIA, 04]	1800-2300	0,7-1,75	960-1000
Neville [NEV, 00]		1,5-3	840-1170
Maierhofer <i>et al</i> [MAI, 03]	2000-2800	2,1	800-1200

Les valeurs présentées dans ce tableau sont données pour des bétons classiques dont nous supposons la composition G3 proche (composition de référence). On pose donc les hypothèses suivantes : conductivité thermique du béton G3 égale à $2 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ et chaleur massique égale à $960 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$. Il faut de plus noter que ces valeurs de grandeur sont données pour des bétons à taux de saturation courant c'est-à-dire 60%.

A partir des valeurs supposées de G3, nous avons par l'emploi des équations [II. 7] et [II. 10] recalculé les valeurs de conductivité thermique et de chaleur massique des différentes compositions. Les valeurs obtenues pour un taux de saturation de 0% (dalles à l'état sec) sont données dans le Tableau II. 10. Ces valeurs calculées serviront pour le calage des modèles numériques.

Tableau II. 10. Valeurs recalculées des propriétés thermiques des différentes compositions de béton

Composition	G1	G2	G3	G3a	G7	G8	G4	G5	G6
Porosité (%)	12,5	14,3	15,5	16	15,9	18,1	14,2	15,2	14,9
Conductivité thermique	1,41	1,30	1,23	1,20	1,21	1,09	1,31	1,25	1,27
Chaleur massique	687	694	698	700	700	708	694	697	800
Masse volumique (mesurée)	2354	2305	2287	2277	2288	2230	2290	2306	2377
Diffusivité thermique ($\times 10^{-7}$)	8,73	8,14	7,71	7,55	7,56	6,93	8,23	7,77	6,66

Rq : Les valeurs de conductivité thermiques obtenues par le calcul sont faibles

II.2.6.2. Calcul du nombre de Biot

Nous sommes en présence d'un régime transitoire où la température de surface du corps évolue en fonction du temps. La première grandeur caractéristique de ce type de problème est le nombre de Biot, grandeur adimensionnelle qui mesure le rapport de la résistance interne à la résistance de contact du solide avec le milieu adjacent [BIA, 04] :

$$Bi = \frac{hL}{\lambda} \quad [II. 12]$$

Avec $L = \frac{V}{A}$ Longueur caractéristique (m)

V Volume du matériau (m^3) A Surface d'échange (m^2)

Les comportements du champ de température en fonction du nombre de Biot sont de deux natures (Figure II. 30) :

- Si $Bi \ll 1$ la résistance thermique est essentiellement due au contact entre le solide et le milieu adjacent, la conductivité thermique n'intervient pas ;
- Si $Bi \gg 1$ la résistance thermique est principalement due à la conduction de la chaleur dans le solide.

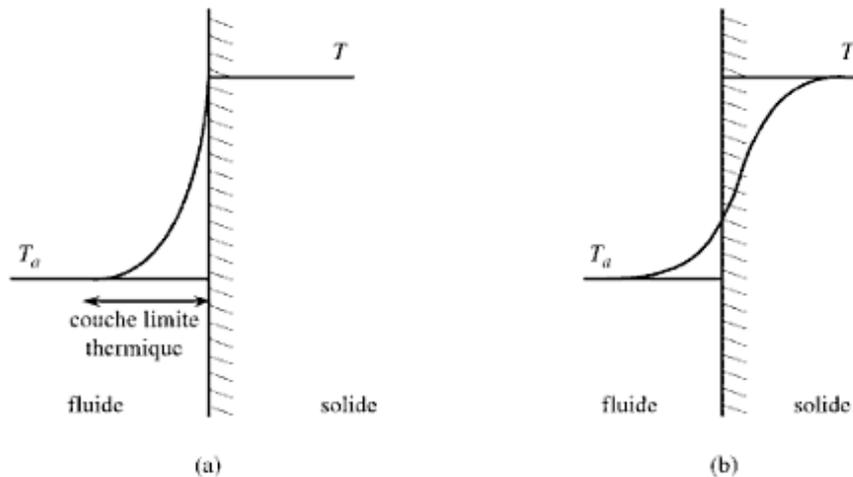


Figure II. 30. Influence du nombre de Biot sur la forme des profils de température aux parois :
(a) $Bi < 1$; (b) $Bi > 1$.

Le calcul du nombre de Biot par l'équation [II. 12] donne, dans notre étude, une valeur de 0,27 inférieure à 1 (calculée pour la gâchée G3 à porosité 15,5 avec $h = 6,5 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$, $k = 1,49 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$, $V = 0,016 \text{ m}^3$ et $A = 0,25 \text{ m}^2$). Les valeurs du nombre de Biot obtenues pour les conductivités thermiques extrêmes donnent des valeurs de 0,23 et 0,30 respectivement pour les gâchées G1 et G8. Du fait des faibles valeurs de conductivité thermique utilisées dans le calcul du nombre de Biot, celui-ci est probablement légèrement sous-estimé (valeur de 0,17 pour une conductivité thermique de 2,4). Le nombre de Biot obtenu est donc en limite des deux modèles de répartition des températures présentés précédemment. Cependant, nous considérerons dans la suite de cette étude que nous sommes dans le premier cas à savoir que la résistance thermique du solide est principalement due à la résistance de contact entre béton et air. Les propriétés thermiques propres au matériau (masse volumique, chaleur massique) ont donc une faible influence sur les échanges de chaleur entre solide et fluide. La conductivité thermique a quant à elle une influence négligeable.

Dans le cas d'un nombre de Biot faible ($\ll 1$) et en l'absence de source thermique interne à l'objet, son champ de température varie de sa température supposée uniforme $T = T_0$ à $t = t_0$ à la température $T = T_a$ (température de l'air) au bout d'un temps suffisamment

long. Si l'on suppose en première approximation que T_a est constante, l'équation de la chaleur prend la forme suivante :

$$\rho.Cp.\int \frac{dT}{dt}dV = -\int h_c(T(t) - T_{air})dS \quad [II. 13]$$

Avec	T_{air}	Température air (°C)
	h_c	Coefficient de convection (W, m^{-2}, K^{-1})
	A	Surface d'échange (m^2)
	t	Temps (s)
	V	Volume du matériau (m^3)

La solution générale de cette équation est :

$$\frac{T - T_{air}}{T_i - T_{air}} = \exp\left(\frac{-h_c A t}{\rho.V.Cp}\right) \quad [II. 14]$$

Avec	T_i	Température initiale (°C)
------	-------	---------------------------

II.2.6.3. Ajustement du modèle

Une courbe de refroidissement modèle a été calculée à partir de l'équation [II. 14]. Les deux paramètres principaux qui guident l'allure générale de la courbe et qui permettent donc de la caler sont la chaleur massique C_p et le coefficient d'échange par convection h_c . Ayant choisi d'imposer C_p , le calage de la courbe numérique sur les données expérimentales se fait en modifiant la valeur de h_c .

Les valeurs des paramètres retenues pour le calcul sont les suivantes : $T_{air} = 25,5^\circ C$, $T_i = 62^\circ C$, $\rho = 2400 \text{ kg.m}^{-3}$, $C_p = 664 \text{ J.kg}^{-1}.K^{-1}$ et $h_c = h \text{ W.m}^{-2}.K^{-1}$ (paramètre de calage). Les résultats obtenus sont présentés sur la Figure II. 31.

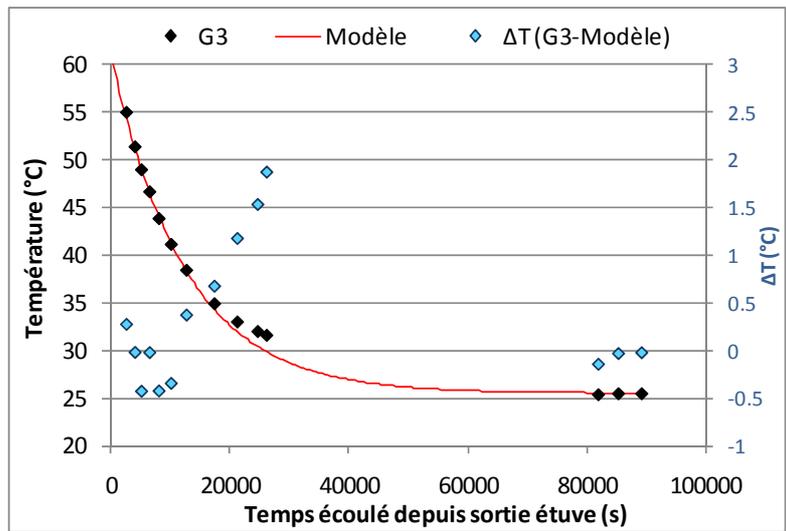


Figure II. 31. Courbe de refroidissement modélisée _ Modèle 1

L'utilisation de ce modèle montre que jusqu'à 20000 secondes il y a bonne adéquation entre modèle et mesures. Après 20000 s, les températures mesurées semblent suivre une cinétique qui tendrait à rejoindre une température finale plus élevée que celle réellement atteinte de 25,5°C. Le calage de la courbe numérique est optimal pour un h_c de $8 \text{ W.m}^{-2}\text{.K}^{-1}$, La valeur de calage optimale est définie comme la valeur de h pour laquelle la moyenne des valeurs absolues des contrastes de température entre mesure et modèle est minimale.

Les courbes de température de l'air, enregistrées à l'aide de thermocouple dans le couloir où les mesures ont été réalisées, montrent que durant la journée la température de l'air était proche de 27,5°C, puis que celle-ci est descendue jusqu'à 23,5°C sur la fin de la nuit pour remonter en début de matinée (Figure II. 32).

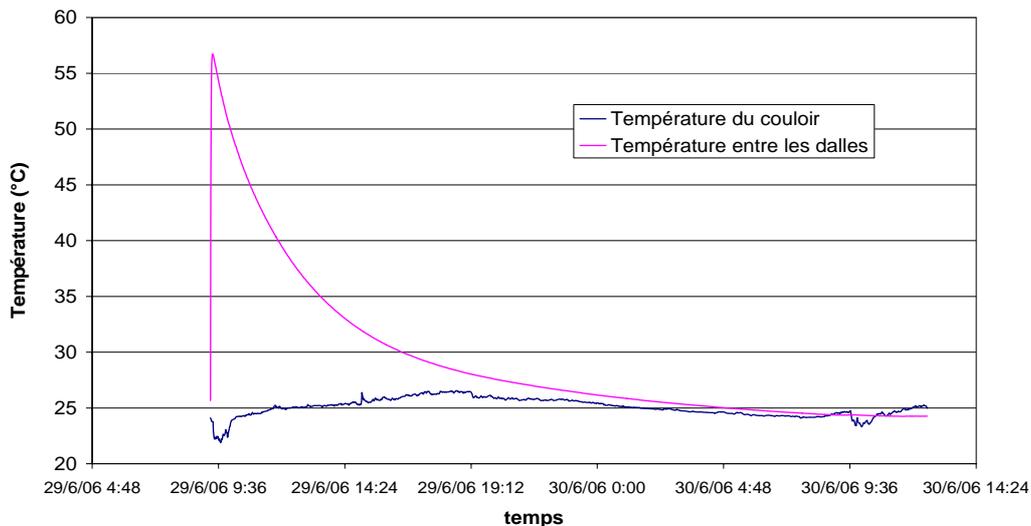


Figure II. 32. Evolution de la température de l'air entre les dalles et dans le couloir [LAN, 06]

Au début du refroidissement la température de l'air n'était pas de 25,5°C (température finale des dalles) mais d'environ 27,5°C. En remplaçant dans l'équation [II. 14] la

température de l'air par 27,5°C, on obtient un modèle qui tend vers une asymptote autour de cette valeur (Figure II. 33). Le modèle obtenu est alors mieux calé pour le début des mesures, jusqu'à 30000s, qui est la partie des courbes qui nous intéresse le plus.

Le modèle est optimisé pour des valeurs $T_{\text{air}} = 27,5^\circ\text{C}$, $T_i = 60^\circ\text{C}$, $h_c = 8,6 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$, $\rho = 2400 \text{ kg.m}^{-3}$ et $C_p = 664 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$.

Cependant, si la masse volumique des dalles est connue, car mesurée en laboratoire, la valeur de chaleur massique est elle issue de la littérature. Il existe alors une infinité de couples h_c/C_p qui donnent des modèles ajustés aux mesures.

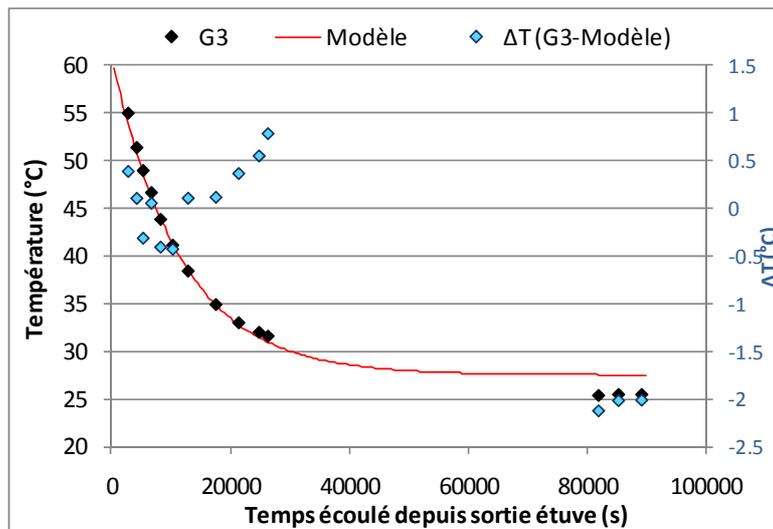


Figure II. 33. Courbe de refroidissement modélisée _ Modèle 2

II.2.6.4. Influence de la porosité sur le modèle

Afin de mettre en évidence l'existence de contrastes de température significatifs entre les compositions extrêmes de béton nous avons calculé numériquement les courbes de refroidissement des bétons G1 et G8 ainsi que l'écart de température entre ces courbes à chaque pas de temps. Les résultats de ces calculs sont présentés sur la Figure II. 34. Le seul paramètre variant entre ces courbes est la valeur de la chaleur massique du matériau prise égale à la valeur calculée dans le Tableau II. 10.

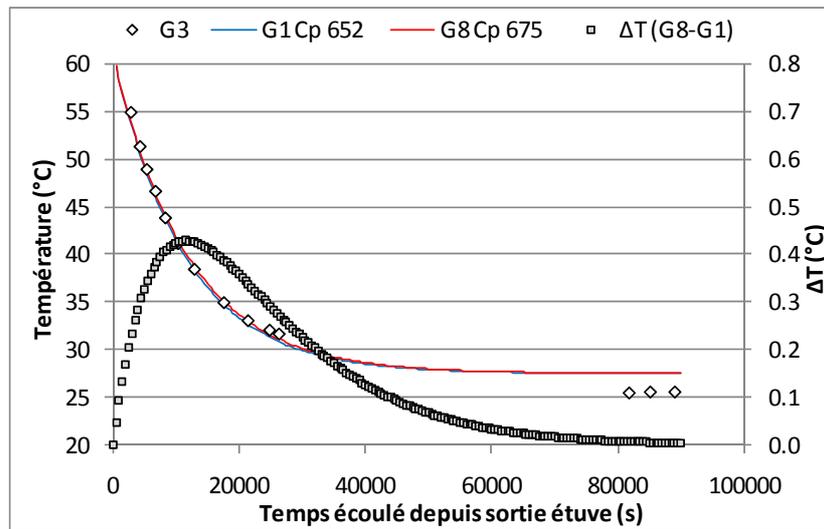


Figure II. 34. Courbes de refroidissement modélisées des valeurs de porosités extrêmes et différence de température entre ces extrêmes

Au premier abord, l'observation de la figure montre deux courbes quasiment similaires, mais le calcul du contraste de température entre les courbes donne un écart maximal de 0,43°C à 11500 secondes.

Si cet écart peut paraître représentatif d'un défaut, les auteurs travaillant sur les délaminations utilisent un seuil de détection de 0,3°C [CLA, 03], les mesures ont montré une variabilité beaucoup plus importante, de l'ordre de 1°C. Les contrastes de températures, engendrés par des variations de porosité, ne sont pas suffisamment importants pour être détectés par thermographie infrarouge, du moins par l'utilisation de ce protocole de mesure et cette caméra.

II.3. Conclusion de l'étude

Cette étude a permis de mettre en évidence plusieurs points.

Nous avons dans un premier temps montré que la thermographie infrarouge n'est pas un outil adapté à la détection de variation de porosité entre les échantillons, avec le protocole expérimental, le matériel utilisé et pour les plages de porosité visées. En effet, la forte résistance thermique en surface masque l'influence de la conductivité thermique. Il en résulte que les écoulements de chaleur sont principalement régis par la chaleur massique et la masse volumique du matériau. Or, la chaleur massique, sur la plage de porosité étudiée, ne varie que de 3%. Cette variation n'est pas suffisante pour distinguer des cinétiques de refroidissement différentes entre bétons. De plus, la masse volumique sèche de ces bétons ne couvre pas une gamme suffisamment large pour favoriser cette distinction. Une solution, pour augmenter le nombre de Biot et ainsi être sensible à la conductivité

thermique du matériau, serait d'augmenter la valeur du coefficient d'échange thermique par convection, en utilisant par exemple un ventilateur. La conductivité thermique variant d'environ 20 % sur cette gamme de porosité, on devrait alors observer des comportements différents avec la porosité.

L'étude menée sur l'influence du granulat (forme, taille et nature) a permis de mettre en évidence la sensibilité de la thermographie infrarouge à la nature du granulat uniquement. La forte différence de chaleur massique entre les deux types de granulats testés, calcaires ou siliceux, a montré une inertie thermique plus importante du béton contenant des granulats calcaires.

D'un point de vue protocole de mesure, l'étude a fait apparaître les points sur lesquels une attention toute particulière doit être apportée lorsque l'on souhaite réaliser des mesures de thermographie infrarouge :

- Il est nécessaire de travailler sur des matériaux ayant tous la même température initiale ;
- Les mesures doivent être réalisées entre 5000 (1h25) et 24000 secondes (6h40) après le début du refroidissement car c'est là que l'on observe les contrastes thermiques maximums ;
- Pour obtenir des données directement comparables, il est nécessaire de réaliser les mesures aux mêmes pas de temps entre les différentes séries de mesure car la cinétique de refroidissement est très rapide au début.

III. Etude de l'influence du taux de saturation sur la mesure de thermographie infrarouge

III.1. Etude expérimentale

III.1.1. Objectifs

Afin de définir l'aptitude de la thermographie infrarouge à détecter des variations de teneur en eau, nous avons étudié l'influence de ce paramètre sur les cinétiques de refroidissement de corps d'épreuve. Pour cela, des mesures de refroidissement sur des bétons à différentes teneurs en eau ont été réalisées.

III.1.2. Présentation des corps d'épreuves

Les corps d'épreuve utilisés dans cet étude sont les mêmes que ceux présentés précédemment (II.2.1), seul leur conditionnement varie.

III.1.3. Protocole expérimental

On s'intéresse ici à l'influence de l'état de saturation du béton sur sa réponse aux sollicitations thermiques. Les corps d'épreuves ont donc été conditionnés sous plusieurs états de saturation 40, 60 et 80% de teneur en eau.

III.1.3.1. Conditionnement des corps d'épreuves

Après saturation des dalles, par un bain en piscine de longue durée, les dalles ont été laissées à l'air libre pour permettre l'évaporation de l'eau et atteindre ainsi les niveaux de saturation visés (par pesées successives). Une fois les dalles conditionnées dans un état de saturation, elles ont été stockées en étuve à 80°C dans une double couche de protection (Figure II. 35) : une pellicule de cellophane recouverte d'une couche d'aluminium autocollante. Cette double protection a pour objectif de maintenir le taux de saturation fixe dans les dalles et le passage en étuve permet une homogénéisation des masses d'eau à l'intérieur des dalles.



Figure II. 35. Conditionnement des dalles pour l'étude de l'influence de la teneur en eau

Les valeurs réelles des taux de saturation obtenus sont présentées dans le Tableau II. 11.

Tableau II. 11. Degré de saturation réel des dalles

Degré de saturation visé		Degré de saturation calculé sur les dalles							
Composition	G1	G2	G3	G3a	G7	G8	G4	G5	G6
40 %	34	37	29	34	37	29	32	35	33
60 %	52	51	51	54	51	52	47	53	52
80 %	72	70	71	72	69	68	60	70	69

III.1.3.2. Protocole de mesure

Tout comme dans l'étude précédente les mesures ont été réalisées par séries de 9 dalles, juxtaposées, dont on enregistre l'évolution de la température de surface.

Les 9 dalles d'une gâchée de béton ont été numérotées aléatoirement de 1 à 9 (exemple : G1-N6, dalle n°6 de la gâchée G1), permettant ainsi aux différentes équipes travaillant sur le projet de comparer leurs données dalle à dalle. Pour toutes les gâchées sauf la gâchée G7 les dalles numérotées N1-N2-N3 ont été saturées à 40 %, les dalles N4-N5-N6 à 60 % et les dalles N7-N8-N9 à 80 %. Pour la gâchée 7, où une dalle manquait (N9), les dalles N1 et N2 ont été saturées à 40 %, les dalles N3-N4-N5 à 60 % et les dalles N6-N7-N8 à 80 %. Les séries de dalles sont donc composées de dalles de différentes gâchées portant le même numéro, hormis pour la gâchée G7. On trouvera en Annexe II. 3 le détail de la disposition des dalles dans les séries ainsi que leur ordre de sortie de l'étuve.

Les dalles sont sorties de l'étuve série par série et les mesures débutent dès que la mise en place et l'ouverture des protections d'une série est achevée (le t=0 des mesures correspond à la fin d'ouverture des protections des dalles). Le pas de mesure est de 5 min au début de l'acquisition puis passe à 15 minutes. Le refroidissement des dalles est enregistré pendant 24h (jusqu'au retour à l'équilibre thermique avec le milieu environnant), avec une pause de l'enregistrement entre 19 h et 9 h le lendemain. Les mesures se sont déroulées sur 3 jours. Les valeurs de température et d'humidité relative de l'air sont présentées sur la

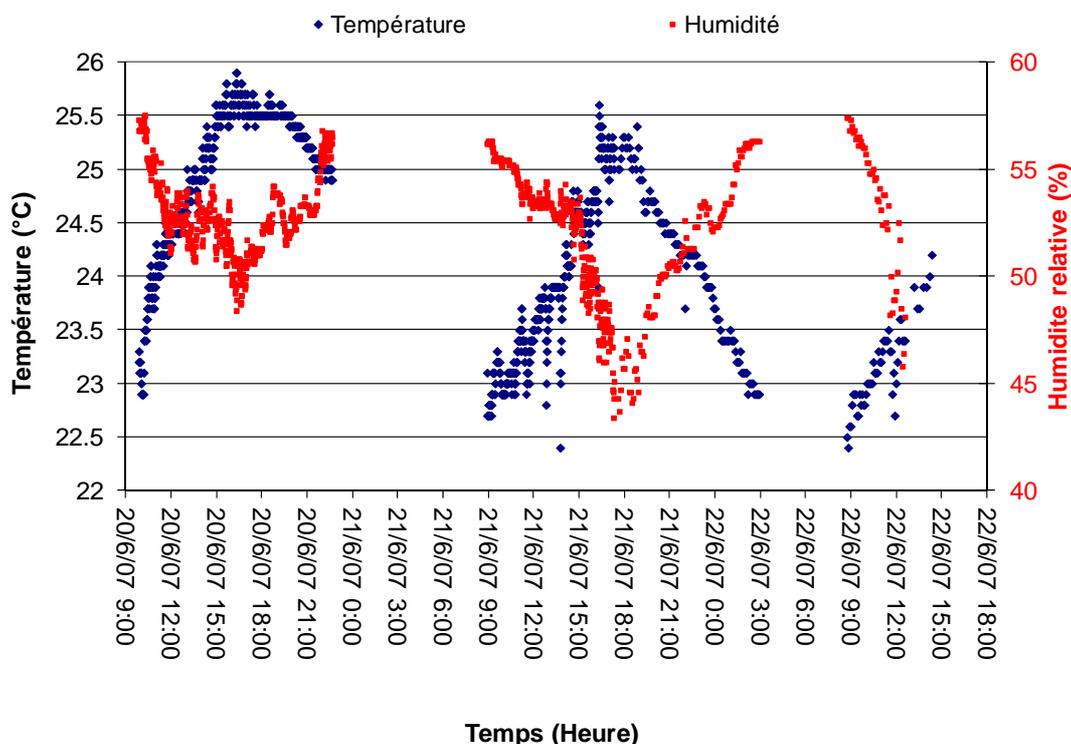


Figure II. 36. Température et humidité relative de l'air au cours des mesures de thermographie infrarouge

La Figure II. 37 illustre la disposition des séries et l'emplacement de la caméra durant les mesures.

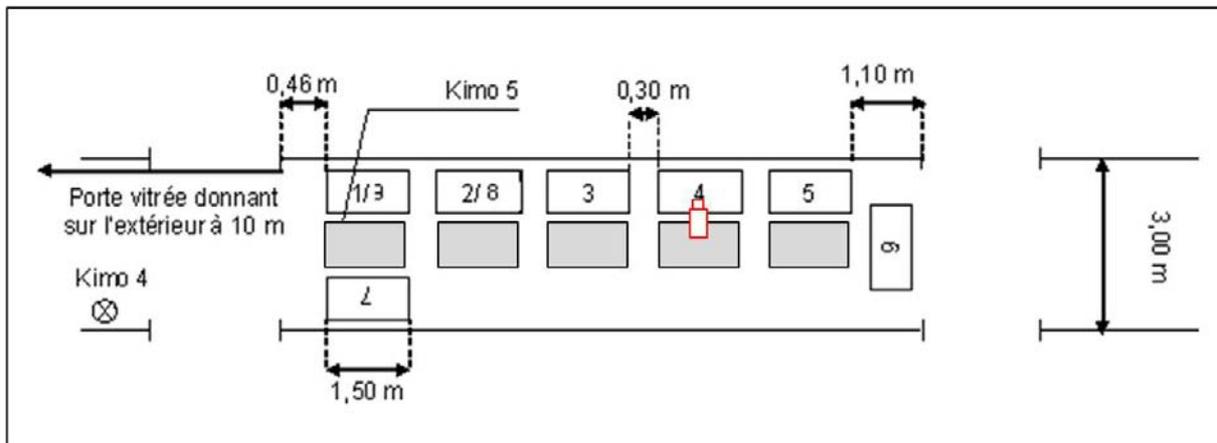


Figure II. 37. Schéma d'installation des séries de dalles pendant les mesures aux différents états de saturation

Remarque : Suite aux problèmes de traitement des mesures réalisées sur les dalles à l'état sec dus à une mauvaise répartition des températures à l'intérieur de l'étuve, un ventilateur a été installé afin d'homogénéiser les température. Malgré ce dispositif une température de 80°C a été relevée en haut de l'étuve et une température de 75°C dans sa partie basse.

III.1.4. Traitements des mesures

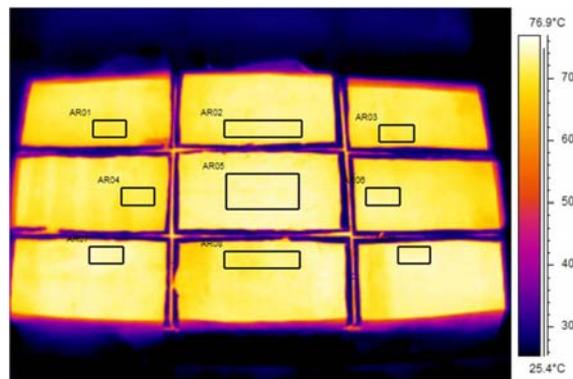


Figure II. 38. Surfaces utilisées pour le calcul de température de surface des dalles à différents état de saturation

Le traitement consiste comme précédemment à récolter les valeurs de température de surface moyenne sur des zones rectangulaires considérées comme homogènes et peu influencées par les effets de bords (Figure II. 38).

Les données numériques ainsi récoltées sont exploitées sous Excel.

III.1.5. Résultats des mesures

Le $t=0$ du refroidissement correspond à l'instant où l'ensemble des protections enveloppant les dalles ont été découpées puis ouvertes. Aucune mesure infrarouge n'a été réalisée à cet instant et l'instant de la première mesure varie entre $t=60$ et $t=360$ secondes. Le Tableau II. 12 contient l'ensemble des temps de prise des premières mesures de chaque série. Il nous manque donc une information essentielle, à savoir, la température initiale des dalles.

Tableau II. 12. Tableau récapitulatif des temps de prise des premières mesures de chaque série de dalle

N° Série	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Temps première mesure (s)	156	162	360	227	120	60	120	169	102
Taux de saturation visés (%)	40	60	80	40	60	80	40	60	80

Lorsque l'on s'intéresse au refroidissement des dalles sur une période courte, entre $t=0$ et $t=500$, on observe un comportement pseudo-linéaire (Figure II. 39). En émettant l'hypothèse d'une décroissance linéaire sur cet intervalle de temps, on peut estimer la température initiale pour chaque dalle auscultée. Nous avons ensuite sélectionné les dalles de mêmes compositions, mais de différente teneur en eau, ayant une température initiale proche, c'est-à-dire avec un écart de température maximal inférieur à 1°C , écart défini précédemment comme significatif d'un changement de comportement, avec le protocole et le matériel utilisé. Seulement 2 gâchées ont répondu aux critères : les gâchées G8 et G4, La Figure II. 40 présente l'évolution dans le temps des températures de surface mesurées.

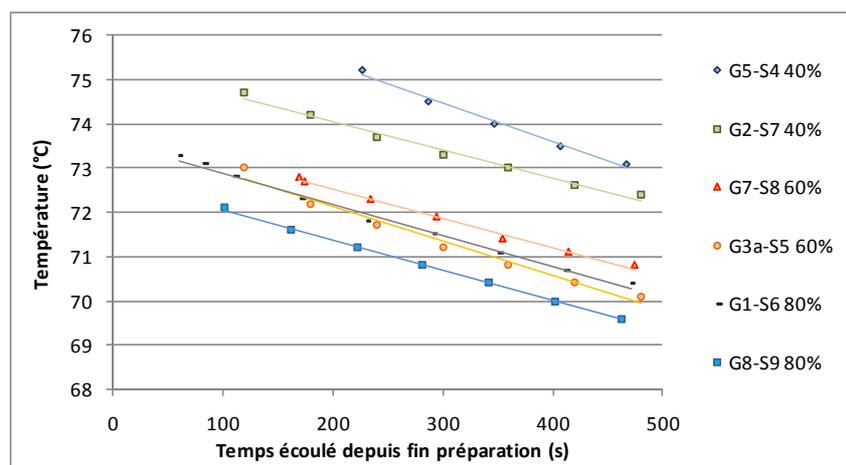


Figure II. 39. Comportement pseudo-linéaire des courbes de refroidissement

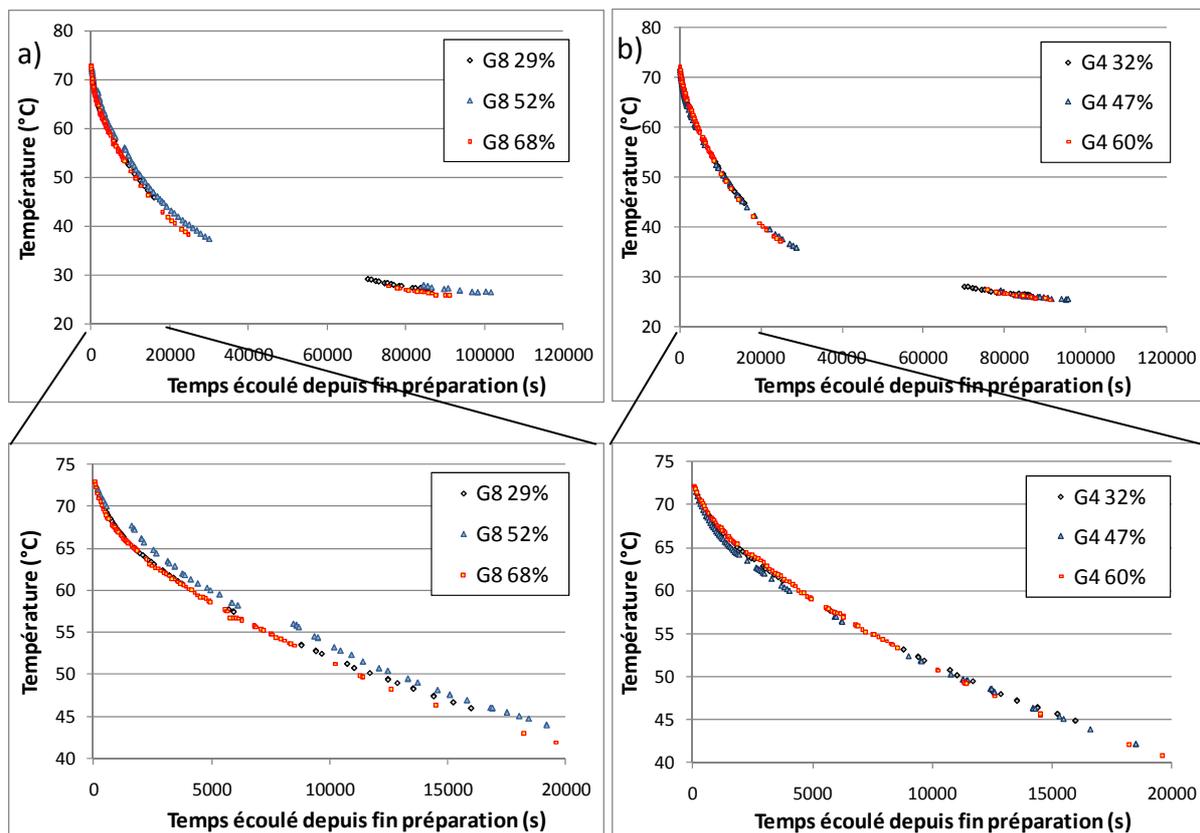


Figure II. 40. Courbes de refroidissement expérimentales obtenues pour les gâchées
a) G8 (béton le plus poreux et) b) G4 (béton comportant des granulats siliceux roulés 0-20 mm)

Sur les vues complètes des courbes de refroidissement (Figures du haut), l'allure générale pour une gâchée aux trois états de saturation est identique et suit une décroissance exponentielle. Cependant, lorsque l'on zoom sur la première partie des courbes (Figures du bas), on voit apparaître une différence de température pouvant aller jusqu'à 2,5°C pour la gâchée G8 entre l'état de saturation à 68 % et celui à 52 %. Pour la gâchée G4, l'écart de température maximal obtenu est de 0,5°C entre les saturations à 47 et 60 %, donc peu significatif.

L'élément frappant sur ces graphiques est l'absence de classement des courbes. En effet, pour la gâchée G8, on retrouve du haut vers le bas l'état de saturation à 52 %, puis 29 % et enfin 68 %. Pour la gâchée G4 l'ordre des courbes est différent avec du haut vers le bas la dalle à 60%, puis les dalles à 32 et 47 % dont les températures de surface expérimentales sont confondues.

Les résultats de l'étude expérimentale ne permettent pas de mettre en exergue une relation entre cinétique de refroidissement et degré de saturation du matériau.

III.1.6. Conclusions de l'étude expérimentale

Au vu des résultats expérimentaux obtenus sur cette étude, la thermographie infrarouge ne semble pas capable de différencier des variations de degré de saturation du matériau. Or, l'étude bibliographique a montré que la teneur en eau avait une influence très importante sur la chaleur massique du matériau. On a pu recalculer sur nos bétons une augmentation de 30% de C_p pour un béton de porosité 12,5 et de 36% pour un béton ayant une porosité de 18,1 (Tableau II. 13). Les variations de chaleur massique créées par l'augmentation de la teneur en eau auraient dues entrainer des cinétiques de refroidissement suffisamment différentes pour être identifiées. Plusieurs hypothèses pourraient expliquer ces résultats :

- D'une part, aucune mesure n'ayant été réalisée à $t=0$ nous ne connaissons pas pour cette étude la température initiale des dalles. Une approximation a permis de remonter à ces valeurs mais comme toute approximation elle entraine une incertitude sur la valeur réelle des températures initiales obtenues et les dalles comparées ici n'étaient peut-être pas comparables ;
- Ensuite, les mesures ayant été réalisées sur plusieurs jours les conditions aux limites en termes de température de l'air ne sont pas identiques entre les séries de dalles ;
- D'autre part, les taux de saturation réellement obtenus dans les dalles sont peut-être différents des taux visés avec de moins grandes variations de teneur en eau entre les dalles ;
- Enfin, il ne faut pas oublier les résultats issus de l'étude précédente montrant que ce protocole expérimental tend à masquer les informations sur les propriétés thermiques du matériau.

Même si les résultats de l'étude ne sont pas ceux escomptés, celle-ci a néanmoins permis de mettre le doigt sur des éléments importants à prendre en compte lorsque l'on réalise des mesures en thermographie infrarouge : importance de l'information au $t=0$, nécessité si l'on veut comparer des mesures de travailler dans des conditions de température extérieure strictement identiques...

III.2. Etude numérique

Afin de préciser les possibilités théoriques de détection, une étude numérique a été menée. Celle-ci fait intervenir les mêmes équations que celles mises en jeu pour l'étude de l'influence de la porosité au paragraphe II.2.6.

III.2.1. Calcul des propriétés thermiques des différents bétons

En se basant sur les mêmes hypothèses et équations que dans l'étude numérique précédente (II.2.6.1), il a été possible de calculer les valeurs de conductivité thermique et de chaleur massique de chaque composition de béton à chaque degré de saturation. Les masses volumiques correspondantes ont également été recalculées en se basant sur la valeur de masse volumique sèche. A partir de ces trois grandeurs nous avons obtenu la diffusivité thermique des bétons. Le Tableau II. 13 rassemble l'ensemble de ces valeurs.

Tableau II. 13. Valeurs recalculées des propriétés thermiques des différentes compositions de béton aux différents états de saturation

Composition	G1			G2			G3		
Porosité (%)	12,5			14,3			15,5		
Saturation (%)	34	52	72	37	51	70	29	51	71
Conductivité thermique	1,61	1,73	1,87	1,54	1,64	1,78	1,42	1,58	1,74
Masse volumique	2397	2419	2444	2358	2378	2405	2332	2366	2397
Chaleur massique	823	894	974	862	926	1012	841	950	1048
Diffusivité thermique (x10 ⁻⁷)	8,19	8,01	7,87	7,56	7,43	7,31	7,23	7,02	6,93
Composition	G3a			G7			G8		
Porosité (%)	16,0			15,9			18,1		
Saturation (%)	34	54	72	37	51	69	29	52	68
Conductivité thermique	1,43	1,58	1,73	1,45	1,56	1,71	1,29	1,47	1,61
Masse volumique	2331	2363	2392	2347	2369	2398	2282	2324	2353
Chaleur massique	873	975	1067	887	958	1049	875	1007	1099
Diffusivité thermique(x10 ⁻⁷)	7,03	6,86	6,78	6,97	6,87	6,80	6,46	6,28	6,23
Composition	G4			G5			G6		
Porosité (%)	14,2			15,2			14,9		
Saturation (%)	32	47	60	35	53	70	33	52	69
Conductivité thermique	1,51	1,61	1,71	1,48	1,61	1,74	1,48	1,61	1,75
Masse volumique	2335	2357	2375	2359	2387	2412	2426	2454	2480
Chaleur massique	838	906	965	866	953	1036	956	1046	1127
Diffusivité thermique(x10 ⁻⁷)	7,70	7,55	7,46	7,22	7,07	6,98	6,37	6,29	6,26

III.2.2. Influence de l'état de saturation sur le modèle

Nous avons calculé numériquement l'influence du taux de saturation du béton sur sa cinétique de refroidissement. Pour cela, les températures de surface à chaque pas de temps ont été calculées à partir de l'équation [II. 14] pour la composition de référence G3 aux différents états de saturation. Les courbes de refroidissement obtenues ainsi que les courbes représentant les écarts de température entre les différents états de saturation sont présentées sur la Figure II. 41.

Les courbes obtenues numériquement ont la même allure générale que les courbes expérimentales. Cependant, on distingue ici nettement les trois états de saturation. Ceci est confirmé par les courbes représentant les écarts de température entre les différents états de saturation. La valeur minimale du ΔT_{max} est d'environ 2°C entre les états à 71 et 51 % de saturation.

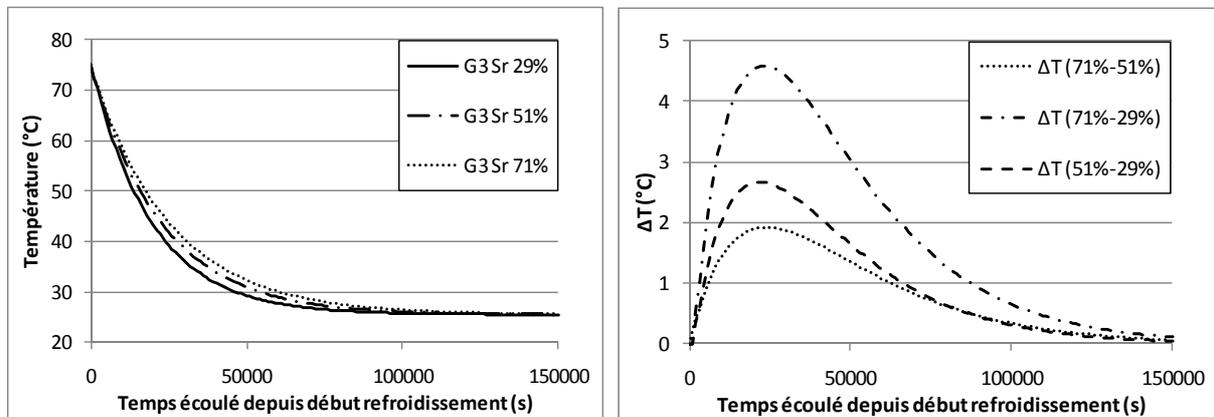


Figure II. 41. Influence du taux de saturation sur la cinétique de refroidissement du béton de formulation G3

III.2.3. Conclusion de l'étude numérique

L'étude numérique montre que pour des cas d'études idéaux, même température initiale, même température de l'air, sans les erreurs liées à l'incertitude de mesure, il est possible théoriquement de distinguer des variations du degré de saturation du matériau.

Dans ce cas d'étude, les éléments influençant le plus la cinétique de refroidissement sont la chaleur massique et le coefficient d'échange thermique entre air et béton. L'inertie du matériau augmente avec la chaleur massique du matériau.

IV. Conclusion

Nous avons dans ce chapitre testé la capacité de la thermographie infrarouge à mettre en évidence l'influence des variations de porosité du béton, celles liées à la nature et la taille des granulats, et celles associées aux variations de teneur en eau massique.

Les résultats des études, tant expérimentale que numérique, menées sur la détectabilité de variations de porosité ont montré que ce paramètre n'était pas mesurable avec le protocole expérimental utilisé. En effet, la résistance thermique de surface du matériau étant très importante, cela masque l'information liée à la conductivité thermique du matériau, laissant la chaleur massique et la masse volumique régir les écoulements de chaleur. Or ces deux propriétés ont une variation, sur la gamme de porosité testée, de

l'ordre de 3%, trop faible pour induire des cinétiques de refroidissement significativement différentes entre bétons.

L'influence de la nature des granulats est en revanche notable : l'étude a montré qu'il est possible de distinguer expérimentalement des bétons à granulats siliceux relativement à des bétons à granulats calcaires. La nature minéralogique du granulat a une forte influence sur la chaleur massique du béton.

Les études réalisées sur des bétons à différents état de saturation ont donné des résultats contradictoires entre mesures expérimentales et simulations numériques. Dans le premier cas nous n'avons pas observé de variations notables du comportement du béton avec l'augmentation de teneur en eau. L'étude numérique montre pourtant qu'il est possible de distinguer deux matériaux aux taux de saturation différents. En effet, l'augmentation de la teneur en eau entre l'état sec et un degré de saturation de 80% entraîne une variation de 30% de la chaleur massique. De plus, les résultats expérimentaux sont en contradiction avec les applications classiques de la thermographie infrarouge. En effet, cette technique a déjà été utilisée avec succès pour la détection de trace d'humidité (WIL, 07). On peut donc supposer que le protocole de mesure utilisé n'est pas adapté.

Les deux études ont permis de mettre en évidence plusieurs sources d'incertitude sur nos mesures. On peut citer parmi les sources d'erreur les plus importantes la non connaissance de la température initiale du matériau ainsi que la non similitude des conditions aux limites en température. De plus, le calcul du nombre de Biot a mis en évidence une résistance thermique en surface importante, masquant le rôle de la conductivité thermique du matériau. Une meilleure prise en compte de ces facteurs dans les protocoles des futurs travaux devrait améliorer le potentiel de la méthode.

**CHAPITRE 3 : ÉTUDE DE LA PRESENCE
D'UN ENDOMMAGEMENT PARTICULIER
DU BETON : LA DELAMINATION**

Nous souhaitons étudier l'influence de délamination dans le matériau béton sous sollicitations thermiques naturelles (thermographie infrarouge passive). En effet, de nombreuses études ont été menées en thermographie active et ont montré la capacité de la thermographie active à détecter, voire à localiser en profondeur les délaminations. Or ces techniques, bien qu'efficaces, sont souvent limitées par leur mise en œuvre (plus lourde et étude sur des surfaces limitées de l'ordre du mètre carré) et leur vitesse (moins rapides).

La thermographie infrarouge passive présente l'intérêt d'utiliser une source de chaleur diffuse et homogène, le soleil, qui permet le chauffage uniforme d'une surface plane, en l'absence bien sûr d'objets pouvant projeter leur ombre sur la surface auscultée. De plus, nous souhaitons étudier la possibilité de travailler sur des zones non stimulées par le rayonnement solaire direct mais uniquement par les variations thermiques de l'air.

I. Généralités sur les délaminations

I.1. Qu'est ce qu'une délamination

Une délamination est une forme particulière de fissuration. Elle est définie comme une fissure parallèle à la surface. On peut en distinguer deux types :

- La délamination à proprement parlé. Il s'agit d'une discontinuité au sein d'un matériau homogène. Dans le cas du béton armé ces discontinuités se créent principalement au niveau des armatures. Leur apparition est généralement due (du plus courant au plus rare) : à la corrosion des armatures, au feu, au phénomène de gel-dégel (Figure III. 1).
- Le décollement. Il se situe l'interface entre deux matériaux, voire entre deux coulées d'un même matériau. On peut citer deux exemples de décollement : sur les tabliers de pont entre le tablier béton et la chaussée bitumineuse ; lors de renforcement de structures par collage de tissu composite où des défauts de collage peuvent exister (Figure III. 2).



Figure III. 1 Délamination dû à la corrosion des armatures [NAA, 06]



Figure III. 2 Renforcement de tablier de pont par tissu de fibre de carbone (Source Freyssinet)

Lorsque les investigations menées sur le béton ne visent pas à caractériser sa microstructure, celui-ci peut être considéré comme un matériau continu, homogène et isotrope [RIL, àp.]. Dans ce contexte, la délamination est considérée comme une interface, c'est-à-dire comme une discontinuité des propriétés mécaniques ou physiques du matériau et ce sont ces discontinuités qui vont être recherchées.

I.2. Moyens actuels de détection et de caractérisation

Il existe à l'heure actuelle tout un panel de méthodes de contrôle non destructif permettant la détection et/ou la caractérisation de délamination. Toutes ces méthodes visent à détecter une discontinuité, soit des propriétés mécaniques soit des propriétés physiques du matériau.

S'il est assez aisé de les détecter, leur caractérisation en termes de profondeur ou de dimension ne peut être réalisée que par très peu d'outils. La suite de ce chapitre présente de manière rapide les méthodes les plus couramment utilisées pour la détection des délaminations.

I.2.1. Méthodes acoustiques

I.2.1.1. Méthode de la chaîne « Drag chain »

Cette méthode consiste à trainer une chaîne à la surface du matériau à ausculter (Figure III. 3). La chaîne produit un signal sonore particulier au contact des zones décollées ou délaminées. Ces zones sont alors repérées et cartographiées pour une évaluation plus poussée.



Figure III. 3. Recherche de délamination sur une chaussée par la méthode de la chaîne glissée [SCH, 98]

Un avantage de cette technique est sa rapidité d'exécution, la localisation en direct des défauts ainsi que son faible coût. Cependant, cet outil est limité à la détection de défauts sur

des surfaces horizontales et ne permet pas d'obtenir d'informations sur la profondeur des défauts.

1.2.1.2. "Coin tap test" ou "Marteau de sondage"

Dans cette méthode, la surface à ausculter est testée à l'aide d'un marteau (Figure III. 4). Une surface endommagée se caractérise par une rigidité inférieure à celle du matériau sain. Cela se traduit lors de l'impact par l'émission d'un bruit sourd très différent du bruit sec émis par un matériau sain. Ces variations de son sont facilement repérées lors du passage des zones saines aux zones délaminées. Il est alors possible par martelage répétitif d'ausculter l'ensemble de la surface et d'établir une cartographie des défauts.

Cette technique est facilement utilisable et ce sur des surfaces horizontales ou verticales. De grandes surfaces peuvent être inspectées dans un temps relativement court. Il est néanmoins nécessaire que l'opérateur travaille rigoureusement de manière à couvrir la totalité de la surface à ausculter. En effet, cet outil fournit des informations ponctuelles localisées au droit du point d'impact du marteau.



Figure III. 4. Inspection d'une culée de pont par « Hammer sounding » [COL, 10]

Cette méthode bien que facilement utilisable est fastidieuse. Son utilisation est donc limitée à des zones ayant préalablement été identifiées comme probablement délaminées. L'opérateur doit être familier avec la méthode de manière à identifier la différence de sonorité entre zones saines et défectueuses.

L'utilisation des deux méthodes précédentes sur les tabliers de ponts est régie aux Etats-Unis par une norme ASTM : ASTM D4580-86 Standard Practice for Measuring Delaminations in Concrete Bridges Decks by Sounding .

1.2.1.3. Impact-écho

La méthode d'impact-écho repose sur l'analyse du spectre de réponse d'un élément d'ouvrage soumis à une excitation mécanique. Suite à l'impact d'une bille d'acier à la surface du béton des ondes de compression se propagent dans le milieu et se réfléchissent sur les interfaces rencontrées. Un récepteur placé en surface à proximité de l'impact enregistre les ondes successives lui parvenant. Plusieurs types d'ondes sont créées et propagées (onde de Rayleigh, onde P, onde S) mais seules les ondes P intéressent l'impact-écho. La réflexion multiple de l'onde P à la surface et au fond de l'échantillon provoque une réponse périodique dans le domaine temporel (Figure III. 5).

Si le récepteur est proche du point d'impact la distance aller-retour de l'onde est égale à deux fois l'épaisseur du matériau testé $2d$, avec d distance entre la surface et l'interface. Le temps d'arrivée entre deux ondes P est égal à la distance parcourue par l'onde divisée par la vitesse des ondes.

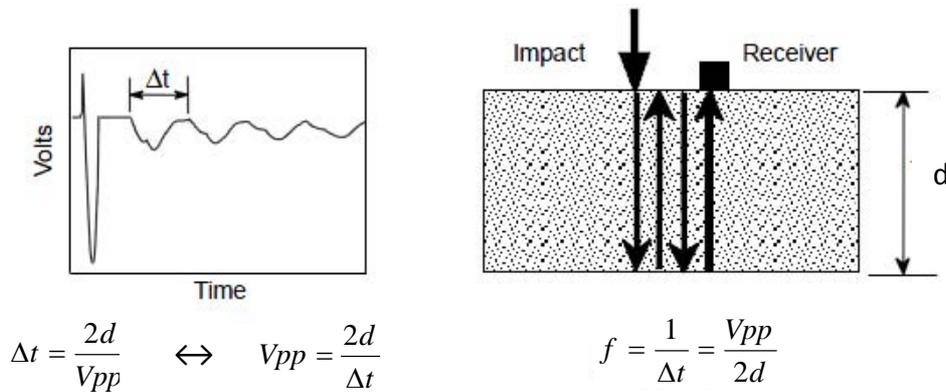


Figure III. 5. Principe de l'analyse fréquentielle (d'après [CAR, 01])

L'utilisation d'une transformée de Fourier rapide (FFT) permet le passage du domaine temporel au domaine fréquentiel. Il est alors possible d'obtenir la fréquence dominante (Figure III. 6) qui est celle qui porte l'information sur l'épaisseur de matériau.

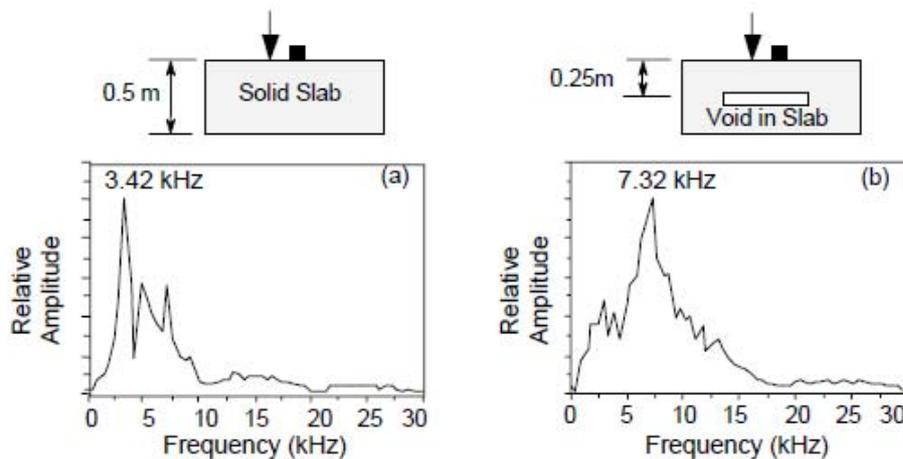


Figure III. 6. Exemple de spectres d'amplitudes obtenu en impact-écho a) matériau sain 0.5m d'épaisseur b) vide artificiel à 0.25m de profondeur (d'après [CAR, 01])

Si on connaît la vitesse des ondes, on peut, à partir de l'équation [III. 1], déterminer l'épaisseur du matériau et donc dans le cas de la présence d'un décollement ou d'une délamination la profondeur de celle-ci.

$$f = \frac{V_{pp}}{2d} \quad [III. 1]$$

Avec V_{pp} Vitesse des ondes (m.s⁻¹)

d Profondeur de l'interface (m)

L'incertitude pouvant exister sur la profondeur des interfaces est principalement liée aux erreurs d'estimation de la vitesse des ondes ainsi qu'aux effets de bords (réflexions).

La taille du plus petit défaut détectable augmente avec la profondeur. Sansalone & Street [SAN, 97] suggèrent que pour qu'un défaut soit détectable il faut que son extension latérale soit supérieure à 1/3 de sa profondeur. A l'opposé, si l'extension latérale d'un défaut est 1.5 fois supérieure à sa profondeur, le défaut se comportera comme une limite infinie. La réponse enregistrée sera identique à celle d'un matériau sain de même épaisseur. Lorsqu'un défaut se situe dans la région hachurée (Figure III. 7) le spectre d'amplitude présentera généralement deux pics : l'un à haute fréquence correspondant à la profondeur du défaut et un second à une fréquence inférieure correspondant à l'épaisseur du matériau.

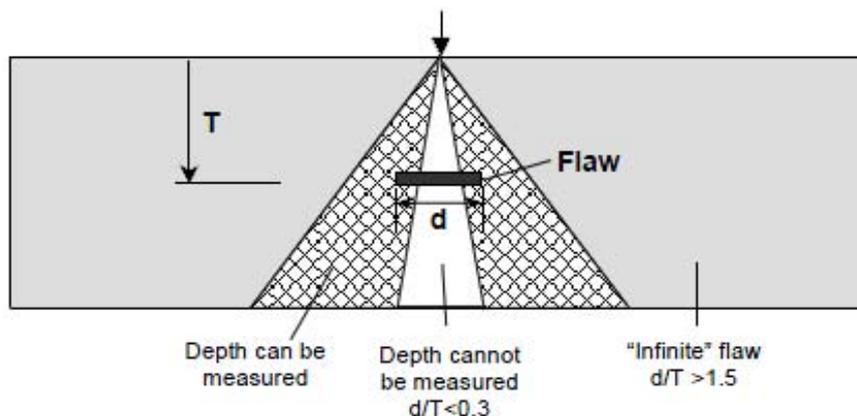


Figure III. 7. Représentation schématique du plus petit défaut détectable en impact-écho (d'après [SAN, 97])

1.2.2. Méthode électromagnétique

1.2.2.1. Radar

Le RADAR (ground penetrating radar GPR) est un procédé non destructif permettant d'effectuer en continu des auscultations de sols et d'ouvrages. Il utilise la propagation d'ondes électromagnétiques de l'ordre du méga au giga Hertz. Une antenne émettrice envoie dans le matériau une impulsion électromagnétique à une fréquence centrale déterminée (en génie civil le plus généralement 1,5 ou 2,6 GHz) de quelques nanosecondes.

Cette impulsion se propage en s'atténuant dans les matériaux et à chaque interface de deux matériaux aux propriétés diélectrique différentes, une partie de son énergie est réfléchiée vers la surface tandis que l'autre partie continue à progresser dans le matériau. Les échos successifs sont captés par une antenne réceptrice, enregistrés et compilés par l'unité centrale pour donner une trace temps-amplitude en un point (Figure III. 8a). La juxtaposition des signaux temporels enregistrés lors du déplacement de l'antenne permet d'obtenir des coupes temps-distance également appelés « radargrammes » (Figure III. 8b et c).

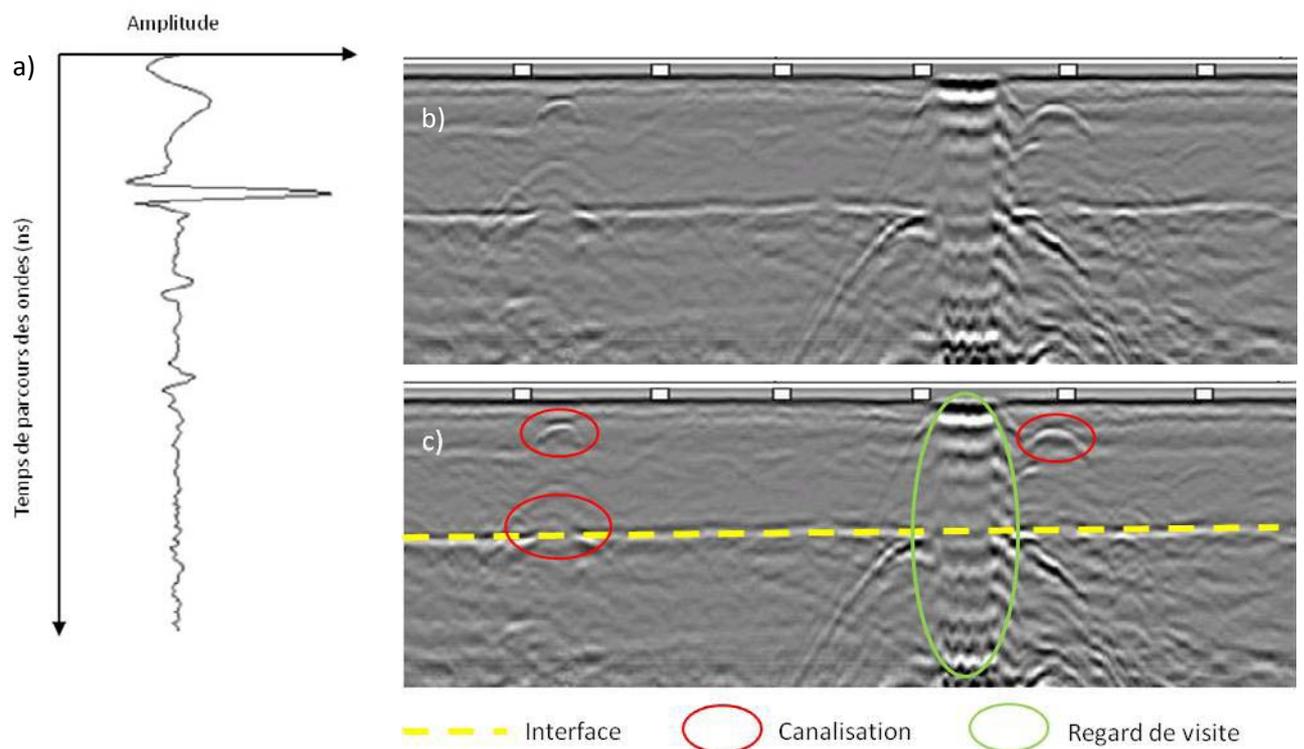


Figure III. 8. a) Exemple de trace radar b) Radargramme brut c) Radargramme interprété (Source EXAM BTP)

Le principal avantage du RADAR est sa rapidité d'investigation ainsi que sa très grande maniabilité dans quasiment tous les environnements. De plus, il couvre un large éventail d'applications : détection de canalisations, détection de gaine de précontrainte, localisation du ferrailage, détection de vides, détection de décollements dans les chaussées aux interfaces GB/GB ou GB/GC... Mais même si le RADAR est très bien adapté à la détection de vides, il est beaucoup plus limité dans le cas de délamination [SCO, 03]. En effet, les réflexions dues à la présence d'un décollement sont relativement faibles comparées à celles induites par l'existence des armatures et peuvent donc être masquées [HUS, 00].

Une méthode alternative est d'utiliser le RADAR pour détecter de manière indirecte les délaminations en s'intéressant aux facteurs à l'origine de l'apparition de délamination. Pour cela on ne recherche plus directement la délamination mais la présence d'humidité ou d'ions

chlorures dans le béton qui sont des facteurs favorisant l'initiation et le développement de la corrosion. Pour cela plusieurs solutions [RHA, 02] :

- Détermination de la constante diélectrique du béton dont les valeurs élevées sont indicatrices de la présence potentielle d'endommagement ;
- Observation de l'atténuation des ondes radar dans le béton, une atténuation élevée est associée à la présence d'endommagement ;
- Mesure de l'intensité de réflexion des ondes à la surface du béton, cette réflexion est sensible aux variations d'humidité et d'ions chlorures [LAU, 01].

1.2.2.2. Thermographie infrarouge passive

La thermographie infrarouge passive mesure la distribution des températures de surface d'un objet pour détecter la présence de défauts en profondeur. En présence de délamination et de conditions thermiques favorables, la surface du matériau présente un gradient de température entre matériau sain et matériau délaminé (Chap.1 §IV.1).

La thermographie a été utilisée par Tsubokawa *et al.* [TSU, 07] et Moropoulou *et al.* [MOR, 02] pour détecter des délaminations peu profondes dans des enrobés à chaud. Les deux études ont montré l'efficacité de la thermographie pour l'inspection de grandes surfaces, mais elles ont également mis en évidence un certain nombre de problèmes, notamment sa grande sensibilité aux conditions environnementales et aux conditions de surface telles que les radiations solaires, la température de l'air, la vitesse du vent, la rugosité de surface, la présence de corps étrangers sur la surface... De plus, cette technique ne permet pas de déterminer les dimensions des défauts en termes de profondeur et d'épaisseur.

1.2.2.3. Thermographie infrarouge active

La thermographie infrarouge active mesure également la distribution des températures de surface d'un objet pour détecter la présence de défauts en profondeur mais ceci après stimulation, thermique ou mécanique, du matériau (Chap.1 §IV.2). Les résultats de laboratoire sont satisfaisants et permettent de remonter à des données quantifiées sur la profondeur de défaut « parfaits ».

1.2.3. Bilan

Le tableau ci-après récapitule pour chacune des techniques présentées les avantages et inconvénients.

Méthode	Information sur la profondeur de délamination	Information sur l'étendue délaminée	Avantages	Inconvénients
Méthode de la chaîne	-	+	Rapide, peu coûteuse	Uniquement sur surface horizontales
Coin-tap test	-	-	Rapide, peu coûteuse	Information ponctuelle
Impact-Echo	++	-	Information sur la profondeur de délamination	Information ponctuelle
Radar	+	+	Information en continu sur un tracé	Complexité d'interprétation
Thermographie infrarouge passive	-	++	Information sur une grande surface	Très sensible aux conditions environnementales
Thermographie infrarouge active	+	++	Information sur une grande surface si on sait la stimuler	Limitée pour le moment par le dispositif de stimulation

II. Détection et influence sur la mesure infrarouge de la présence de délamination

II.1. Signature thermique d'une délamination

La délamination peut être remplie d'air, d'eau, ou d'un mélange des deux. Dans tous les cas il s'agit de fluides aux propriétés thermiques très différentes de celle du matériau les englobant. En effet, air et eau ont des conductivités thermiques respectivement de 0,026 et 0,597 $W.m^{-1}.K^{-1}$ contre environ 1,5 $W.m^{-1}.K^{-1}$ pour un béton classique. Ceci implique une modification des flux thermiques à l'intérieur des corps présentant ce type de défaut.

La délamination agit comme un isolant thermique en ralentissant les transferts de flux de chaleur. Ceci se traduit localement et selon le sens des flux (entrants ou sortants) par la présence en surface de points chauds ou froids (Figure III. 9).

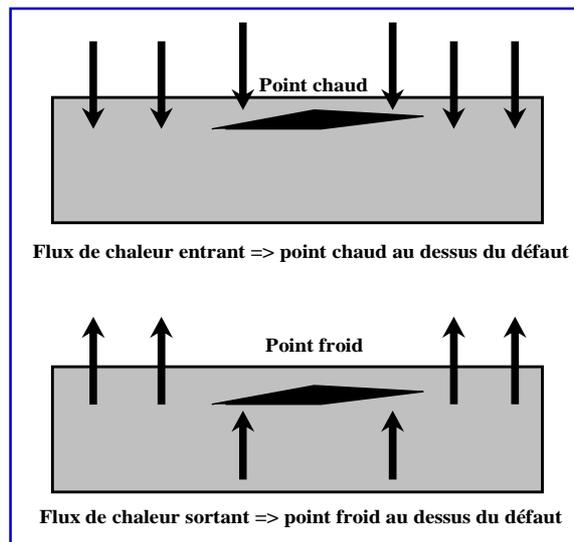


Figure III. 9. Effet d'un vide sur la propagation de la chaleur à l'intérieur d'un élément béton (d'après [CAR, 03])

Mais les flux ne sont pas simplement unidimensionnels : si la profondeur du défaut est grande face à ses dimensions latérales, les flux de chaleur peuvent « contourner » le défaut. Celui-ci pourra dès lors être invisible en surface.

Dans un grand nombre de travaux la délamination est apparentée à un vide, c'est-à-dire qu'elle est considérée comme une limite franche sans contact entre ses épontes. D'un point de vue expérimental, les délaminations artificielles sont usuellement créées en incluant à l'intérieur du béton des blocs de polystyrène dont on considère les caractéristiques thermiques proches de celles de l'air [MAI, 03] [SAK, 02]. Dans les modèles numériques, les délaminations sont représentées par des vides créant localement une augmentation de la résistance thermique [DAR, 02]. Or, une fissure parfaite n'existe pas dans la réalité : il existe de nombreux points de contacts entre les deux épontes qui constituent une multitude de ponts thermiques. L'étude de l'influence du pontage des délaminations n'a pas été trouvée dans la littérature, mais on peut penser que le pontage est de nature à réduire le contraste, et donc la détectabilité des défauts.

L'objectif de cette étude est donc multiple. On souhaite dans un premier temps préciser l'aptitude de la thermographie infrarouge à détecter des délaminations. On s'intéresse ensuite aux traitements des mesures pour déterminer si de nouveaux traitements peuvent augmenter la détectabilité des défauts. Dans un dernier temps, on souhaite prendre en compte une propriété importante de la délamination, à savoir, l'existence d'un certain taux de pontage entre ses épontes, pour en déterminer l'influence.

II.2. Influence des propriétés de la délamination sur sa détectabilité

Une délamination se caractérise par : ses dimensions, sa profondeur, la nature de son remplissage (eau ou air) ainsi que par son pourcentage de pontage. Nous souhaitons étudier l'impact de ces différentes caractéristiques propres au défaut sur sa détectabilité. Pour cela des études expérimentales et/ou numériques ont été menées, que nous allons détailler maintenant.

II.2.1. Influence de la profondeur

II.2.1.1. Etude expérimentale

II.2.1.1.1. Présentation de l'étude et description des corps d'épreuves physiques

Des mesures de thermographie infrarouge sont réalisées sur des corps expérimentaux en béton armé de dimensions 1.50 x L.50 x ép.15 cm. Chaque dalle contient une plaque de polystyrène expansé de dimensions 1.10 x L.10 x ép. 0,3 cm simulant la présence d'une délamination en leur centre (Figure III. 10). Le polystyrène est le matériau le plus couramment employé pour simuler des délaminations car il possède une conductivité thermique de $0,036 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ proche de celle de l'air sec immobile ($0,026 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$).



Figure III. 10. Vues de côté et de face des délaminations incorporées dans les dalles

Les délaminations sont positionnées à différentes profondeurs : 2 et 5 cm de la face coffrée (et par complément 12,7 et 9,7 cm de la face talochée) Tableau III. 1. Pour s'assurer de l'exactitude leur emplacement, les plaques de polystyrène sont fixées sur le treillis soudé qui est lui-même calé en périphérie sur le coffrage bois. Après coulage (12 août 2010), les dalles ont subi une cure de 28 jours en salle humide puis elles ont été placées en extérieur à proximité de leur zone de mesure (9 septembre 2010).

Tableau III. 1. Tableau récapitulatif des dalles expérimentales coulées pour l'étude de l'influence de la profondeur de la délamination

Profondeur	Polystyrène plein
2 cm	<p style="text-align: center;">D3</p> <p style="text-align: center;">Face talochée</p>
5 cm	<p style="text-align: center;">D2</p> <p style="text-align: center;">Face talochée</p>

II.2.1.1.2. Protocole expérimental

Les dalles sont posées verticalement, l'une à côté de l'autre, sur une palette et élevées à une hauteur de 1 m à l'aide d'un transpalette. Cette précaution permet d'éviter l'apparition de biais de mesure sur le bas des dalles dus à des réflexions parasites du rayonnement solaire depuis le sol béton sur la surface de la dalle. De plus ceci permet d'obtenir des conditions aux limites quasiment identiques sur toutes les faces.

La caméra thermique (FLIR SC2000) est positionnée à 3 m de la surface à ausculter, avec un angle d'incidence de 90°. Des images de la scène thermique sont acquises automatiquement à un pas de temps régulier de 10 minutes et stockées pour post-traitement. Les mesures s'étendent entre 9 et 23h et se sont déroulées, en 2010, sur 4 jours : le 21 septembre pour la dalle D2 face talochée (9,7 cm), le 22 septembre pour la dalle D3 face talochée (12,7 cm), le 29 septembre pour les mesures sur la dalle D3 face coffrée (2 cm) et 7 octobre pour celles sur la dalle D2 face coffrée (5 cm). Ces journées étaient toutes des journées très ensoleillées avec une forte amplitude thermique entre le matin et l'après midi. En parallèle des mesures infrarouges, la température à l'ombre et le taux d'humidité de l'air sont mesurés par une sonde PT100 et enregistrés à l'aide d'une centrale d'acquisition Ahlborn. Les mesures se sont déroulées en extérieur, face avant des dalles exposées sud-sud-est. Entre chaque série de mesure les dalles sont conservées en extérieur face qui sera auscultée orientée sud-sud-est.

REMARQUE. — La face coffrée des dalles étant très lisse la réflexion γ est très forte, empêchant la réalisation de mesures de bonne qualité. Afin d'augmenter l'émissivité de la surface, celle-ci a été recouverte d'une couche de peinture noire mate.

II.2.1.1.3. Traitement des mesures

La récupération des données s'effectue par l'intermédiaire du logiciel dédié ThermaCAM Researcher Pro 2.9. Ce logiciel permet d'obtenir des températures de surfaces « vraies » en effectuant certaines corrections sur les valeurs mesurées (déjà détaillé dans le Chapitre II).

On récupère à chaque pas de temps la matrice des températures de surface, pixel à pixel, pour effectuer un traitement sous Excel (Figure III. 11). Les applications courantes de la thermographie reposent sur des analyses qualitatives des images. On se satisfait en général d'une appréciation « experte », qui conduit par exemple à repérer une « tâche » chaude au centre de la Figure III. 11. Le souci est de procéder à un traitement automatique des mesures sur cette campagne expérimentale, pour apprécier au mieux les capacités de la méthode. L'existence de nombreux artéfacts comme par exemple l'effet de bord supérieur plus chaud sur l'image impose une analyse des mesures.

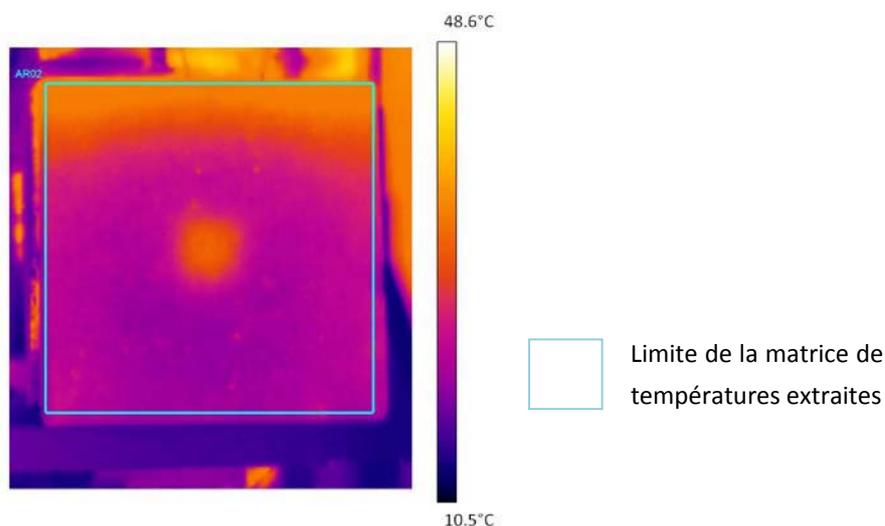


Figure III. 11. Image infrarouge de la dalle D3 (12h09)

La sensibilité thermique de la caméra utilisée pour les mesures étant de $0,08^{\circ}\text{C}$ (Chap.2 §II.2.3), et la valeur moyenne de l'écart-type des mesures sur une zone étant de $0,1^{\circ}\text{C}$, on fixe le seuil de détection de défauts à deux fois l'écart-type soit $0,2^{\circ}\text{C}$. Seront donc considérées, dans ce chapitre, comme des variations de température significatives des écarts supérieurs à $0,2^{\circ}\text{C}$. Afin d'évaluer la détectabilité des délaminations on va s'intéresser aux contrastes de température entre matériau sain et matériau délaminé.

La première partie du traitement consiste à isoler les pixels représentatifs de la délamination. Pour cela on choisit le pas temps auquel la délamination est qualitativement la plus marquée. Sachant que dans notre cas la délamination est positionnée au centre de la dalle, on calcule la température moyenne sur les 4 pixels centraux puis on augmente progressivement la taille de la matrice de pixels d'une rangée de pixels dans chacune des directions jusqu'à recouvrir la totalité de la matrice de température (Figure III. 12).

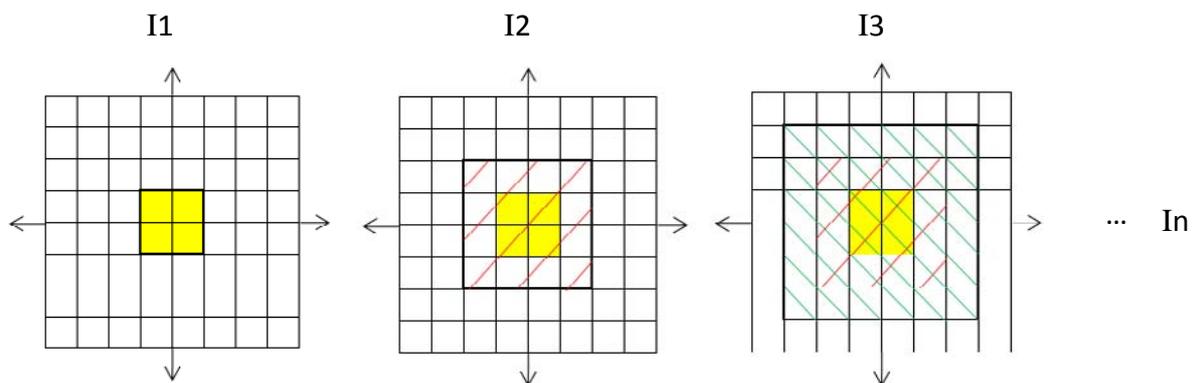


Figure III. 12. Illustration du processus de sélection des pixels représentatifs de la délamination

A partir du graphique de variation de la température moyenne en fonction du nombre de pixels sur laquelle cette moyenne est calculée (Figure III. 13), on peut identifier 4 zones :

-  Une première zone correspondant à un plateau où les températures sont élevées. On se situe entièrement dans la zone de contraste marquée. Cette zone correspond à un nombre de 144 pixels soit un carré de 12 pixels de coté ;
-  Une seconde à l'intérieure de laquelle les températures diminuent fortement. On se trouve dans la zone de transition entre délamination et matériau sain. Les limites de cette zone sont entre 144 et 3136 pixels ;
-  Une troisième zone où l'on atteint un plateau de températures basses. On se situe alors totalement dans le matériau sain et l'influence de la zone fortement contrastée ne se fait plus ressentir. Entre 3136 et 7396 pixels ;
-  Une quatrième zone pour laquelle les températures remontent progressivement. Dans cette zone les effets de bords de la dalle se font sentir. On se situe entre 7396 pixels et la fin de la matrice.

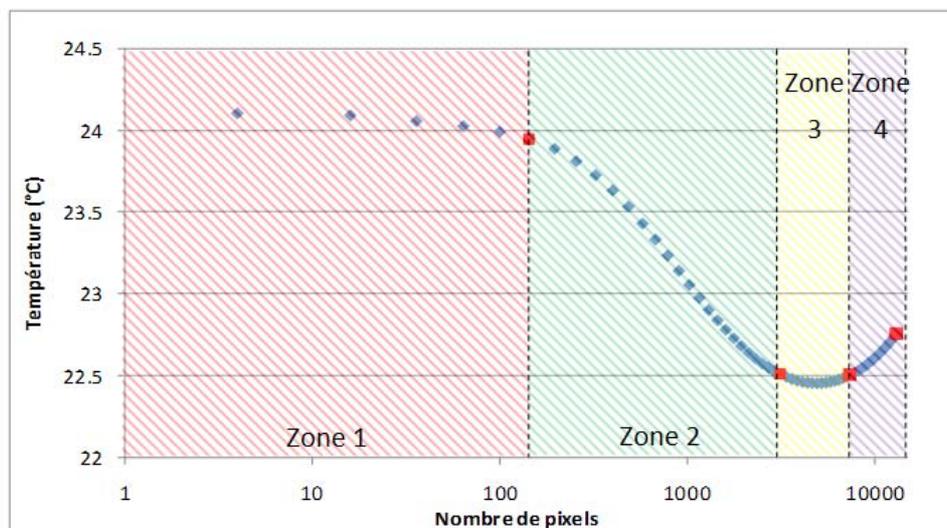


Figure III. 13. Variation de la température de surface moyenne en fonction du nombre de pixels sur laquelle cette moyenne est calculée (image prise à 12h09 sur la dalle D3)

Pour cela on va calculer à chaque pas de temps les températures moyennes sur les zones 1 et 3 par l'équation [III. 2] ainsi que le contraste de température entre ces deux zones [III. 3] (Figure III. 14).

$$\bar{T} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n p_i \quad [III. 2]$$

Avec p_i Valeur de la température au pixel i
 n Nombre total de pixels

$$\Delta T = \bar{T}_{zone\ 3} - \bar{T}_{zone\ 1} \quad [III. 3]$$

Avec \bar{T}_{zoneX} Température moyenne sur la zone X (°C)

Le même traitement sera appliqué sur toutes les dalles.

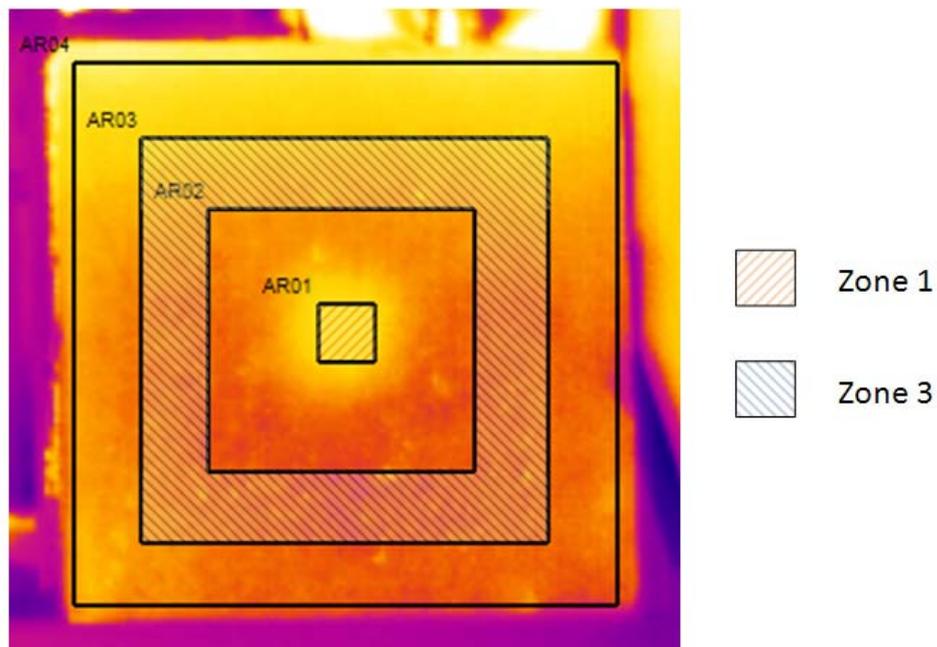


Figure III. 14. Implantation des zones d'analyse sur une dalle test

II.2.1.1.4. Résultats

Les figures suivantes (Figure III. 15, Figure III. 16, Figure III. 17) montrent les résultats expérimentaux obtenus pour des délaminations non pontées à des profondeurs de 2, 5 et 12,7 cm. Pour toutes ces figures, la zone 1 (ou zone délaminée) est figurée par la ligne noire, la zone 3 (ou zone représentant le matériau sain) par la ligne grise et la température de l'air par la courbe en pointillés. De plus, le seuil de détection des délaminations est matérialisé sur chacune des figures par la zone hachurée.

La Figure III. 15 présente les résultats obtenus pour une délamination à 2 cm de profondeur.

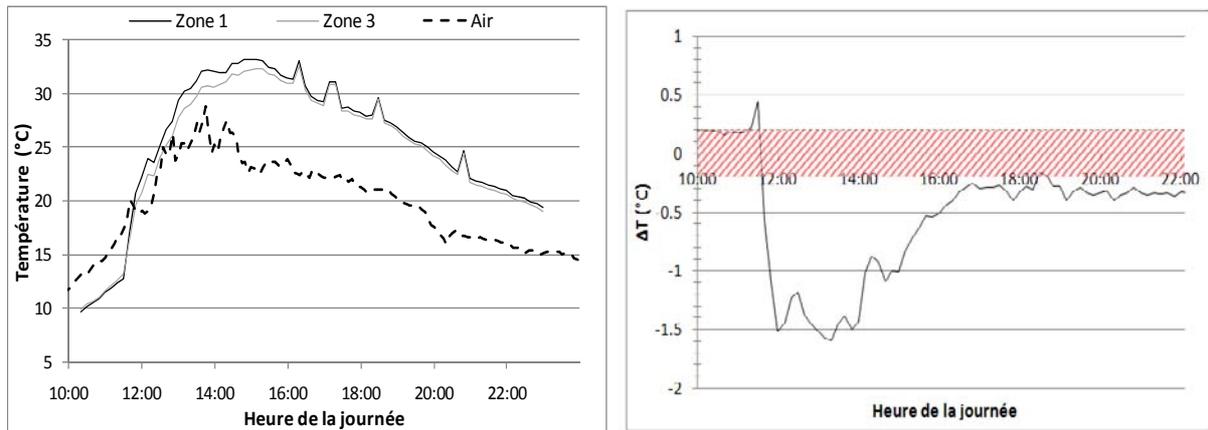


Figure III. 15. Résultats des mesures effectuées sur la dalle D3 (délamination à 2 cm)

On constate tout d’abord que les températures de surface atteintes par le béton sont très supérieures aux températures de l’air ambiant ($T_{air,max} \approx 28^{\circ}C$, $T_{dalle,max} \approx 33^{\circ}C$). On a donc sur nos mesures un effet conjugué du rayonnement diffus et du rayonnement direct du soleil. Celui-ci se fait vraiment sentir à partir d’environ 11h30 où l’on observe une brusque rupture de pente des courbes de température de surface de la dalle. De plus, l’instant du maximum de température de la dalle est plus tardif que celui de la température de l’air ($t_{Tmaxzone1}=14h59$, $t_{Tmaxzone3}=15h09$, $t_{Tmaxair}=13h45$). Le déphasage entre pics de température de la dalle et de l’air est d’environ 1h15. Il existe également un déphasage de moindre importance entre les deux zones : 10 minutes (notre pas d’échantillonnage).

En ce qui concerne le contraste de température entre les deux zones, il est très négatif entre 12 et 16 heures avec un extremum atteint autour de 13h15, mais il reste supérieur au seuil de détection jusqu’à la fin des mesures, avec une zone délaminée « chaude ».

La Figure III. 16 présente les résultats obtenus pour une délamination située à 5 cm de profondeur.

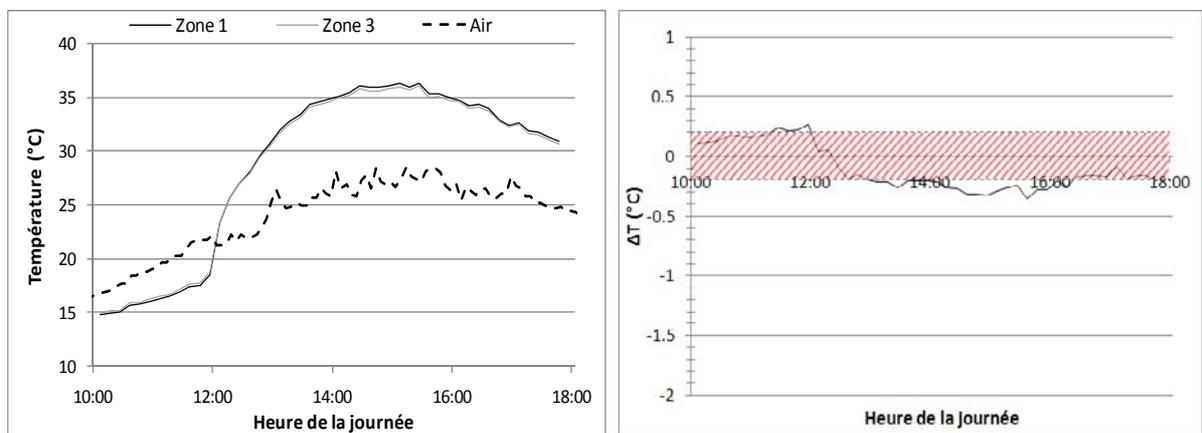


Figure III. 16. Résultats des mesures effectuées sur la dalle D2 (délamination à 5 cm)

Tout comme dans le cas précédent, on remarque que les températures de surface atteintes par le béton sont très supérieures aux températures de l'air ambiant ($T_{\text{air}_{\text{max}}} \approx 28^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{dalle}_{\text{max}}} \approx 36.5^{\circ}\text{C}$). On observe donc sur nos mesures le même effet conjugué du rayonnement diffus et du rayonnement direct du soleil que précédemment. Celui-ci se fait vraiment sentir à partir d'environ 12h15 où l'on observe une brusque rupture de pente des courbes de température de surface de la dalle. Les pics de température de l'air de la zone 1 et de la zone 3 apparaissent au même instant, aux environs de 15h-15h15.

Le contraste de température (négatif) est nettement moins important que dans le premier cas. Il dépasse le seuil de détectabilité vers 14h30 pour atteindre une valeur extrême de -0.35°C autour de 15h. On remarque que le contraste entre les zones est positif en début de journée, puis négatif l'après-midi.

La Figure III. 17 présente les résultats obtenus pour une délamination située sous une couverture de 12,7 cm de béton.

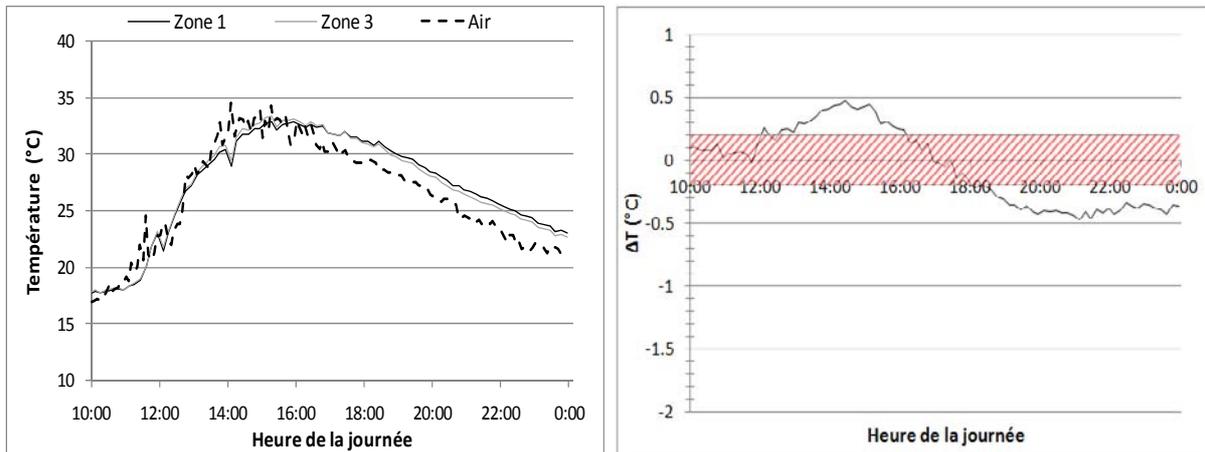


Figure III. 17. Résultats des mesures effectuées sur la dalle D3 (délaminations à 12,7 cm)

Pour cette profondeur de délaminations, les températures de surfaces maximales du béton et celles de l'air sont équivalentes ($T_{\text{air}_{\text{max}}} \approx T_{\text{dalle}_{\text{max}}} \approx 33^{\circ}\text{C}$). On observe une fois encore la brusque rupture de pente des courbes de température de surface de la dalle autour de 11h30. Les pics de température maximale des zones 1 et 3 apparaissent simultanément, postérieurement à celui de l'air ($t_{T_{\text{maxzone1}}} \approx t_{T_{\text{maxzone3}}} \approx 15\text{h}30$, $t_{T_{\text{maxair}}} \approx 14\text{h}45$).

Le contraste de température entre les deux zones est tout d'abord positif et supérieur au seuil de détection entre 13h15 et 15h30 puis supérieur au seuil de détection et négatif à partir de 19 h et ce jusqu'à la fin des mesures.

II.2.1.1.5. Interprétation

En se basant sur le seul critère de détection d'un contraste de température supérieur à $0,2^{\circ}\text{C}$, on conclut de cette étude que toutes les délaminations analysées sont détectables par

thermographie infrarouge passive. Or, il s'avère que tous les forts contrastes observés ne sont pas dus à la présence de délaminations.

De par son action d'isolant thermique, la délamination ralentit les flux de chaleur : il y a apparition d'un point chaud au droit de la délamination lors d'un réchauffement et d'un point froid lors d'un refroidissement (Chap.3 §II.1). De plus, de par sa définition [III. 3], le contraste de température est positif lorsque la zone 1 (zone centrale) est plus froide que la zone 3 (zone de référence). Une délamination est donc caractérisée en période de réchauffement par un contraste négatif et en phase de refroidissement par un contraste positif.

Les contrastes de température observés pour les délaminations simulées à 2 et 5 cm de profondeur traduisent la présence d'une délamination en profondeur. En ce qui concerne les résultats obtenus pour la délamination à 12,7 cm de profondeur (Figure III. 17), les contrastes observés ne correspondent pas aux critères de détection des délaminations. En effet, les contrastes sont inversés, positifs lors du réchauffement et négatifs lors du refroidissement, et traduisent la prédominance des effets de bords sur celle d'une délamination en profondeur (Figure III. 18 et Figure III. 19).

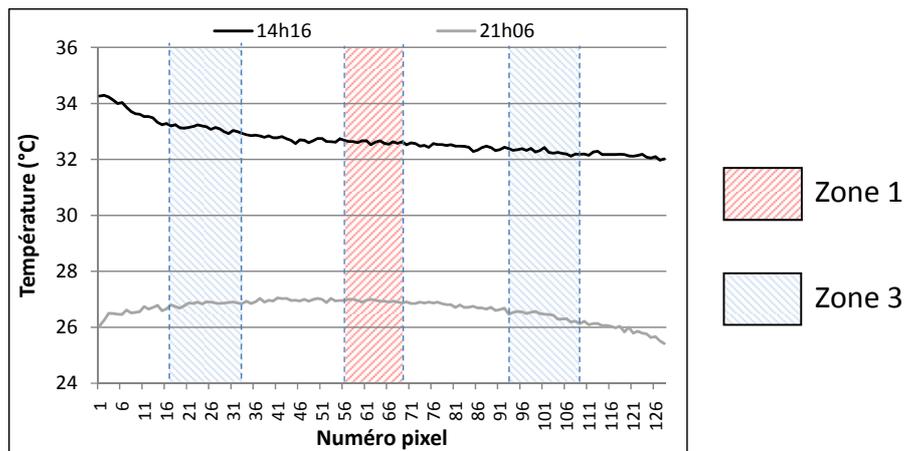


Figure III. 18. Profil de température le long de la surface de la dalle à 14h16 et 21h06

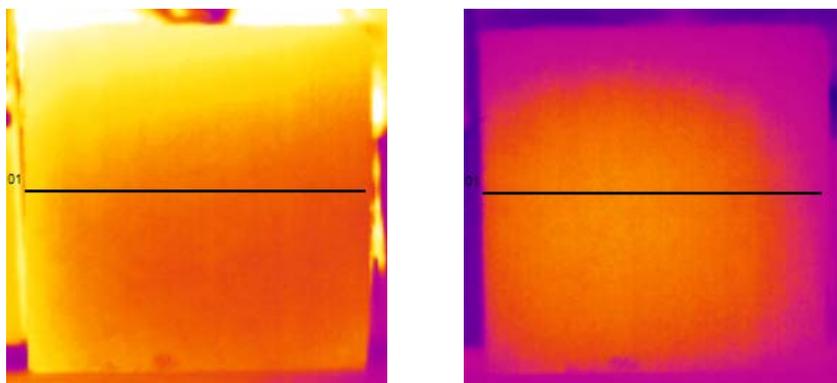


Figure III. 19. Images infrarouge de la dalle délaminiée à 12,7 cm. Gauche) 14h16. Droite) 21h06

Les effets de bord de fin de journée sont visibles sur deux des trois essais : à partir de 17 h pour la délamination à 2 cm de profondeur et à partir de 19 h pour la délamination à 12,7 cm de profondeur. Cet effet est absent des mesures réalisées pour une délamination à 5 cm de profondeur car l'enregistrement a été stoppé avant son apparition. L'effet de bord crée un contraste de température qui oscille entre 0,3 et 0,5°C.

II.2.1.1.6. Conclusions

Les mesures de détectabilité de délamination en fonction de leur profondeur ont été menées dans des conditions particulièrement favorables à leur détection : grande amplitude thermique sur la journée (environ 15°C) et insolation directe, générant des flux de chaleur importants.

Seules les délaminations situées à 2 et 5 cm de profondeur ont été détectées par thermographie infrarouge passive. Le contraste thermique de la délamination localisée à 5 cm de profondeur est proche du seuil de détectabilité. Le seuil de détectabilité des délaminations se situe donc aux alentours de 5 cm de profondeur. L'étude numérique va permettre de déterminer plus finement cette limite.

Le seuil de 0,2°C n'est pas applicable à tous les cas de figure. Dans notre étude ce seuil ne correspondait pas nécessairement à la présence d'un défaut mais également à l'apparition de gradients de température dus aux effets de bords. Le signe du contraste est porteur d'informations sur son origine. Tel que nous avons défini le contraste [III. 3] celui-ci doit être négatif en phase de réchauffement et positif en phase de refroidissement pour être potentiellement signe de la présence d'une délamination en profondeur.

II.2.1.2. Etude numérique

L'étude expérimentale a montré qu'il est possible de détecter une délamination artificielle jusqu'à une profondeur de 5 cm dans des conditions favorables : fort ensoleillement, amplitude thermique sur la journée importante, béton homogène.

Cependant, toutes les structures auxquelles nous nous intéressons en génie civil ne sont pas exposées à des conditions si favorables. Par exemple, lorsque l'on recherche des décollements ou des délaminations en sous face de tablier de pont, le rayonnement solaire direct n'intervient pas. On va donc rechercher pour des conditions de mesures plus défavorables, ouvrages à l'ombre, la limite de détectabilité des délaminations.

II.2.1.2.1. Description des corps d'épreuves numériques

Les modèles numériques prennent en compte les dimensions réelles des corps expérimentaux l. 50 x L. 25 x ht. 12,5 cm ainsi que la présence de délaminations

I. 10 x L. 10 x ht. 0,3 cm centrées à différentes profondeurs. Il est aisé numériquement de multiplier le nombre de profondeurs de délamination.

- **Modélisation des transferts thermiques.**

On simule l'évolution temporelle des températures à la surface des dalles en les plaçant dans un environnement où la température de l'air varie en fonction du temps pendant 3 jours consécutifs. Le rayonnement solaire direct n'est pas pris en compte.

- **Conditions initiales.**

Par simplification la dalle possède initialement une température homogène de 15°C (Figure III. 20). Le premier jour de modélisation permet de générer à l'intérieur des corps d'épreuves les gradients thermiques existant naturellement. Ce n'est qu'à l'issue de cette phase (lors du jour 2) que les températures sont exploitées.

$$T_{(x,y,z,t=0)} = 15^{\circ}C$$

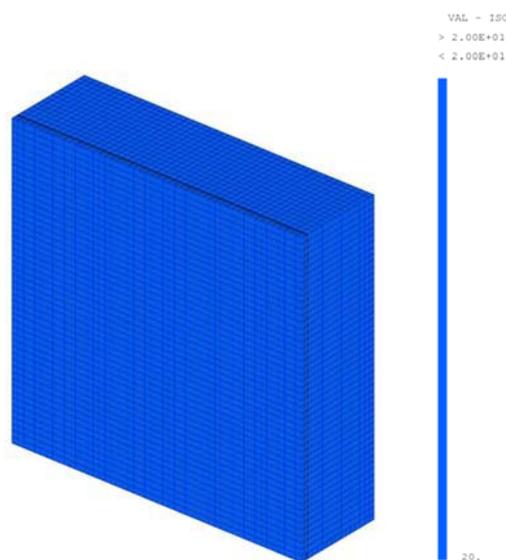


Figure III. 20. Conditions initiales

- **Conditions aux limites.**

La sollicitation consiste à placer la dalle dans un environnement thermique où la température de l'air varie de manière périodique avec un période T=24h (Figure III. 21). La dynamique de température correspond à une belle journée de printemps : nuit fraîche et journée chaude avec une amplitude thermique de 13°C.

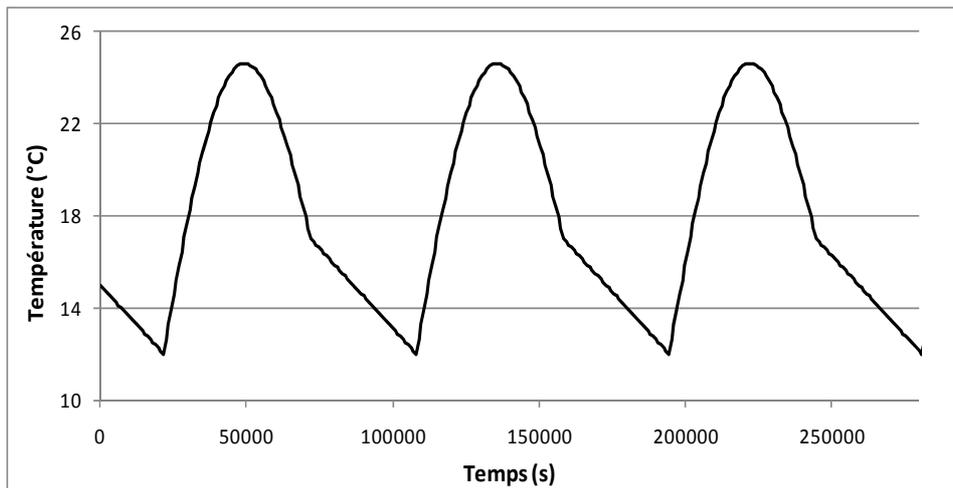


Figure III. 21. Température de l'air imposée sur les faces extérieures

Des échanges se créent entre les surfaces des dalles et l'air environnant. Ces échanges sont à la fois convectifs et radiatifs. Il est donc nécessaire d'intégrer aux modélisations les équations de Newton [III. 4] pour les échanges par convection et l'équation de Stefan-Boltzmann [III. 5] pour les échanges par rayonnement.

$$Q_c = hc.(T_p - T_f) \quad [III. 4]$$

$$Q_r = \sigma.\varepsilon.(T_p^4 - T_e^4) \quad [III. 5]$$

Avec	hc	Coefficient d'échange thermique convectif ($W.m^{-2}.K^{-1}$)
	T_p	Température de paroi ($^{\circ}K$)
	T_f	Température du fluide ($^{\circ}K$)
	σ	Constante de Stefan-Boltzmann ($5,67.10^{-8} W.m^{-2}.K^{-4}$)
	ε	Emissivité de l'objet
	T_e	Température de l'environnement dans lequel se trouve l'objet ($^{\circ}K$)

Or, lorsque la différence de température entre l'objet et le milieu dans lequel il se situe est faible (inférieure à $100^{\circ}K$), il est possible de linéariser l'équation [III. 5] par approximation [III. 6].

$$T_p^4 - T_e^4 = (T_p^2 + T_e^2).(T_p + T_e).(T_p - T_e) \approx 4.T_m^3.(T_p - T_e) \quad [III. 6]$$

Avec
$$T_m = \frac{T_p + T_e}{2} \approx T_p \approx T_e$$

Il est alors possible d'exprimer le flux radiatif en fonction d'un coefficient d'échange thermique radiatif hr [III. 7]

$$Q_r = hr.(T_p - T_e) \quad [III. 7]$$

Dans notre cas les températures de l'environnement et de l'air sont confondues. Il est donc possible de combiner les équations [III. 4] et [III. 7] pour obtenir une équation globale incluant les échanges radiatifs et convectifs [III. 8]. Pour cela on introduit le coefficient d'échange global hg .

$$Q_r = hg.(T_p - T_f) \quad [III. 8]$$

Avec : $hg = hr + hc$

Les valeurs de température de l'air utilisées ne sont pas des températures vraies mais des températures modélisées (Figure III. 21). Elles ont été obtenues en combinant une phase de variation linéaire, la nuit, et une phase de variation sinusoïdale, entre le lever et le coucher du soleil. La courbe numérique retenue présente un minimum à 6 heures du matin, un maximum à 13h45 et le début de la phase linéaire à 20h avec une amplitude thermique de 13°C. Ces valeurs ont été déduites d'une étude statistique réalisées sur l'enregistrement heure par heure des températures mesurées sur la station de Mérignac près de Bordeaux entre 1997 et 2007.

II.2.1.2.2. Bilan des éléments modélisés

La figure ci-dessous (Figure III. 22) schématise l'ensemble des phénomènes physiques modélisés ainsi que les conditions aux limites des corps d'épreuves :

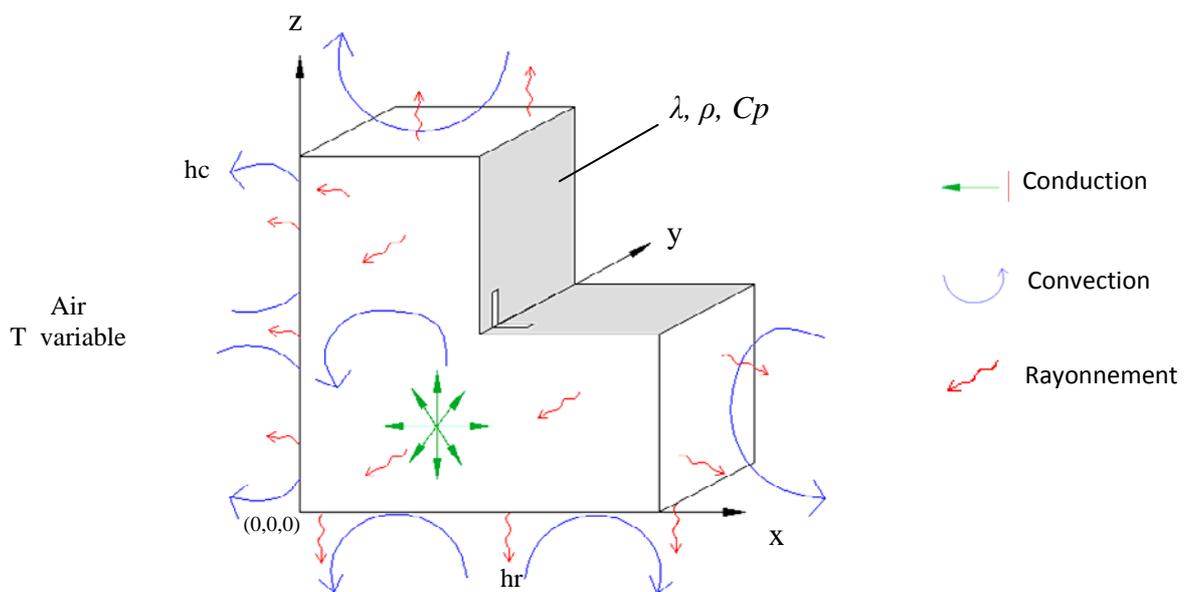


Figure III. 22. Schéma bilan des échanges modélisés

On pose l'hypothèse d'un matériau isotrope. Les valeurs utilisées dans les modélisations sont :

$$\lambda = 1.4 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$$

$$C_p = 920 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$$

$$\rho = 2400 \text{ kg.m}^{-3}$$

$$h_g = 10 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$$

II.2.1.2.3. Résultats des modélisations

Dans le but d'étudier l'influence de la profondeur de la délamination on a fait varier l'épaisseur de la couverture de béton au droit de la délamination de 2 mm à 5 cm.

Les courbes de températures de surface obtenues à la verticale du centre de la zone délaminée pour les différentes profondeurs de délamination en fonction du temps sont présentées sur la Figure III. 23.

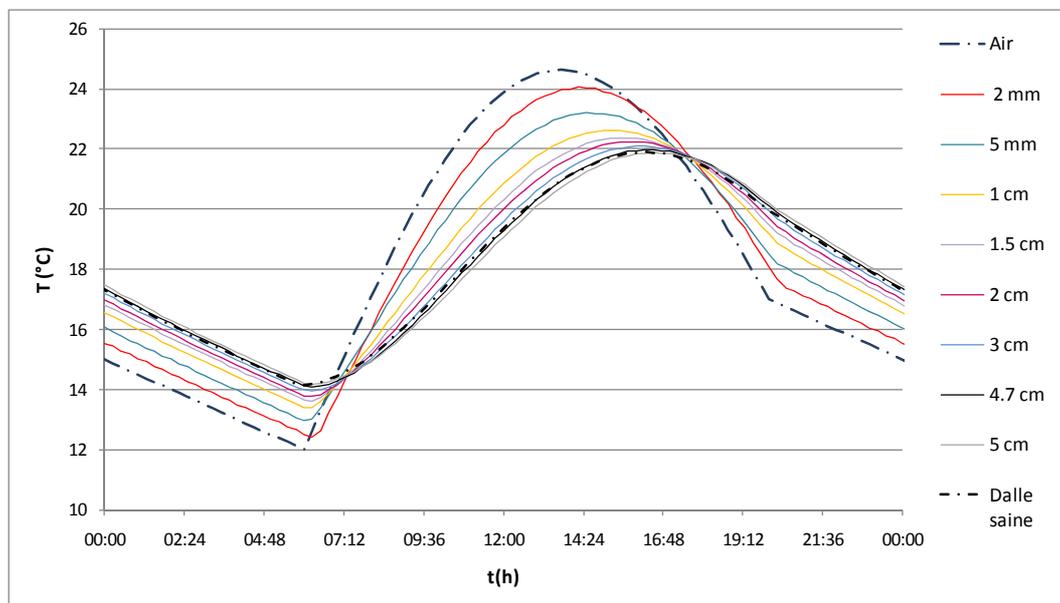


Figure III. 23. Température de surface des dalles au droit de délaminations de profondeur variables (Jour 2)

On constate que la température du matériau situé au droit de la délamination suit d'autant mieux les variations de température de l'air que la délamination est proche de la surface.

La Figure III. 24 représente les écarts de température entre un matériau sain et le même matériau contenant une délamination à profondeur variable. Les points figurés par des losanges représentent les instants optimaux de détection des délaminations.

Les écarts de températures entre matériau sain et matériau délaminé sont calculés par la formule [III. 9]

$$\Delta T = T_{d\acute{e}la} - T_{sain} \quad [III. 9]$$

Avec $T_{d\acute{e}la}$ Température au centre de la face avant de la dalle délaminée (°C)

T_{sain} Température au centre de la face avant de la dalle saine (°C)

Ainsi un matériau délaminé plus chaud que le matériau sain donne un ΔT positif.

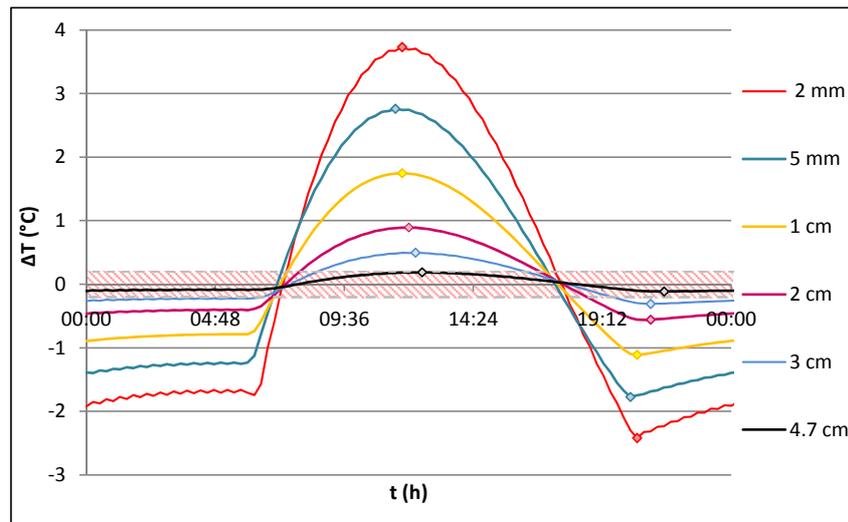


Figure III. 24. Optimum de détection des délaminations en fonction de leur profondeur

Les contrastes de température obtenus numériquement ($\approx 1^\circ\text{C}$ pour une délamination à 2 cm) sont inférieurs à ceux obtenus expérimentalement ($\approx 1,6^\circ\text{C}$ pour une délamination à la même profondeur) Figure III. 25 bas. La combinaison de plusieurs éléments peut expliquer cette différence :

- les températures de l'air utilisées dans la modélisation ne sont pas des températures réelles et les valeurs maximales modélisées sont légèrement inférieures à celles mesurées ;
- les modélisations ne prennent pas en compte le rayonnement solaire direct (ouvrages à l'ombre) dont le maximum de flux coïncide généralement avec le maximum des températures et se surimpose donc à l'influence de la température de l'air ;
- les modélisations simulent un matériau homogène et isotrope ce qui n'est pas complètement le cas d'un béton réel.

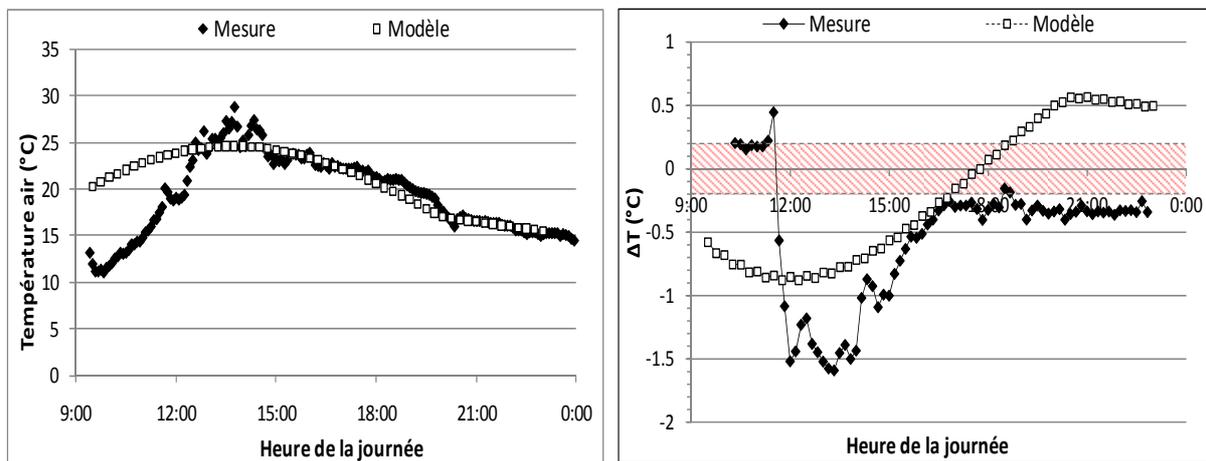


Figure III. 25. Gauche) Température de l'air mesurée et simulée. Droite) Contrastes de température entre zones saine et délaminée obtenus expérimentalement et numériquement pour une délamination à 2 cm

En se basant sur la limite de détectabilité définie précédemment (soit $0,2^{\circ}\text{C}$: zone en dehors des deux lignes pointillées horizontales sur notre graphique) on peut conclure qu'une délamination de 10 cm de coté, d'épaisseur 0,3cm et ayant une profondeur supérieure à 4,7 cm ne sera pas détectable par thermographie infrarouge passive dans ces conditions de température (amplitude thermique journalière de 13°C).

De plus, comme l'ont montré Holt et Eales [HOL, 87], on voit apparaître sur la Figure III. 24 le fait que l'instant de la mesure joue un rôle essentiel sur la détection des délaminations. En effet la signature thermique des délaminations varie dans le temps. Un même défaut peut apparaître, en fonction du moment de la journée, soit comme un élément plus chaud soit comme un élément plus froid que le matériau sain du fait des ses propriétés d'isolant thermique (Figure III. 26). Ceci confirme les résultats expérimentaux (§ II.2.1.1.4). De plus à certaines heures de la journée les défauts sont totalement invisibles.

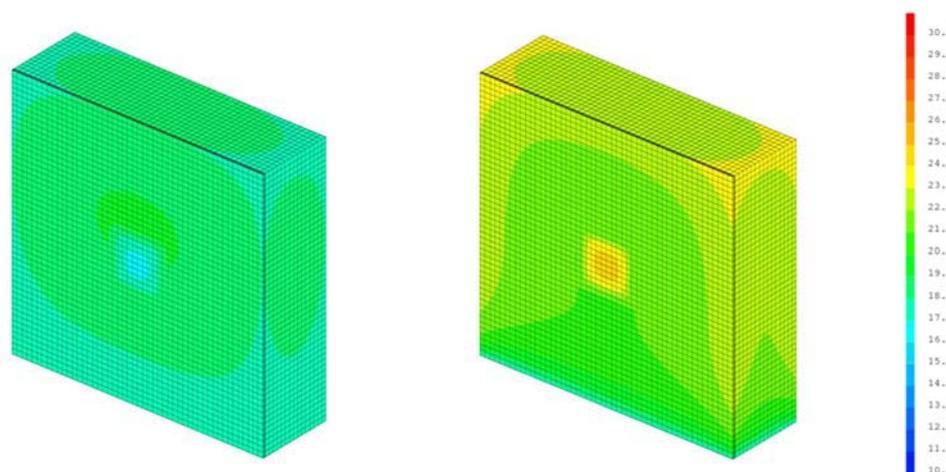


Figure III. 26. Réponse thermique modélisée de la présence d'une délamination à 2 mm de profondeur à différents instants de la journée a) à 13h30 b) à 22h30

Les Figure III. 27 et Figure III. 28 présentent comment varient, en fonction de la profondeur des délaminations, les écarts de température maximums à deux instants de la journée ainsi que les temps d'apparition de ces ΔT_{max} .

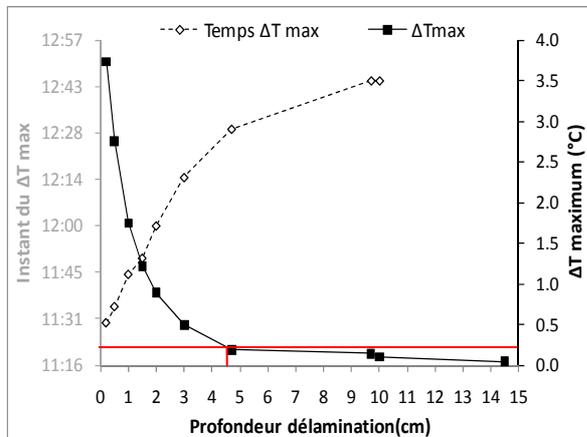


Figure III. 27. Influence de la profondeur de délamination sur les ΔT_{max} de la fin de matinée et leur temps d'apparition

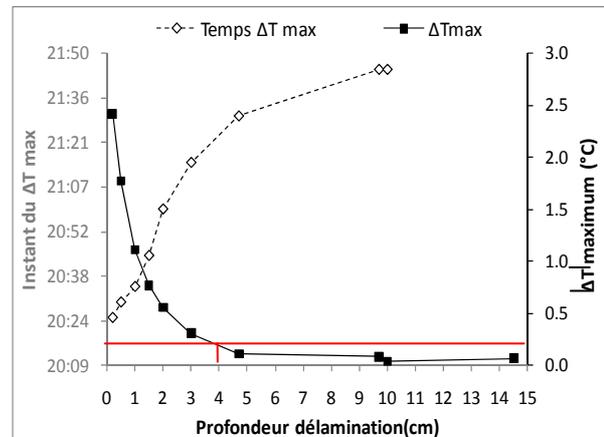


Figure III. 28. Influence de la profondeur de délamination sur les ΔT_{max} du début de soirée et leur temps d'apparition

On constate que la différence de température maximale entre zone saine et zone délaminée décroît rapidement. A partir de 4,5 cm de profondeur l'écart devient inférieur à 0,2°C. D'autre part, l'instant de ces ΔT_{max} augmente régulièrement, avec la profondeur de la délamination, entre 11h45 et 14h30 (délamination chaude Figure III. 27) et entre 20h30 et 22h00 (délamination froide Figure III. 28). Le pic de détection optimal est d'autant plus précoce que la profondeur est faible. De plus, la réalisation de mesures en fin de matinée permet la détection de délaminations jusqu'à une profondeur légèrement plus importante que celles réalisées en début de soirée : 4,5 cm en fin de matinée et 4 cm en début de soirée. Ceci s'explique par le fait que le refroidissement soit plus progressif que le réchauffement.

Une autre approche consiste à s'intéresser à l'évolution des gradients temporels de température dans le temps. En effet, ceux-ci permettent de décrire la cinétique des phénomènes.

A partir des résultats des simulations, le gradient de température est calculé au temps t à l'aide de la formule suivante :

$$\frac{dT}{dt} = \frac{T_{t+1} - T_{t-1}}{t_{t+1} - t_{t-1}}$$

La Figure III. 29 présente, pour une délamination située à 2 mm de profondeur, l'évolution des températures de surface de la dalle ainsi que l'évolution du gradient thermique dans le temps. Les principaux éléments visibles sur le graphique sont :

- Une première partie de courbe où les températures évoluent de façon linéaire (gradient de température constant) ;
- Une seconde partie pour laquelle on observe une inversion rapide et de forte amplitude du gradient de température jusqu'à une valeur maximum ;
- Une troisième phase correspondant à une décroissance progressive du gradient thermique jusqu'à sa nullité ;
- Une quatrième partie traduisant l'augmentation du gradient thermique et donc l'accélération des variations de température.
- Puis une dernière partie montrant le retour au régime linéaire initial.

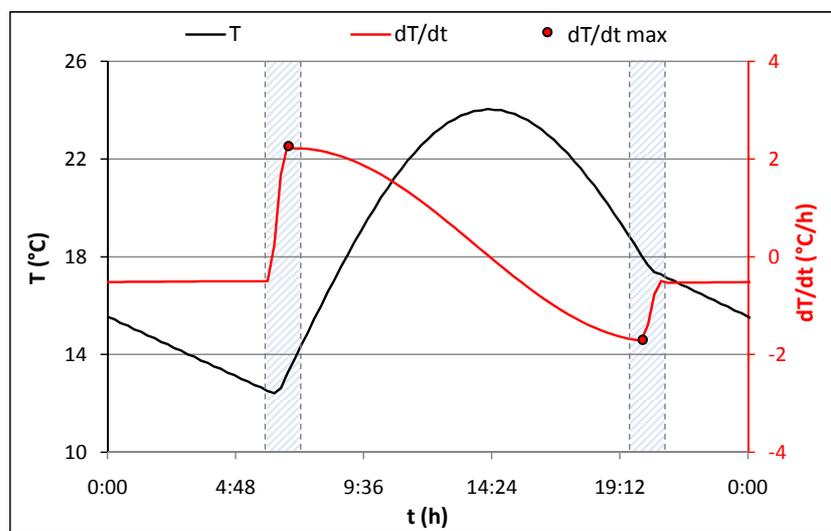


Figure III. 29. Evolution de la température de surface de la dalle et du gradient de température pour une délamination à 2 mm de profondeur

La seconde partie de ce graphique semble la plus intéressante à étudier. En effet c'est à ce niveau que l'on va pouvoir observer le « temps de réponse » de la dalle à des changements brusques de sollicitation thermique. On se rapproche ici d'une logique de thermographie active où le temps de réponse dépend de la profondeur (Chap.1 §IV.2). Sur la Figure III. 30 sont superposées les courbes de variation de température et d'évolution du gradient thermique pour des délaminations à 2 mm et à 2 cm de profondeur.

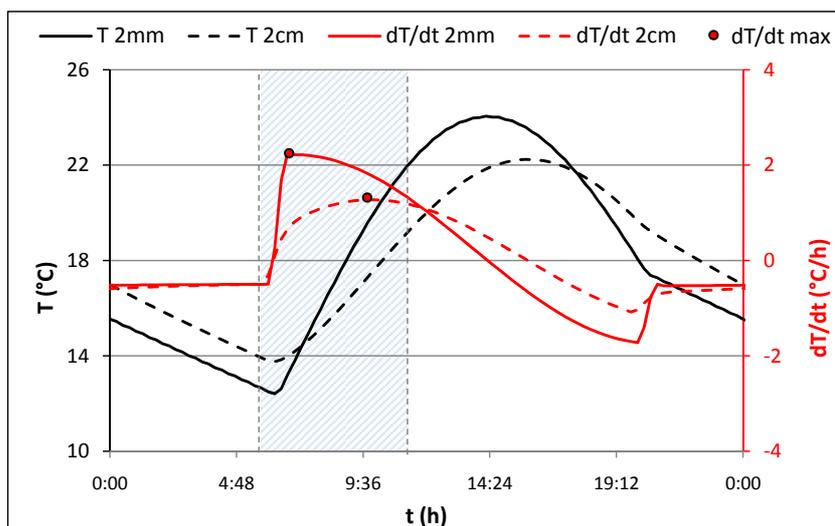


Figure III. 30. Evolution de la température de surface de la dalle et du gradient de température pour des délaminations à 2 mm et à 2 cm de profondeur

On constate que dans la partie 2 le gradient thermique de la délamination à 2 cm de profondeur évolue plus lentement que celui de la délamination à 2 mm. De plus, la valeur maximale du gradient thermique diminue avec la profondeur de la délamination.

La Figure III. 31 présente les valeurs maximums des gradients de température (en °C/h) obtenus pour les différentes profondeurs de délamination modélisées ainsi que les heures de la journée où ces gradients maximums apparaissent.

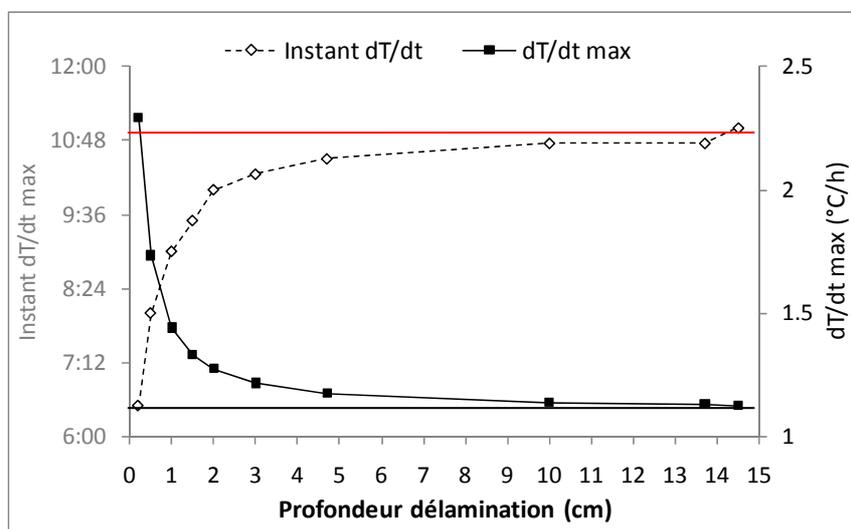


Figure III. 31. Amplitudes et temps d'apparition des gradients de température maximums

On observe que l'amplitude des gradients de température décroît très rapidement avec l'augmentation de la profondeur de la délamination jusqu'à l'établissement progressif d'un seuil ce qui va dans le sens de l'atténuation de l'amplitude du contraste thermique entre zone saine et zone délaminée observée sur la Figure III. 27. L'instant d'apparition du

maximum de gradient thermique augmente très rapidement avec la profondeur jusqu'à, lui aussi, présenter une pseudo stabilisation de ses valeurs.

Le « retard » pris pour atteindre le maximum de gradient est donc très sensible à l'épaisseur de couverture de la délamination. Il varie de quasiment 0 (réponse instantanée) pour une délamination proche de la surface, à plusieurs heures pour une délamination profonde. Il existe donc un lien entre, d'une part, la valeur maximale du gradient thermique et la profondeur de délamination et, d'autre part, entre l'instant d'apparition du gradient thermique maximum et la profondeur de délamination. Il sera donc possible en enregistrant régulièrement les températures de surface d'un objet de classer les délaminations relativement les unes par rapport aux autres en termes de profondeur selon ces deux critères : gradient thermique maximum et instant de ce gradient. L'inconvénient majeur de cette démarche est qu'elle nécessite un suivi sur une longue période (entre 6 et 12 h du matin) de l'objet à ausculter.

Pour vérifier la validité de cette démarche, nous avons calculé, à partir des températures de surface enregistrées sur nos dalles délaminées (profondeur 2, 5 et 12,7 cm), l'évolution de leur gradient temporel de température. Les courbes d'évolution des gradients sont données sur la Figure III. 32. La Figure III. 33 illustre la valeur et l'instant d'apparition du gradient maximal.

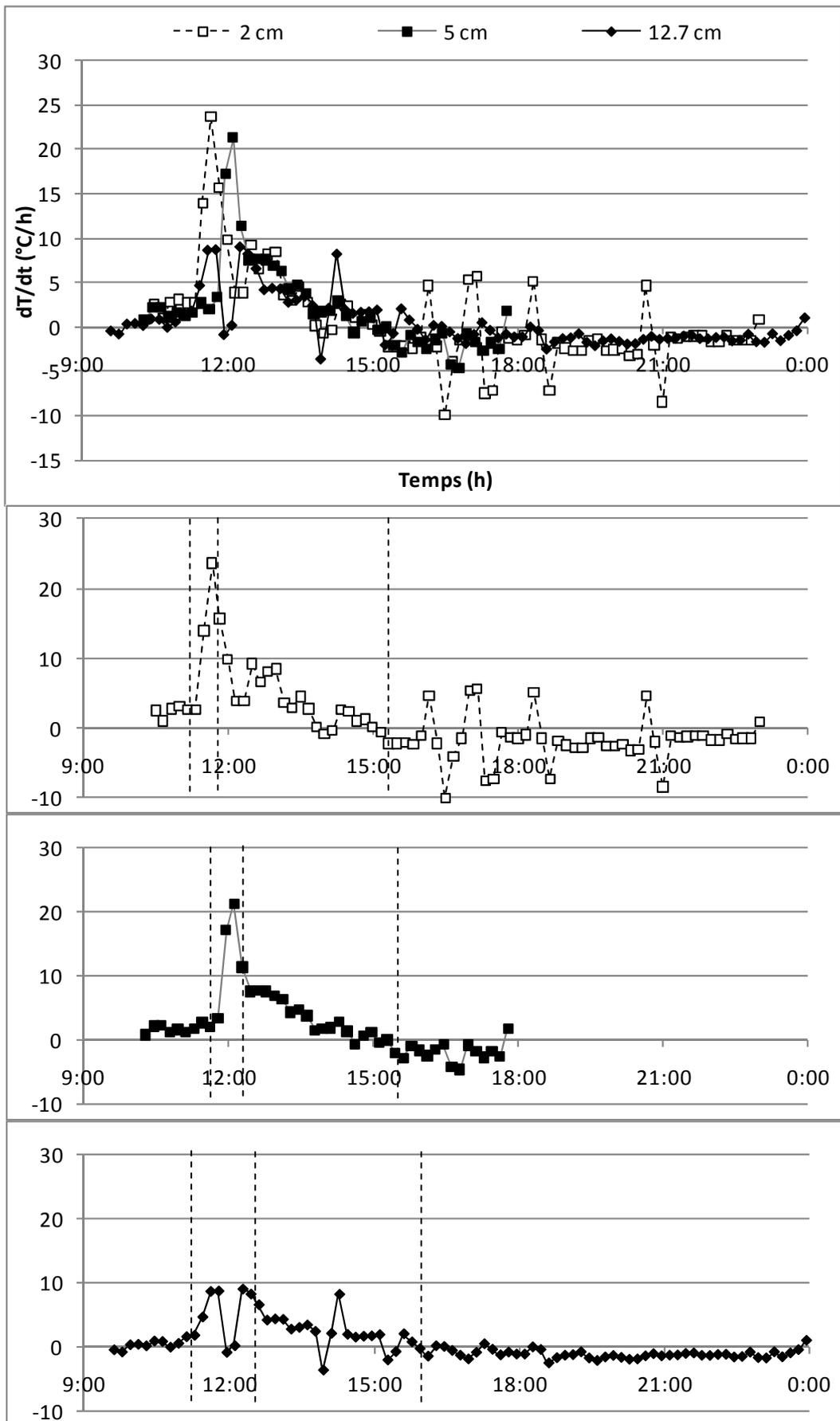


Figure III. 32. Evolution du gradient temporel de température des mesures expérimentales réalisées sur les dalles délaminées

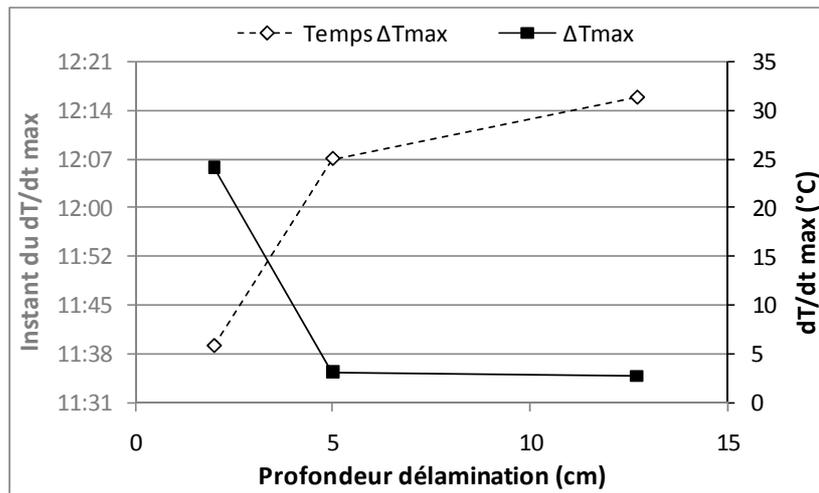


Figure III. 33. Instants et valeurs des gradients temporels de température maximums obtenus expérimentalement

Les courbes expérimentales d'évolution du gradient sont bruitées. On voit apparaître, de manière moins nette, les quatre zones décrites sur les courbes issues de la modélisation. Cependant, les valeurs du gradient temporel de température diminuent avec la profondeur de la délamination tandis que l'instant de ce maximum augmente. Mesures et modélisations sont en accord.

Il est possible de calculer le pourcentage d'écart entre les gradients de température d'une zone saine et d'une zone délaminée par la formule :

$$E(\%) = \left| 100 - \left(\frac{100 \times \frac{dT}{dt}_{dela}}{\frac{dT}{dt}_{sain}} \right) \right|$$

L'ensemble des résultats est visible dans le Tableau III. 2 suivant.

Tableau III. 2. Tableau récapitulatif des gradients de température issus des modélisations et des mesures

Profondeur délamination	0,2	0,5	1	1,5	2	3	4,7	10	13,7	14,5	Sain
dT/dt max (°C/h)	1,71	1,47	1,34	1,26	1,21	1,15	1,09	1,033	1,038	1,02	1,04
% écart avec matériau sain	64,4	41,3	28,8	21,1	16,3	10,6	4,8	0,7	0,2	1,9	0

L'analyse des résultats présents dans le tableau confirme l'impression visuelle de la Figure III. 31, à savoir que l'on a une très rapide diminution du contraste de gradient entre matériau sain et délaminé avec l'augmentation de la profondeur de délamination.

Si on se fixe un seuil de détection des délaminations à un écart de 5 % entre les gradients de température des milieux sains et altérés, il apparaît qu'une délamination ayant une profondeur supérieure à environ 4,5 cm ne pourra pas être détectée par l'étude des gradients thermiques.

II.2.1.3. Conclusions :

Un des premiers résultats à ressortir de cette étude est que le seuil de détection des délaminations est plus important pour des ouvrages soumis à un ensoleillement direct que pour des ouvrages situés à l'ombre : détection de délamination jusqu'à environ 5 cm pour un ouvrage au soleil et 4 cm pour un ouvrage à l'ombre. Il faut toutefois nuancer ces résultats par le fait que les résultats obtenus ne sont pas directement comparables, les uns étant issus de mesure et les autres de modélisation.

Mesures et modélisations montrent l'existence d'un moment optimum pour la détection de délaminations entre 11h30 et 15h. Ceci correspond à la phase de réchauffement rapide de l'air environnant l'objet. Au cours de cette période la zone délaminée apparaît chaude. Les résultats numériques montrent l'existence d'un second créneau entre 20h et 6h du matin au cours duquel la zone délaminée apparaît froide. Ce second créneau, bien que plus étendu, présente l'inconvénient d'avoir des contrastes de température maximums moins importants. Il ne sera réellement utilisable que pour des délaminations très superficielles (<1 cm de profondeur). Cela s'explique par des variations de température de l'air moins brusques qu'en début d'après-midi.

Les écarts de température maximums obtenus en thermographie infrarouge passive pour des ouvrages à l'ombre ($\Delta T_{\max}=3,5^{\circ}\text{C}$) sont très inférieurs à ceux obtenus par thermographie active (jusqu'à 19°C) [MAI, 05]. Néanmoins, ces écarts sont suffisants pour la détection des délaminations ayant une profondeur inférieure à 4 cm. La technique paraît donc adaptée à la détection de décollements à l'interface béton / tissu de renforcement (épaisseur faible des tissus de renforcement).

L'analyse des gradients thermiques est porteuse d'information. Un lien entre gradient thermique et profondeur de délamination a été mis en évidence. L'étude numérique montre que l'analyse des gradients permet de détecter des délaminations jusqu'à une profondeur d'environ 4,5 cm ce qui est légèrement supérieur à ce qui est détectable par une simple analyse de contraste de température de surface.

II.2.2. Influence du pontage

Les épontes d'une délamination n'étant pas lisses, il peut exister de nombreux points de contact entre celles-ci [SIR, 95]. Bien que leur influence individuelle puisse paraître négligeable, la multiplication de ces pontages doit, à l'échelle globale d'une délamination, avoir une influence sur la capacité de réponse des délaminations aux stimulations thermiques. N'ayant pas trouvé de référence sur le sujet dans la littérature, il semble intéressant d'étudier ce paramètre.

II.2.2.1. Etude expérimentale

II.2.2.1.1. Présentation de l'étude et description des corps d'épreuves physiques

Afin de mesurer l'influence du pontage sur la détectabilité d'une délamination, des dalles en béton de $50 \times 50 \times 15 \text{ cm}^3$ ont été coulées. Elles comportent en leur centre des délaminations de $10 \times 10 \times 0,3 \text{ cm}^3$ perforées sur une surface équivalente à 15% de leur surface totale (Figure III. 34). Lors du coulage une attention toute particulière a été portée au remplissage des trous par le béton.

Tableau III. 3. Tableau récapitulatif des dalles expérimentales coulées pour l'étude de l'influence du pontage des délaminations.

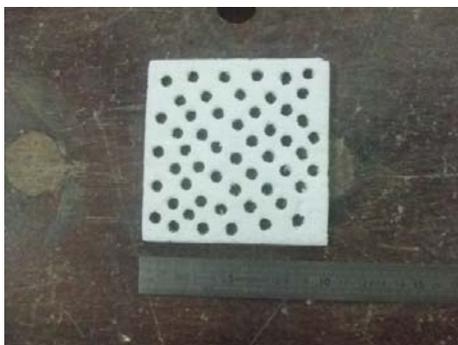


Figure III. 34. Plaque de polystyrène perforée utilisée comme délamination (\emptyset 6 mm)

Profondeur	Polystyrène perforé
2 cm	<p>D1</p> <p>Face coffrée</p> <p>Face talochée</p>
5 cm	<p>D4</p> <p>Face coffrée</p> <p>Face talochée</p>

Ces corps d'épreuves ont été coulés avec la même formulation et le même jour que ceux utilisés dans l'étude de l'influence de la profondeur sur la détectabilité des délaminations. Les délaminations ont été placées à 2 et 5 cm de profondeur (Tableau III. 3).

II.2.2.1.2. Protocole expérimental

Le protocole expérimental est identique à celui utilisé pour l'étude de l'influence de la profondeur sur la détectabilité des délaminations à savoir (§II.2.1.1.2):

- Les dalles sont disposées verticalement sur une palette et élevées à une hauteur de 1 m à l'aide d'un transpalette.
- La caméra thermique (FLIR SC2000) est positionnée à 3 m de la surface à ausculter, avec un angle d'incidence de 90°.
- Des images de la scène thermique sont acquises automatiquement à un pas de temps régulier de 10 minutes et stockées pour post-traitement.
- Les mesures s'étendent entre 9 et 23h.
- La température et le taux d'humidité de l'air sont mesurés par une sonde PT100 et enregistrés à l'aide d'une centrale d'acquisition Ahlborn.

Les mesures infrarouge sur les deux dalles contenant, soit une délamination pleine, soit une délamination pontée à une même profondeur x ont été réalisées conjointement. Les conditions de mesure sont donc identiques et permettent une comparaison instantanée des mesures.

REMARQUE. — La face coffrée des dalles étant très lisse la réflexion y est très forte, empêchant la réalisation de mesures de bonne qualité. Afin d'améliorer l'émissivité de la surface, celle-ci a été recouverte d'une couche de peinture noire mate.

II.2.2.1.3. Traitement des mesures

Les caractéristiques géométriques des dalles utilisées dans cette étude étant identiques à celles des dalles ayant servies dans l'étude sur l'influence de la profondeur de délamination sur leur détection, le traitement des mesures employé est identique. La description en est faite au paragraphe §II.2.1.1.3.

II.2.2.1.4. Résultats

Les Figure III. 35 et Figure III. 39 présentent les résultats expérimentaux acquis pour des délaminations pontées sur 15% de leur surface, à des profondeurs de 2, 5 et 12,7 cm. La légende commune aux trois figures est la suivante : zone 1 (ou zone délaminée) figurée par une ligne noire, zone 3 (ou zone représentant le matériau sain) par une ligne grise et température de l'air par la courbe pointillée. Le seuil de détection des délamination défini est représenté sur chacune des figures par la zone hachurée.

La Figure III. 35 représente les mesures de température de surface obtenues pour la délamination à 2 cm de profondeur. On rappelle que les mêmes mesures effectuées sur une dalle contenant une délamination complète ont donné un contraste de température maximum de 1,6°C à 13h15 pour une température de surface maximale de la dalle de 33°C sur la zone 1 aux environs de 15h (Figure III. 15).

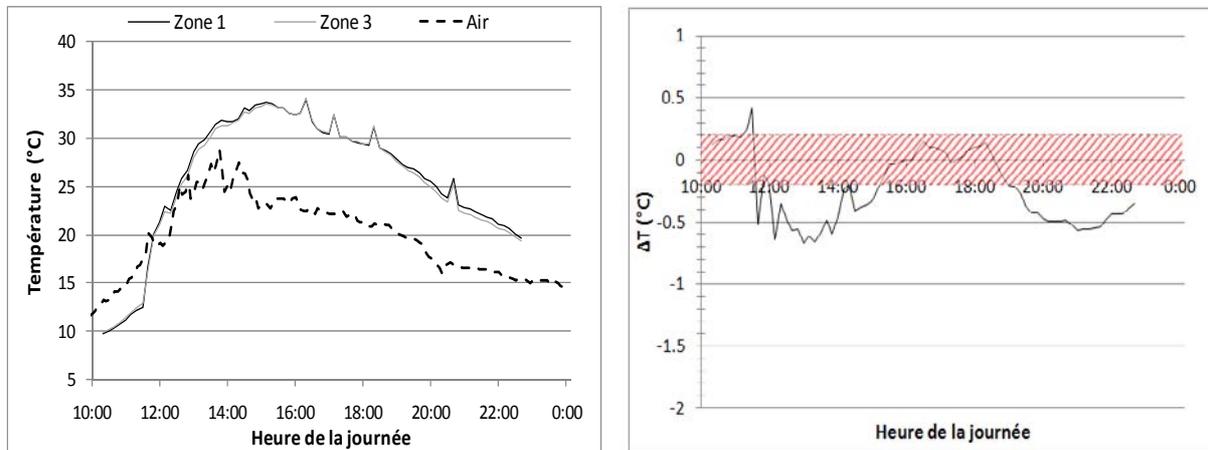


Figure III. 35. Résultats des mesures effectuées sur la dalle D1 (délamination pontée à 2 cm)

Les températures de surface maximales de la dalle sont supérieures aux températures maximales de l'air ambiant ($T_{air,max} \approx 28^{\circ}C$, $T_{dalle,max} \approx 33.5^{\circ}C$). Ceci s'explique une nouvelle fois par l'addition du flux de chaleur induit par le rayonnement solaire direct au flux de chaleur diffus. Ce flux additionnel apparaît vers 11h30 où il se traduit par une brusque rupture de pente des courbes de température du béton.

On observe deux périodes pour lesquelles les contrastes de température entre zones saine et délaminée dépassent le seuil de détectabilité, entre 11h30 et 15h et entre 19h15 et 23h. Le première période traduit bien la présence d'une délamination avec un contraste thermique maximum de 0,65°C alors que la seconde montre l'influence des effets de bords (refroidissement plus rapide des bords de la dalle). En effet, en phase de refroidissement un contraste thermique positif devrait se former au droit de la délamination. En revanche le refroidissement de la dalle par les bordures explique bien le contraste de température négatif entre le centre et les contours de la dalle (Figure III. 36 et Figure III. 37).

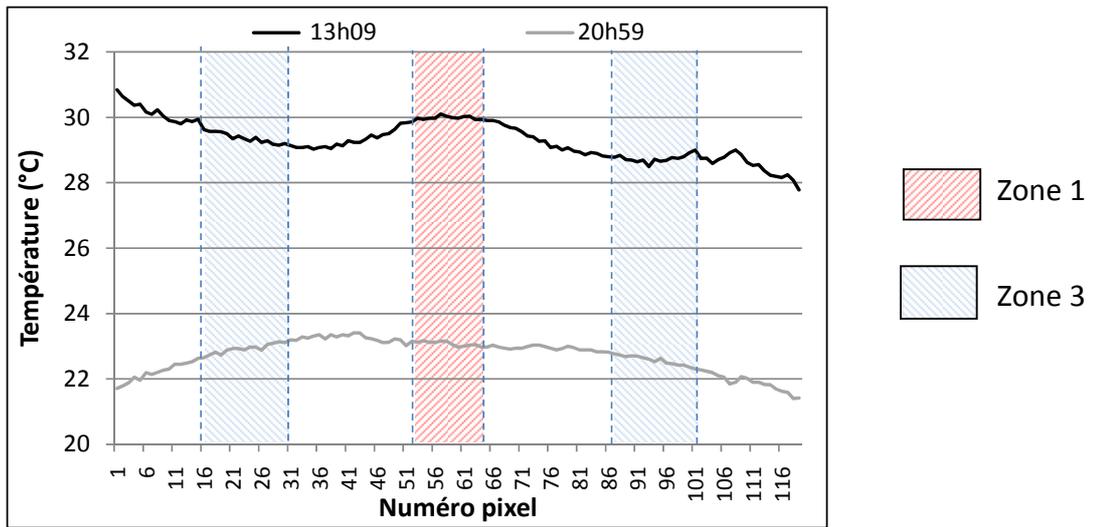


Figure III. 36. Profil de température le long de la surface de la dalle D1 à 13h09 et 20h59

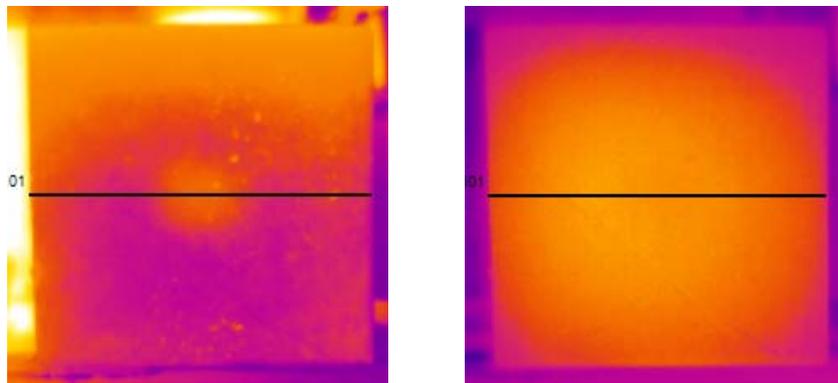


Figure III. 37. Images infrarouge de la dalle délaminée à 2 cm. Gauche) 13h09. Droite) 20h59

La délamination pontée à 2 cm sous la surface reste visible avec tout de même un contraste thermique très inférieur à celui existant dans le cas de la délamination complète (0.65°C contre 1.6°C, Figure III. 38). Un pontage de 15% de la délamination entraîne une perte de contraste d'environ 60 % pour une délamination à 2 cm de profondeur.

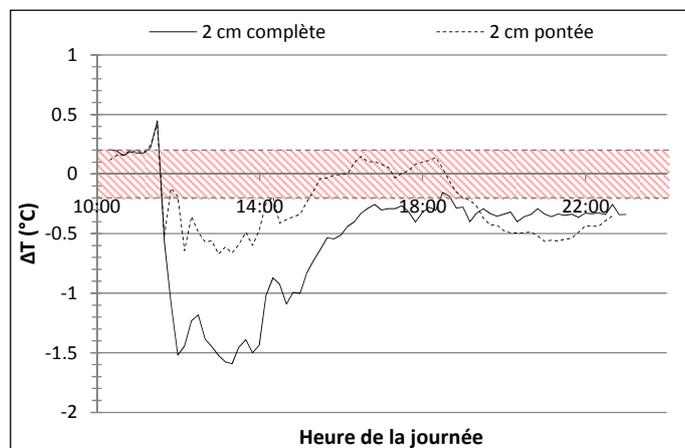


Figure III. 38. Comparaison des contrastes de températures entre zones 1 et 3 pour les délaminations pontée ou non pontée à 2 cm de profondeur

Sur la Figure III. 39 est tracée l'évolution des températures de surface mesurée sur une dalle comportant une délamination pontée sur 15% de sa surface à une profondeur de 5 cm.

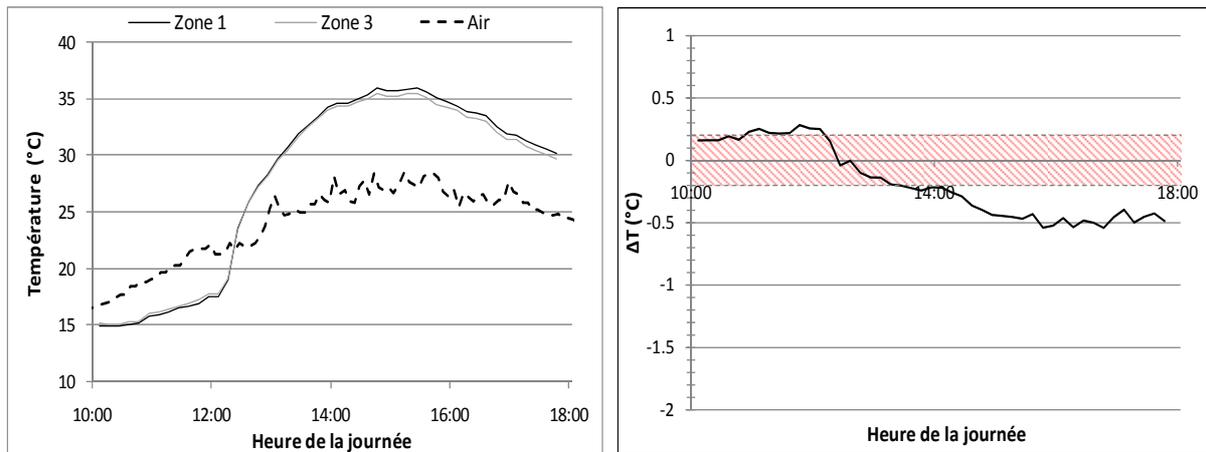


Figure III. 39. Résultats des mesures effectuées sur la dalle D4 (délamination pontée à 5 cm)

Des contrastes de température suffisamment importants pour être détectés apparaissent à partir de 14h30. Il paraît ici difficile de faire la part entre détection de délamination et effets de bords. En effet, à partir de 15h30 le contraste de température est dû aux effets de bord car nous sommes en période de refroidissement et une délamination apparaîtrait avec un contraste de température positif. Les évolutions des contrastes de température des dalles pontées ou non pontées sont très proches (Figure III. 40). Il semble y avoir un amenuisement de l'effet du pontage avec la profondeur.

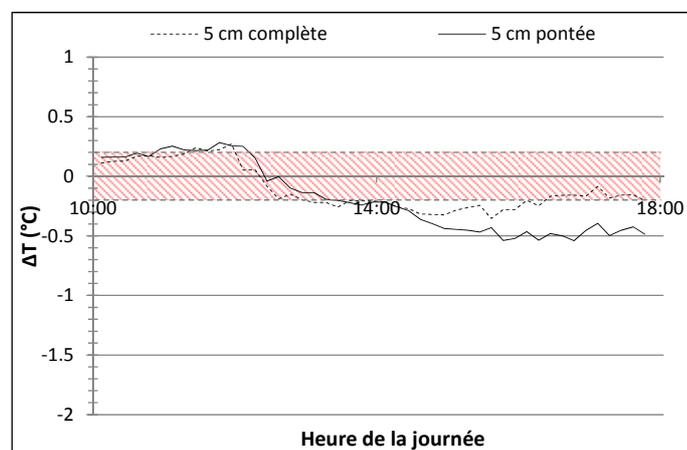


Figure III. 40. Comparaison des contrastes de températures entre zones 1 et 3 pour les délaminations pontée ou non pontée à 5 cm de profondeur

II.2.2.1.5. Comparaison délamination pleine – délamination pontée et conclusions

Le Tableau III. 4 rassemble l'ensemble des résultats des mesures expérimentales réalisées sur délaminations complète et pontée.

Tableau III. 4. Tableau récapitulatif des résultats obtenus sur délaminations pleine et pontée

Profondeur délamination	Etat	Visible ?	Contraste de température max	Instant de contraste max
2 cm	Non pontée	Oui	-1,6°C	13h15
2 cm	Pontée 15%	Oui	-0,65°C	13h00
5 cm	Non pontée	Oui	-0,5°C	16h45
5 cm	Pontée 15%	Non	-0,3°C	21h00
12,7 cm	Non pontée	Non	0,5°C	14h45

Le pontage des délaminations abaisse la profondeur maximale de détection des délaminations par thermographie infrarouge. De plus, la valeur du contraste de température maximum de la délamination à 2 cm est passée de 1,6°C pour la délamination complète à 0,65°C pour la délamination pontée à 15%, soit une diminution d'environ 60% de sa valeur. On note également qu'une délamination pontée à 2 cm de profondeur aura un contraste de température très proche de celui d'une délamination pleine à 5 cm de profondeur.

La connaissance de la valeur de pontage du délaminage apparaît donc comme un élément déterminant pour tout travail quantitatif sur la profondeur de délamination. Le seul travail sur les contrastes maximums de température atteints ne permet pas de remonter par inversion, dans le cas où tous les autres éléments entrant dans l'inversion sont maîtrisés, à la profondeur de la délamination. Ces observations sont également valables pour les travaux de thermographie infrarouge active et montrent les limites des travaux de laboratoire actuels qui utilisent des délaminations parfaites.

L'étude numérique va permettre de quantifier le taux d'atténuation des contrastes de température avec l'augmentation du pourcentage de pontage.

II.2.2.2. Etude numérique

Cette étude constitue une première approche au problème de présence de pontage au niveau des délaminations. Elle permettra d'avoir une première idée sur la manière dont le pourcentage de pontage influe sur la réponse aux sollicitations thermiques des délaminations. Ce travail permet également de montrer que l'inversion des données en thermographie infrarouge, active ou passive, ne sera pas aisée, car le niveau de pontage de la délamination restera toujours une inconnue.

II.2.2.2.1. Présentation

L'étude consiste en une modélisation aux éléments finis en 3 dimensions d'une dalle test. La dalle de dimension 50 x 50 x 15 cm³ présente en son centre une délamination de

10 x 10 x 0,3 cm³ à profondeur variable (entre 0,5 et 5 cm), et pour laquelle la densité de pontage évolue entre 0 et 15%.

Pour simuler la présence de ponts thermiques deux possibilités s'offraient à nous :

- Modéliser un à un l'ensemble des points de contact entre les deux épaves de la délamination ;
- Utiliser un système équivalent de conductivité thermique λ équivalente. Cette deuxième solution a été retenue de par sa simplicité de modélisation.

Il est possible de faire une analogie entre lois de comportement thermique et électrique. La délamination pontée peut alors s'apparenter, si l'on considère les transferts thermiques dans la direction perpendiculaire à la délamination, à un circuit de n résistances en parallèle avec des résistances $R1$ représentant l'air et des résistances $R2$ représentant les pontages et ayant les mêmes propriétés thermiques que le matériau béton constitutif de la dalle (Figure III. 41).

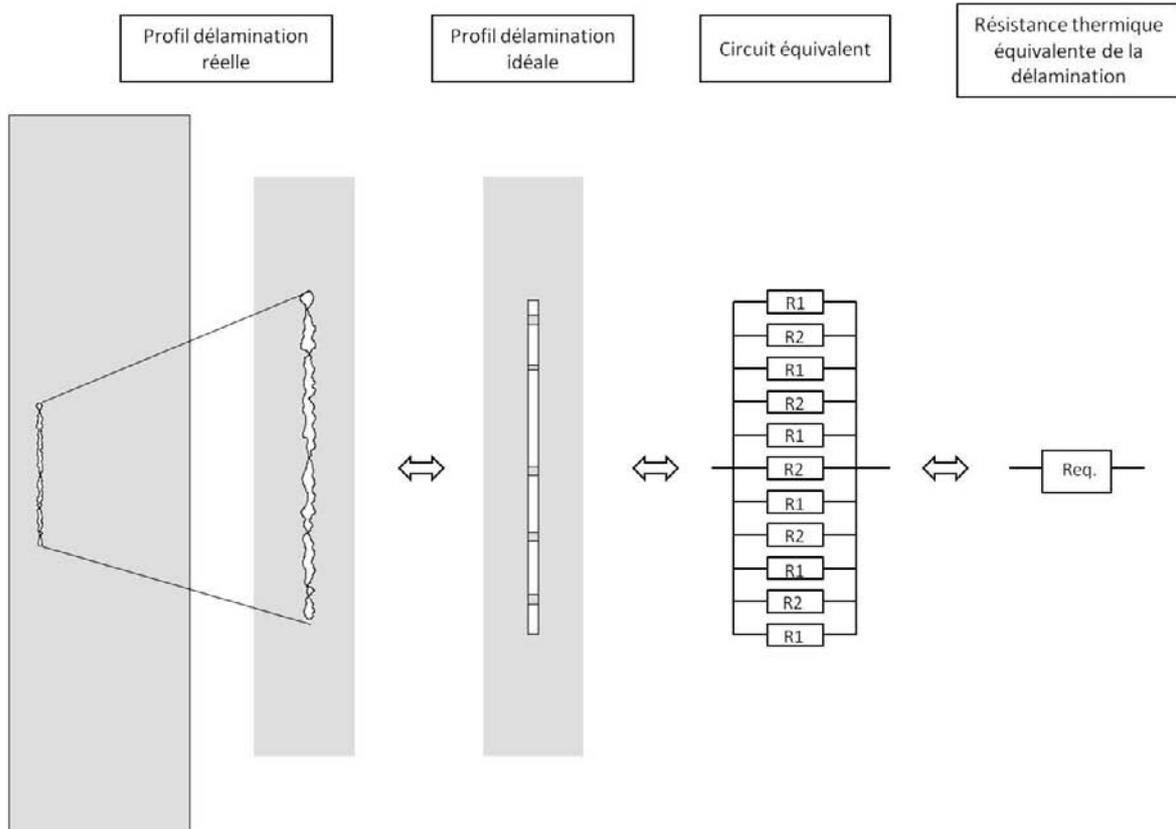


Figure III. 41. Représentation schématique des pontages à l'intérieur d'une délamination

De par cette simplification on peut calculer la résistance thermique équivalente de la délamination pour une densité de pontage donnée [III. 10].

$$\frac{1}{R_{eq}} = \sum_{i=1 \rightarrow n} \left(\alpha_i \cdot \frac{1}{R_i} \right) \quad [III. 10]$$

Avec $\sum_{i=1 \rightarrow n} \alpha_i = 1$

α_i Pourcentage de surface

A partir de l'expression de la résistance thermique [III. 11] on obtient la conductivité thermique équivalente de la délamination qui est de la forme [III. 12] :

$$\left(R_{th} = \frac{L}{\lambda \cdot S} \right) \quad [III. 11]$$

Avec L Longueur (m)

S Surface (m²)

$$\lambda_{eq} = \sum_{i=1 \rightarrow n} (\alpha_i \cdot \lambda_i) \quad [III. 12]$$

Nos modélisations utilisent donc une conductivité thermique équivalente comme propriété d'entrée de la délamination. Un inconvénient majeur de cette démarche est qu'elle suppose une répartition homogène des ponts thermiques dans la délamination et qu'elle ne permet d'obtenir qu'une réponse moyenne « homogénéisée » de la température de surface.

II.2.2.2.2. Résultats

La Figure III. 42 montre les courbes de température obtenues au droit d'une délamination située à 2 cm de profondeur pour différentes valeur de pontage de cette dernière ainsi que l'évolution des températures pour une dalle saine ayant les mêmes propriétés thermiques.

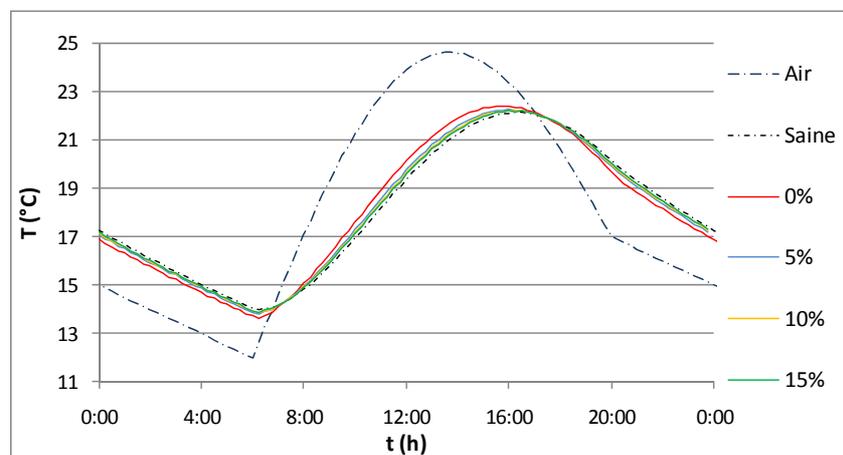


Figure III. 42. Evolution de la température de surface (délamination 2 cm) en fonction du taux de pontage

Les courbes de température représentant les différents taux de pontages, variant de 5 à 15%, sont intermédiaires entre celles d'une dalle saine et celle d'une dalle possédant une délamination complète. Il semble y avoir un écart important entre une délamination pontée à 5% et une délamination complète relativement à l'écart existant entre un pontage à 5 ou à 15%. La Figure III. 43 représentant l'évolution des contrastes de température permet de mieux visionner ce phénomène.

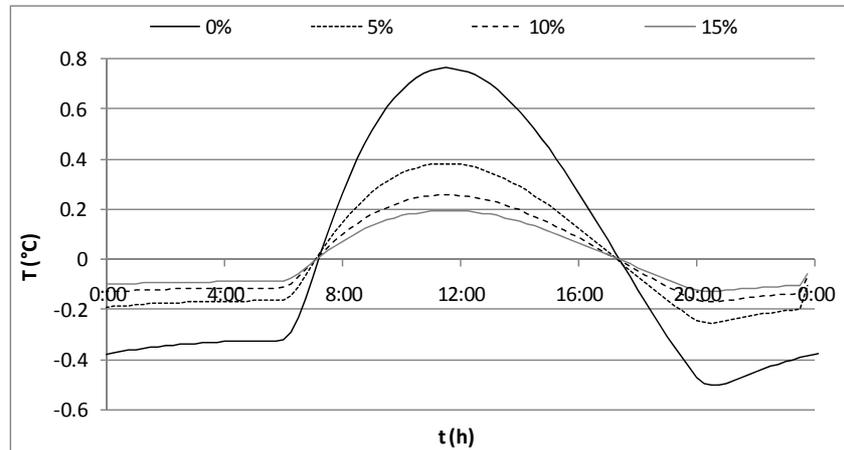


Figure III. 43. Evolution du contraste de température entre zone saine et zone comportant une délamination à 2 cm de profondeur dont le taux de pontage évolue entre 0 et 15%

En effet, le contraste thermique diminue d'environ 50% lorsque l'on passe d'une délamination pleine à une délamination pontée à 5%, de 65% pour un délaminage ponté à 10% et de 73% pour une délamination pontée à 15%. La densité de pontage a donc une influence très importante sur les flux de chaleur à travers la délamination. La présence d'un pontage même minime entraîne une perte de contraste très importante. L'existence d'un pontage ne doit donc pas être négligée dans les tentatives de résolution de problème inverse pour la détermination des profondeurs de délamination.

Afin de déterminer si l'influence de la densité de pontage est équivalente quelle que soit la profondeur des délaminations, les modélisations ont été appliquées pour des profondeurs de 0,5, 2 et 5 cm. La Figure III. 44 représente les résultats obtenus.

Plus la délamination est profonde et moins la densité de pontage a d'effet sur la mesure. Néanmoins, même pour une délamination à 5 cm de profondeur (délamination à la limite de la détection car détectable si soumise au rayonnement direct du soleil mais non détectable à l'ombre), lorsque l'on atteint un taux de pontage de l'ordre de 15% on a une perte de signal supérieure à 50% de sa valeur initiale. Pour des délaminations plus superficielles les 50% d'atténuation sont atteints pour des valeurs de taux de pontage beaucoup plus faibles. Une délamination à 2 cm perd la moitié de l'intensité de son signal pour un taux de pontage de 5%.

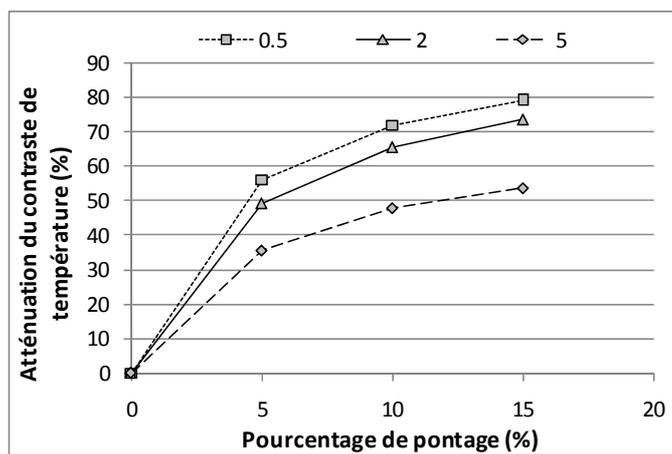


Figure III. 44. Atténuation du contraste de température de délaminations à différentes profondeurs en fonction de leur taux de pontage

D'un point de vue réponse de la délamination, on observe sur la Figure III. 45 qu'une délamination complète à 2 cm de profondeur présente le même contraste thermique qu'une délamination pontée sur 5% à une profondeur de 0,5 cm.

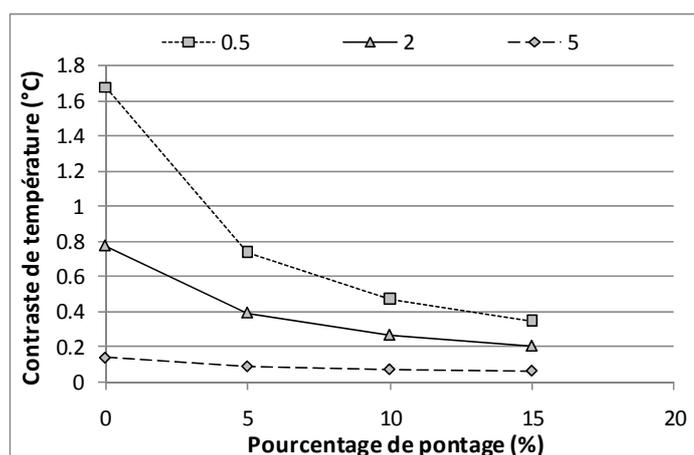


Figure III. 45. Valeur du contraste de température de délaminations à différentes profondeurs en fonction de leur taux de pontage

Ce résultat implique qu'une simple observation des contrastes de température maximum sur une surface n'est pas suffisante pour réaliser une classification des délaminations en termes de profondeur. En effet, différents couples densité de pontage – profondeur peuvent conduire aux mêmes contrastes de température en surface.

II.2.2.2.3. Conclusion

La présence de pontage au sein d'une délamination atténue la réponse aux sollicitations thermiques. Nous avons chiffré cette atténuation à 50% pour une délamination située à 2 cm de profondeur et possédant un taux de pontage de 5%. Cette atténuation est d'autant plus importante que la délamination est superficielle.

En termes de température de surface apparente, différentes combinaisons de couples profondeur de délamination – densité de pontage induisent le même contraste de température entre zone saine et zone délaminée. Un exemple a été cité précédemment : une délamination à 0% de pontage à 5 cm de profondeur et une délamination à 5% de pontage à 0,5 cm de profondeur présentent le même contraste de température de 0,8°C.

Lorsque l'on souhaite étudier la présence de délaminations sur une surface de grande dimension, le classement qualitatif des délaminations en termes de profondeur implique de poser l'hypothèse d'une densité de pontage constante sur l'ensemble de cette surface. Réciproquement, l'estimation quantitative des profondeurs de délamination nécessite de faire entrer dans les équations d'inversion un paramètre représentant la densité de pontage.

Bien que non pris en compte à l'heure actuelle dans les différentes recherches menées sur la localisation de profondeur de délamination, notre étude a mis en évidence l'importance de ce paramètre.

III.Conclusions

III.1.1.Influence de la profondeur

La profondeur des délaminations en limite la détection par thermographie infrarouge : plus une délamination est profonde et moins l'amplitude de sa réponse aux stimuli thermiques est importante.

Les mesures expérimentales réalisées sur des dalles incorporant des délaminations à différentes profondeurs ont montré que la limite de détectabilité des délaminations est proche d'un rapport 2 entre l'extension latérale et la profondeur de la délamination (e/p) : détection jusqu'à 5 cm de profondeur pour une délamination de 10 cm de coté. Ce résultat a été obtenu pour des conditions très favorables : grande amplitude thermique journalière et rayonnement solaire direct sur la surface à ausculter. Cette limite de détection, identique à celle définie empiriquement pour des matériaux homogènes et isotrope [VAV, 82], est pleinement satisfaisante pour la grande majorité des cas concrets : délaminations dues à la corrosion des armatures ou décollement des renforcements par matériaux composites. Les résultats expérimentaux montrent que les mesures doivent être réalisées entre 14 et 15 h (GMT+1) pour obtenir les meilleurs contrastes thermiques entre zones saine et délaminée.

L'étude numérique modélise des conditions de détection moins favorables : seul le rayonnement solaire diffus est intégré. Ces conditions sont proches de celles que l'on pourrait retrouver pour un ouvrage situé à l'ombre tel que la sous-face d'un tablier de pont. Dans de telles conditions, la limite de détectabilité des délaminations est de 4 cm pour une

délamination de 10 cm de côté, soit un rapport de 2,5 entre extension et profondeur, avec un instant optimum de détection entre 11h30 et 12h30. Une approche complémentaire a montré qu'un suivi temporel de l'ouvrage, entre 6 et 12h30, permet un travail sur l'évolution des gradients temporels de température de la surface. Ce traitement permet d'augmenter la profondeur de détection des délaminations jusqu'à 4,5 cm (rapport e/p de 2,2).

Une limite de cette étude est qu'elle ne s'intéresse qu'aux défauts de petite taille. Les seuils de détection définis ne sont donc pas universels. Cela est confirmé par une étude expérimentale de Larget *et al.* [LAR, 11] qui montre qu'il est possible d'identifier des variations d'épaisseur de matériau jusqu'à une épaisseur de 20 cm pour des objets de grandes dimensions.

III.1.2. Influence du pontage

Les délaminations sont des fissures parallèles à la surface du béton et comme toutes les fissures elles peuvent présenter de nombreux points de contact entre leurs épontes. Ces points de contact peuvent être assimilés à de petits ponts thermiques qui augmentent la conduction thermique à travers la fissure.

Les résultats des travaux présentés au paragraphe II.2.2 montrent que la présence de pontage entre les épontes a une influence très importante sur la réponse thermique de la délamination aux stimuli. Cet effet diminue sensiblement avec la profondeur du défaut mais reste malgré tout important, même pour une délamination ayant une profondeur de 5 cm (profondeur maximale de détection des délaminations).

Une infinité de combinaisons « profondeur – taux de pontage » conduisent à la même réponse thermique du matériau. Dans ces conditions, il s'avère difficile de remonter à des profondeurs précises de délamination. En effet, en supposant que tous les paramètres de l'équation de la chaleur soit connus, il reste une grande incertitude sur la densité de pontage au niveau de la délamination. Or celui-ci a un fort impact sur la réponse des défauts même à faible densité : au minimum 35% d'atténuation du signal pour un pontage de 5% (valeur d'atténuation obtenue pour une délamination situé à une profondeur de 5 cm).

La poursuite des travaux sur les pontages devrait tenter de mieux cerner les échanges au cœur de la délamination. Ainsi, dans les modélisations présentées, une conductivité équivalente de la délamination a été considérée. L'étude des paramètres internes à l'altération tels que l'influence des granulats sur les géométries de fissures, la répartition non uniforme de ces contacts, l'ouverture plus ou moins grande de la délamination, ou encore l'influence de l'humidité présente dans la délamination seraient des premières voies à explorer pour la compréhension des transferts de chaleur dans la délamination.

III.1.3.Suggestions d'utilisation

De part les cas d'étude rencontrés dans mon travail au sein du laboratoire EXAM BTP, j'ai constaté que les délaminations se forment le plus généralement au niveau du plan des armatures des ouvrages suite à la corrosion de celles-ci. Il pourrait donc être intéressant d'associer la thermographie infrarouge à d'autres outils de contrôle non destructif tel que le RADAR ou le pachomètre. En effet, ces outils permettent d'estimer assez précisément la profondeur d'enrobage des aciers. On pourra alors en fonction de la profondeur déterminée savoir s'il est utile ou non d'utiliser la thermographie infrarouge. Si la profondeur des armatures est supérieure à la limite de détection de la méthode, celle-ci ne sera pas utilisable.

**CHAPITRE 4 : INTERET DU COUPLAGE
DE DIFFERENTES TECHNIQUES DE
CONTROLE NON DESTRUCTIF : GESTION
ET VALORISATION DE BASE DE DONNEES
POUR INTEGRATION A L'OUTIL DE
FUSION DE DONNEES**

La connaissance de l'état de santé d'un ouvrage est nécessaire avant toute réhabilitation et/ou tout recalcul de structure. Certains critères sont importants à évaluer car témoignant de la « santé » de l'ouvrage, tels que la résistance en compression du matériau, son état d'altération, sa carbonatation... d'autres peuvent uniquement servir d'indicateur sur le vieillissement du matériau comme la teneur en eau, la teneur en chlorures...

Les outils utilisés à l'heure actuelle pour obtenir ces différents paramètres sont des essais de types destructifs avec prélèvement de matériau, tests *in situ* (front de carbonatation) et tests en laboratoire sur les éléments prélevés (teneur en eau, porosité, masse volumique, résistance en compression...) Ces résultats, bien que fiables, donnent une valeur ponctuelle de l'information qu'il est difficile de généraliser à l'ensemble de la structure. Il serait nécessaire pour obtenir une vision globale de l'état de l'ouvrage de multiplier le nombre de prélèvements ce qui n'est pas toujours concevable du fait de la nature destructive de ces essais et de leur coût qui peut être relativement élevé. Une alternative est l'utilisation de méthodes de contrôle non destructif parmi lesquelles on peut citer le RADAR, les ultrasons, la résistivité électrique, la capacimétrie, l'impact-écho... Ces techniques présentent toutes l'avantage de ne pas porter atteinte à l'intégrité de la structure. Il est donc envisageable de multiplier le nombre de points de mesure sans toutefois négliger la rapidité de la technique. En contrepartie, ces méthodes sont souvent sensibles à plusieurs des paramètres recherchés, dont on ne sait pas toujours découpler les effets, et permettent le plus souvent d'obtenir des variations qualitatives des paramètres sur une structure.

De nombreux travaux démontrent l'intérêt du couplage de méthodes non destructives pour accélérer le diagnostic et/ou positionner les zones clés pour les prélèvements destructifs [AGG, 10], [BRE, 08], [NAA, 06]. Le projet SENSO souhaite aller plus loin en combinant, pour la recherche d'un ou plusieurs paramètres, la ou les techniques les mieux adaptées ou se combinant le mieux pour obtenir la valeur de ce paramètre. Ce chapitre va donc exposer une méthodologie d'analyse des données et proposer des solutions de combinaison et de fusion des données envisageables pour une amélioration du diagnostic de l'état global du matériau à l'échelle de la structure, à moindre prix et à moindres effets dommageables sur la structure.

I. De la mesure à la base de données

I.1. Objectifs et stratégie du projet SENSO

I.1.1. Objectifs

L'objectif du projet SENSO est de proposer une méthodologie d'évaluation de l'état des ouvrages en béton armé s'appuyant sur des techniques innovantes presque exclusivement issues du contrôle non destructif. En particulier une approche multi-technique est proposée, associant différentes familles de contrôle non destructif.

Pour cela, la quantification de la variabilité des mesures face à un indicateur donné apparaît comme un objectif essentiel du projet. En effet, la variabilité de la mesure existe à plusieurs niveaux ; de la répétabilité de la mesure localement à la variabilité de la mesure sur la globalité de la structure, il est intéressant de la quantifier à ces différents niveaux pour déterminer si les variations de valeurs mesurées sont représentatives d'une variation réelle du paramètre recherché. La définition des différentes échelles de variabilité ainsi que leur quantification sera détaillée dans la suite de ce chapitre. Les variabilités seront définies et calculées pour chacune des techniques et plus particulièrement pour chacun des observables issus des techniques.

Dans ce contexte, la constitution d'une base de données associant observables issus de la mesure et indicateurs de l'état des ouvrages sur une gamme représentative de bétons paraît indispensable. En effet, bien organisée, la base de données est accessible et utilisable par tous les partenaires. Elle permet de regrouper toutes les mesures d'observables ainsi que leurs différentes variabilités.

Le projet vise également à proposer une méthodologie de traitement des données issues de l'évaluation dans la stratégie globale de surveillance des ouvrages avec pour objectif de permettre une gestion plus raisonnée du patrimoine bâti. A ce titre il est proposé de valoriser l'approche multi-technique proposée en mettant en place une procédure de fusion des données issues de l'auscultation [LMD, 09].

I.1.2. Stratégie générale

Il faut tout d'abord définir des « indicateurs » pertinents de qualité du matériau. Les indicateurs d'états ciblés par le projet sont :

- Des indicateurs de durabilité : la porosité, la teneur en eau, le module d'Young et la résistance mécanique ;

- Des indicateurs pathologiques : la teneur en chlorures, la profondeur de carbonatation, qui sont deux indicateurs essentiels vis-à-vis de la corrosion des armatures.

Pour chaque indicateur, les objectifs sont d'évaluer leur valeur (caractéristiques moyennes et degré de variabilité) et d'estimer en parallèle le degré de fiabilité de cette évaluation. Afin de remonter à ces paramètres chaque équipe impliquée dans le projet doit :

- Développer les performances de sa ou ses techniques d'investigation, ainsi que les connaissances des phénomènes physiques mis en jeu dans la mesure ;
- Acquérir des données expérimentales en laboratoire sur des corps d'épreuves et des maquettes aux propriétés contrôlées ;
- Acquérir des données *in situ* visant à quantifier la variabilité de la mesure en conditions réelles ;
- Participer à l'élaboration d'une base de données regroupant l'ensemble des mesures consolidées afin d'appliquer des méthodes d'analyse et de fusion de données dans le but de valoriser l'ensemble des données recueillies.

La démarche générale utilisée pour mener à bien les objectifs du projet a déjà fait l'objet d'une description détaillée au paragraphe § II.1.2.

I.2. Techniques de CND utilisées

Ce paragraphe fait une présentation succincte des différentes techniques de contrôle non destructif utilisées dans le cadre du projet.

I.2.1. Résistivité électrique

La mesure de résistivité électrique est utilisée pour l'évaluation non destructive des ouvrages. Elle détermine la capacité d'un matériau à laisser circuler un courant électrique. On peut établir, grâce à la mesure de la différence de potentiel entre deux électrodes, suite à une injection de courant, des cartes de résistivité apparente pour un écartement donné, et représenter des variations de propriétés électriques à un niveau donné.

Deux équipes ont travaillé avec cette technique (Figure IV. 1) :

- Le laboratoire I2M (Bordeaux) avec un dispositif quadripôle carré avec des espacements de 5 et 10 cm de coté ;
- Le LMDC (Toulouse) avec un dispositif Wenner avec un espacement de 5 cm entre électrodes.

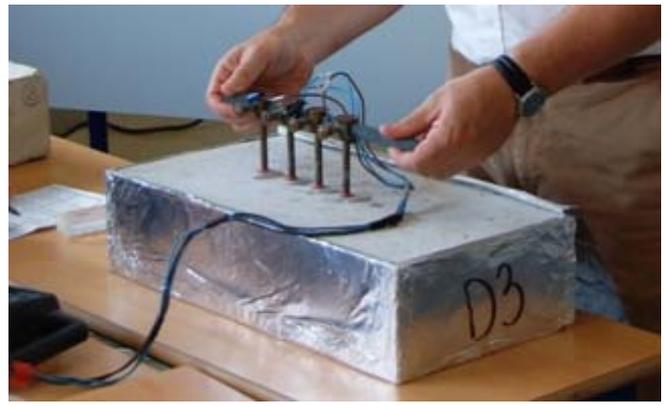


Figure IV. 1. Gauche. Dispositif quadripôle, Droite. Dispositif Wenner [LMD, 09]

1.2.2. Ondes de surface ultrasonores

Les ondes de surfaces (OS) ou ondes de Rayleigh sont d'une génération relativement aisée et permettent de remonter à une information sur les caractéristiques mécaniques du matériau en profondeur à partir d'un dispositif expérimental posé en surface. Les ondes de surface présentent en outre les avantages suivants :

- elles ne demandent l'accès qu'à une seule face de la structure, ce qui facilite l'inspection des ouvrages ;
- des recherches antérieures ont montré que parmi les différents types d'ondes, les OS sont les plus sensibles aux modifications des paramètres mécaniques du béton [LMD, 09] ;
- la profondeur de pénétration dépend de la longueur d'onde ce qui permet, au moyen de l'inversion, d'établir un profil de variation de la vitesse en fonction de la profondeur.

Plusieurs équipes travaillent également avec cette technique :

- Le laboratoire GEA-IEMN de l'École Centrale de Lille qui utilise un robot automatisé (Figure IV. 2. Gauche) pour générer et mesurer la vitesse des ondes de surface tout en faisant varier la distance émetteur – récepteur entre chaque mesure. Le principe général de mesure consiste à générer et recevoir des OS à N distances, à l'aide d'une paire de transducteurs angulaires identiques, déplacés le long du profil de mesure [PIW, 09] ;
- Le laboratoire IFSTTAR (Nantes) travail avec un dispositif expérimental par interférométrie laser en réception (Figure IV. 2. Droite). Les ondes de surface sont générées par un transducteur piézo-électrique IMASONIC au contact, centré sur la fréquence 120 kHz. La réception est assurée par un interféromètre laser POLYTHEC (OFV-505 + OFV-5000 + VD-02) qui mesure une vitesse particulière [ABR, 09].

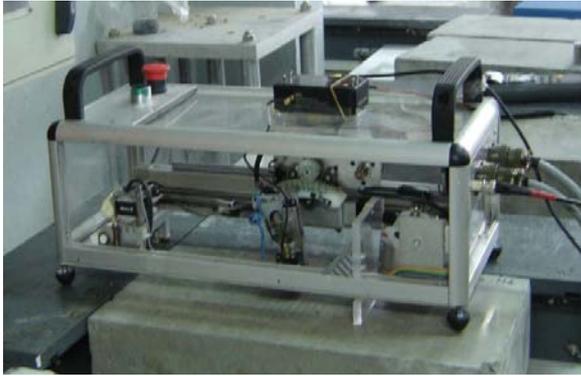


Figure IV. 2. Gauche. ROBOT de GEA-IEMN, Droite. Banc de mesure de l'IFSTART

1.2.3. Ondes de compression et ondes rétrodiffusées

La mesure de la propagation des ondes par transmission permet de mesurer la vitesse des ondes mais pas leur atténuation. La technique des ondes rétrodiffusées qui consiste à enregistrer les réflexions et diffusions d'ondes renvoyées vers le transducteur permet d'accéder à une atténuation spécifique (Figure IV. 3). Ainsi les deux approches se complètent dans le cadre d'essais sur site [GAR, 08²].

Les mesures de ces deux types d'ondes ont été réalisées par le laboratoire LCND (Aix-en-Provence). L'inconvénient majeur de la première mesure est qu'elle nécessite un accès aux deux faces du matériau à tester, elle n'est donc pas toujours applicable sur site.

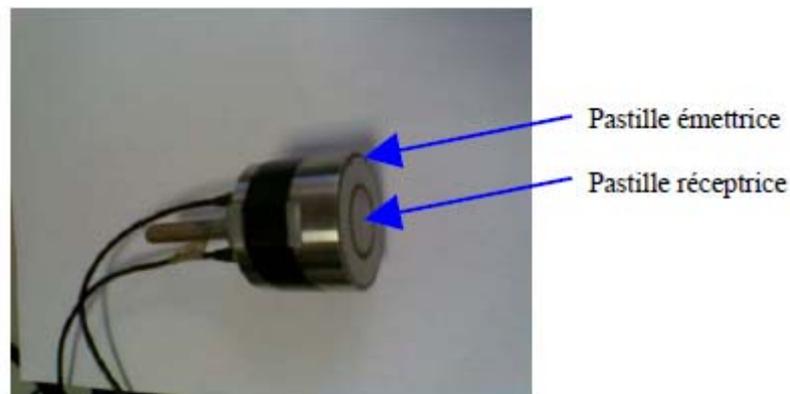


Figure IV. 3. Dispositif utilisé pour la mesure des ondes rétrodiffusées [GAR, 08¹]

1.2.4. Impact-echo

Le principe de cette technique consiste en une analyse fréquentielle d'ondes mécaniques de vibration d'une structure en béton suite à un choc. La source et le capteur à pointe mesurant les déplacements de la surface auscultée sont situés à faible distance l'un de l'autre (Figure IV. 4).

Les mesures impact-écho ont été menées par le laboratoire IFSTTAR. Il est à noter que la géométrie des corps d'épreuve SENSO a conduit à un développement du traitement des résultats fournis par la technique au cours du projet [LMD, 09].

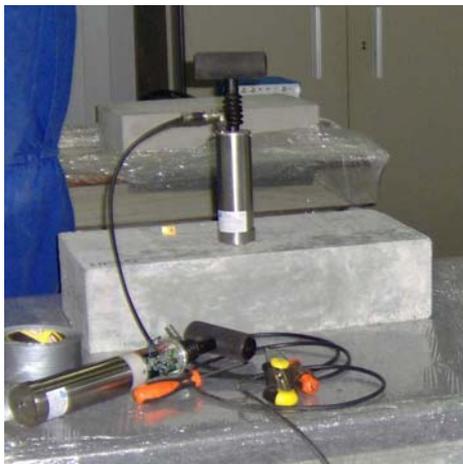


Figure IV. 4. Mesure par impact-écho

1.2.5. Radar

La technologie RADAR est généralement mise en œuvre sur les structures en béton à des fins de reconnaissance géométrique (détection d'armatures, positionnement en plan et en profondeur). Un RADAR est un dispositif électromagnétique impulsionnel rayonnant, via une antenne émettrice, de l'énergie qui se propage au sein de l'élément ausculté. Une antenne réceptrice reçoit une partie de cette énergie émise, partie correspondant à l'onde transmise directement de l'émetteur vers le récepteur et aux ondes réfléchies par les objets rencontrés (armatures, face opposée de l'élément...). Cette énergie reçue constitue la réponse de l'élément ausculté matérialisée par le signal Amplitude-Temps. L'analyse du signal, et en particulier des temps de propagation, permet d'extraire la profondeur des objets réflecteurs (armatures) moyennant des hypothèses plus ou moins réalistes sur les vitesses de propagation. Enfin, la juxtaposition des signaux enregistrés le long d'un profil de mesure permet de construire une image radar correspondant à une coupe en profondeur de l'élément ausculté. La technologie RADAR présente des avantages multiples tels que la fiabilité, la reproductibilité et un rendement sans équivalent autorisant l'auscultation exhaustive d'un ouvrage.

Les pratiques usuelles d'analyse et d'exploitation des mesures radar se limitent très généralement à l'évaluation grossière de la profondeur des objets réflecteurs. Pourtant, la réponse électromagnétique de l'élément ausculté véhicule beaucoup d'informations peu exploitées. Les travaux menés précédemment au LMDC ont montré que cette réponse était sensible à certaines propriétés physiques des bétons comme la teneur en eau, la teneur en chlorures et, dans une moindre mesure, à la porosité du béton [LAU, 01], [SBA, 01], [KLY, 04]

Deux équipes partenaires du projet travaillent à cette technique :

- Le LMDC exploite les informations véhiculées par l'onde directe émetteur-récepteur générée par une antenne bi-statique classique (Figure IV. 5. Gauche) ;
- Le laboratoire IFSTTAR travaille également sur l'onde directe mais ils utilisent une antenne bi-statique modifiée de manière à pouvoir faire varier l'écartement entre émetteur et récepteur (offset) sur de courtes distances (Figure IV. 5. Droite).



Figure IV. 5. Gauche. Dispositif du LMDC. Droite. Antenne bi-statique modifiée de l'IFSTTAR

1.2.6. Technique capacitive

Le principe de cette technique repose sur la mesure de la fréquence de résonance d'un circuit oscillant (autour de 30-35 MHz) entre deux électrodes posées sur du béton (Figure IV. 6). Si on considère ces deux électrodes métalliques, elles constituent avec le matériau environnant un condensateur diélectrique dont la capacité exprimée en farad dépend de la géométrie des électrodes et de la valeur de la constante diélectrique relative ϵ_r du matériau. En pratique, cela se traduit par une fréquence de résonance qui varie en fonction de la nature diélectrique du béton, laquelle est principalement liée à la teneur en eau, à la nature des granulats et au rapport eau sur ciment e/c [DER, 08].



Figure IV. 6. Capteur capacitif associé à un jeu de trois électrodes

1.2.7. Thermographie infrarouge

Cette technique a déjà fait l'objet d'une description détaillée dans les parties précédentes de cette thèse.

1.2.8. Conclusions

Le nombre de techniques (7) ainsi que la nature des phénomènes physiques (ondes ultrasonores, ondes électromagnétiques...) mis en jeu dans cette étude couvrent la quasi totalité des techniques de CND actuellement disponibles sur le marché. Les objectifs du projet SENSO s'inscrivent donc dans une logique de promotion de tous les outils de CND en relation avec les aptitudes de chacun d'entre eux.

Chacune des techniques présentées ci-dessus possède un nombre d'observables variable. On entend par observable des mesures de propriétés issues de la technique considérée. Par exemple, les observables du quadripôle électrique sont : la résistivité quadripôle 5 cm, la résistivité quadripôle 10 cm, l'anisotropie électrique 5 cm, l'anisotropie électrique 10 cm et le contraste de résistivité 5/10. On obtient ainsi au total 52 observables dont la liste, ordonnée par méthode, est consultable en annexe (Annexe IV. 1).

1.3. Description détaillée du volet expérimental

Le volet expérimental peut être découpé en trois tranches destinées chacune à la caractérisation d'éléments différents. Les corps d'épreuves de laboratoire sont des dalles de dimensions 50 x 25 x 12 cm³.

1.3.1. Tranche 1

L'objectif de cette première tranche est de caractériser simultanément quatre indicateurs de durabilité : la porosité, le module d'Young, la teneur en eau et la résistance en compression. Pour cela on a fait varier entre les gâchées :

- La porosité conditionnée par le rapport e/c dont les valeurs pour les différentes gâchées sont de : 0,3 – 0,45 – 0,55 – 0,65 – 0,8 ;
- Le degré de saturation en eau libre avec 5 niveaux retenus : 0 – 40 – 60 – 80 – 100% ;
- Les granulats, de par leur nature minéralogique (siliceux ou calcaires), de par leur géométrie (roulés ou concassés) et de par leur taille (granulats 0-12.5 ou 0-22).

Le Tableau II. 4 reprend les caractéristiques des différentes gâchées. Pour chaque gâchée, 11 dalles ont été fabriquées, 10 étant initialement destinées aux essais non

destructifs et la onzième aux caractérisations destructives des indicateurs. Ces mesures ont été effectuées sur des carottes prélevées dans la dalle témoin.

Les mesures sur les dalles de la tranche 1 ont été réalisées en trois campagnes de mesures avec entre chaque campagne le conditionnement des dalles pour la campagne suivante :

- Mesure à l'état sec en juillet 2006 sur 8 dalles ;
- Mesure à l'état saturé en octobre 2006 sur 8 dalles ;
- Mesure aux trois états de saturation intermédiaires (40 60 et 80 %) en juin-juillet 2007 sur 3 dalles par état soit 9 dalles.

Rq : Il était initialement prévu de réaliser les mesures sur 10 dalles mais certaines techniques étant gourmandes en temps le nombre de dalles à tester a été ramené à 8.

1.3.2. Tranche 2

Cette tranche expérimentale vise à caractériser la carbonatation des bétons. Pour cela, sur la base des compositions G3, G3a, G7, G8 et G6 (Chap.2 Tableau II. 5) de nouvelles dalles ont été coulées puis placées en enceinte de carbonatation pour atteindre des profondeurs de carbonatation cibles de 0 – 5 – 10 – 20 et 40 mm. Deux dalles à chaque niveau de carbonatation étaient disponibles, hormis pour la profondeur de référence 0 mm (état initial de chaque composition). Le tableau ci-dessous (Tableau IV. 1) donne les profondeurs de carbonatation atteintes pour chacune des compositions en vis-à-vis des valeurs initialement souhaitées.

Tableau IV. 1. Profondeurs carbonatées réelles de la tranche 2

		Composition	G13	G13a	G17	G18	G16
		Nature et taille des granulats	Siliceux roulés 0 – 12,5 mm				Calcaires concassée 0 – 12.5 mm
		Rapport E/C	0.55	0.55	0.65	0.90	0.55
Niveau de carbonatation	Profondeurs visées (mm)	Profondeur réelles (mm)					
P1	0	1	1	3	5	2	
P2	5	6	5	5	45	4	
P3	10	10	12	20	Totalement carbonatée	25	
P4	20	16	17	30	Pas de dalle	15	
P5	40	31	29	42	55	27	

Rq : La dalle à 0 mm de carbonatation sert de référence car elle possède en théorie les mêmes caractéristiques que les dalles de même composition de la tranche 1. Pour la composition G18 les profondeurs carbonatées visées n'ont pas été faciles à atteindre à cause d'une cinétique de carbonatation beaucoup trop rapide et difficilement contrôlable. Pour la composition G16 la profondeur P3 (10 mm) a été dépassée.

1.3.3. Tranche 3

La dernière tranche a pour objectif la caractérisation de la contamination du béton par les chlorures. Deux niveaux de contamination ont été étudiés, 30 ou 120 g/l. Pour cette tranche les dalles de composition G1, G3, G8 et G6 de la tranche 1 ont été réutilisées. Les dalles ont été conditionnées à différents états de saturation et différents niveaux de contamination par les chlorures. Le Tableau IV. 2 résume les dalles de la tranche 3.

Tableau IV. 2. Tableau récapitulatif du nombre de dalles utilisées dans la tranche 3

		Nature et taille des granulats	Siliceux roulés 0 – 12,5 mm			Calcaires concassée 0 – 12.5 mm
		Rapport E/C	0,30	0,55	0,90	0,55
Niveau de contamination	Degré de saturation	G21	G23	G28	G26	
Cl ⁻ 30 g/l	40	1	1	1	1	
	80	1	1	1	1	
	100	2	2	2	2	
Cl ⁻ 120 g/l	40	1	1	1	1	
	80	1	1	1	1	
	100	2	2	2	2	

Rq : Une concentration en chlorures de 30 g/l correspond à l'eau de mer et une concentration de 120 g/l aux saumures utilisées pour déverglacer les routes.

1.3.4. Conclusions

Pour rendre exploitable la grande quantité de données recueillies (pour la tranche 1 : 1 valeur moyenne de l'observable par dalle (valeur moyenne des 3 ou 10 mesures réalisées sur une dalle) pour 8 dalles de 9 compositions différentes à 2 états de saturation (états sec et saturé), ainsi qu'une 1 valeur moyenne de l'observable par dalle (valeur moyenne des 3 ou 10 mesures réalisées sur une dalle), pour 3 dalles de 9 compositions différentes à 3 états de saturation (états de saturation intermédiaires) soit environ 225 entrées pour chacun des 52 observables soit au total 11700 valeurs), la création d'une base de données rassemblant

toutes les mesures d'observables et pouvant facilement être exploitée par tous les partenaires du projet est nécessaire. De plus, l'objectif principal de cette base de données est de permettre l'analyse des données afin d'en extraire des indices de qualité et de pertinence des mesures pour ensuite fournir des paramètres aisément intégrables à l'outil de fusion de données. Il faut donc que la base soit « propre » c'est-à-dire consolidée et hiérarchisée.

Rq : A l'issue du projet trois bases de données ont été créées, une par tranche expérimentale. Dans la suite de ce manuscrit seul le traitement effectué sur la première tranche sera développé. Cependant, le traitement sur les deux autres bases de données est identique, seuls les indicateurs étudiés pour la sensibilité des observables varient selon la tranche expérimentale.

I.4. Création et exploitation de la base de données

Une base de données est un « ensemble structuré et organisé permettant le stockage de grandes quantités d'informations afin d'en faciliter l'exploitation ». Les mots-clés de cette définition sont « structuré », « organisé » et « faciliter l'exploitation ». La constitution d'une base de données débute donc par l'élaboration d'une hiérarchisation structurée des informations. De plus, étant donné le grand nombre de partenaires du projet, la création de la base de données a débuté par une phase de centralisation des mesures, nécessitant en amont la mise en place d'une nomenclature unique pour tous les acteurs de l'étude. Cette partie va présenter la normalisation et la nomenclature de chacun des points de mesures de la tranche 1. Ensuite, seront exposés les paramètres intéressants qui ont pu être établis à partir de cette base de données.

I.4.1. Normalisation et nomenclature des points de mesure

Chaque dalle possède une référence de la forme **Gx-Ny-Sz**, avec G faisant référence à la gâchée x variant entre 1 et 8 (+ gâchée 3a) fonction de la composition, N se référant au numéro de la dalle avec y variant de 1 à 10, et S se référant à l'état de saturation, avec z représentant respectivement de 1 à 5 : l'état sec, une saturation à 40%, une saturation à 60%, une saturation à 80% et l'état saturé.

De plus, afin d'obtenir des données comparables entre chacune des équipes, un protocole de mesure très strict a été défini dès le début du projet :

- Les dalles N1 et N2 de chaque gâchée présentent 11 points de mesure définis comme décrit ci-après : espacement de 1 cm entre chacun des points et points extrêmes localisés à 20 cm des bords de l'éprouvette (Figure IV. 7).

Sur ces dalles ont également été effectuées des mesures de répétabilité de la mesure : 10 mesures au point central de la dalle (point n°6).

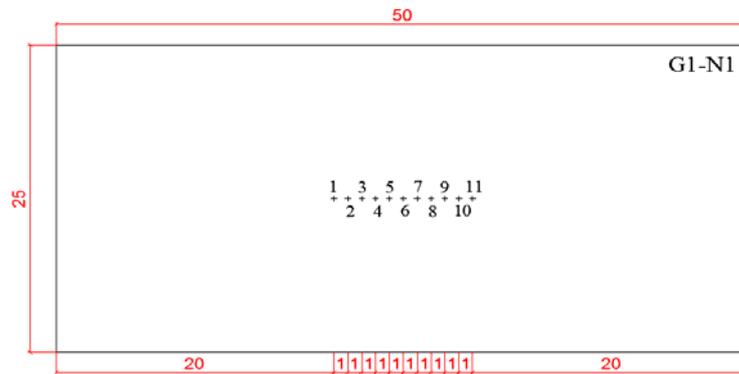


Figure IV. 7. Disposition des points de mesure sur les dalles N1 et N2

- Sur les autres dalles (N3 à N10), seuls 3 points de mesures sont réalisés : à 20, 25 et 30 cm du bord de l'éprouvette (Figure IV. 8).

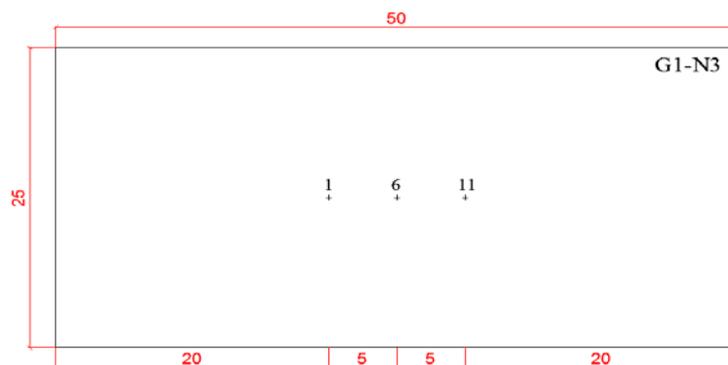


Figure IV. 8. Disposition des points de mesure sur les dalles N3 à N10

Chaque équipe a transmis ses données sous un format prédéfini (fichier Excel type) permettant l'intégration rapide des résultats à la base de données collective (Figure IV. 9). Cette feuille contient pour chaque observable :

- Les valeurs mesurées en chacun des 11 points de mesure (de K9 à K19) ;
- Les 9 valeurs de répétabilité mesurées au point 6 (de L14 à T14) ;
- La moyenne des valeurs mesurées, calculée comme la somme des valeurs mesurées en chacun des points divisée par le nombre de points de mesure [IV. 1], (E8) ;
- L'écart-type des valeurs mesurées en chacun des points de mesure (E9). Cet écart-type montre l'influence de la variation de propriétés locales du matériau dû au volume investigué ;

- L'écart-type des mesures de répétabilité au point 6 (E10). Il traduit la qualité intrinsèque de la mesure. Plus une mesure est de bonne qualité, plus son écart-type est faible.

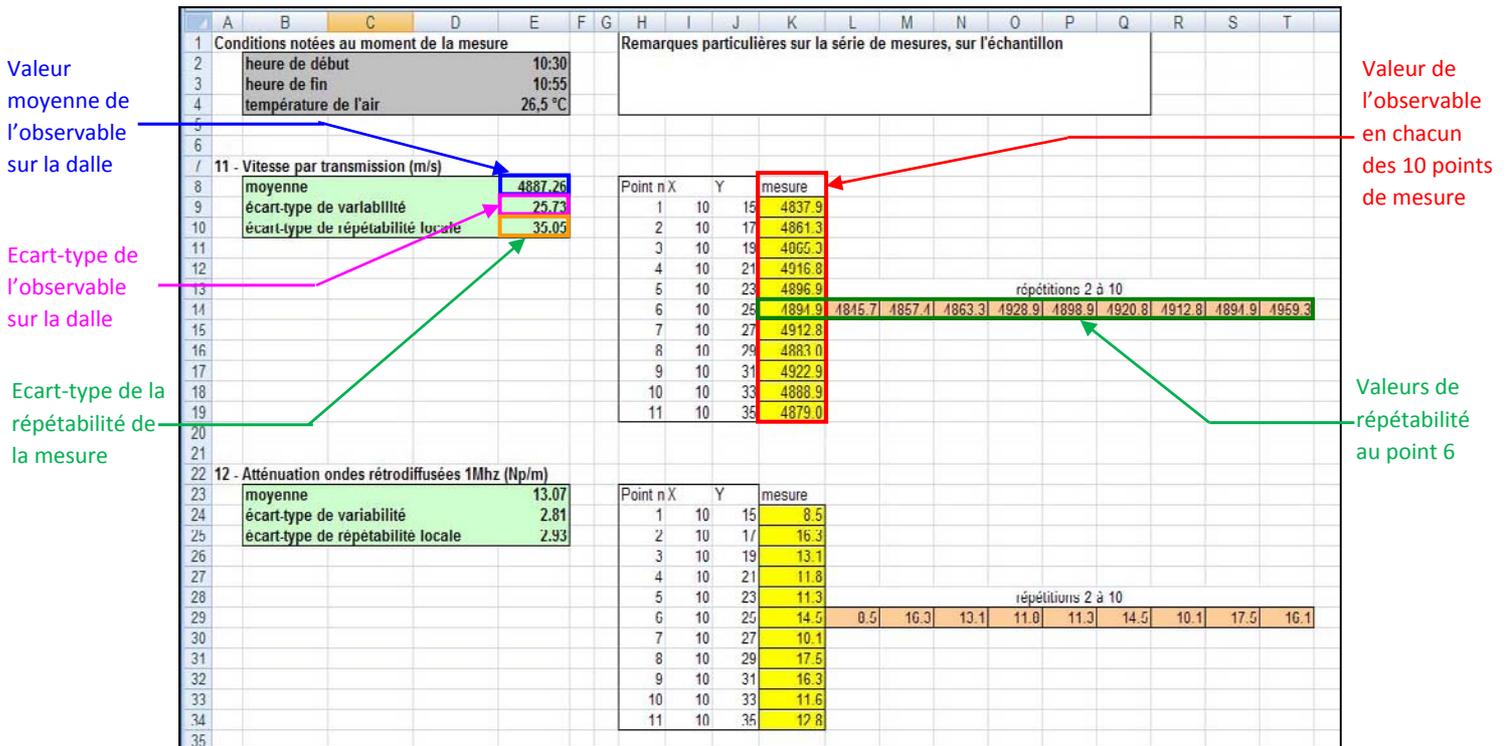


Figure IV. 9. Format normalisé du rendu des mesures SENSO pour centralisation

1.4.2. Organisation de la base de données

La base de données se présente sous la forme suivante (Figure IV. 10) :

- En ligne, les indicateurs sont classés par famille de méthode (ultrason, impact écho, capacité, thermographie infrarouge, résistivité électrique, radar), ceci pour chacun des 5 états de saturation.
Pour chaque indicateur ont été reportés la moyenne, le coefficient de variation dans la dalle et le coefficient de variation de la répétabilité.
- En colonne, les dalles sont triées par gâchée et l'on a calculé pour chaque gâchée la moyenne et le coefficient de variation de la mesure.
Ce coefficient de variation permet de déterminer l'influence du coulage sur la mesure. Toutes les éprouvettes d'une gâchée ont été coulées dans un laps de temps très court et dans des conditions similaires.

La notation des points de mesure est la suivante :

$$x_{o,k,g,s}^m$$

- Avec :
- x Valeur de l'observable au point de mesure
 - m Numéro point de mesure
 - o Numéro observable
 - k Numéro éprouvette
 - g Gâchée
 - s Etat de saturation

Gâchée 1
Dalle n°1

				Gâchée											
				1											
				SR14-30											
				Epreuve											
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Moy	CV
ETAT SEC (S1)															
Ultrasons															
Ultrasons	Lille	US 1	1	M	2223.00	2213.00	2250.00	2199.00	2355.00	2434.00	2327.00	2268.00	2283.63	3.58	
				CV (%)	6.20	4.00	7.83	4.47	3.84	5.33	1.10	6.86	4.95	42.37	
				CVrep (%)	3.46	2.02							2.74		
	LCPC	US 1'	2	M	2334.00	2329.00	2359.00	2330.00	2310.00	2296.00	2305.00	2322.00	2323.13	0.85	
	Lille	US 2	3	M	106.12	87.68	184.73	138.95	129.79	105.50	37.40	115.95	113.27	37.41	
				CV (%)	73.80	97.59	50.92	97.98	100.20	84.84	71.26	66.70	80.41	22.05	
				CVrep (%)	90.61	51.34							70.98		
	LCPC	US 3a	4	M	2346.70	2317.70	2302.90	2320.55	2327.90	2384.75	2298.80	2248.18	2318.43	1.70	
				CV (%)	0.92	0.24	0.92	2.19	0.13	1.28	0.61	1.59	0.99	70.27	
				CVrep (%)											
	LCPC	US 3b	5	M	2309.85	2301.10	2331.53	2306.60	2360.35	2363.73	2298.30	2298.38	2321.23	1.18	
				CV (%)	0.36	0.17	0.53	0.21	0.84	1.77	0.12	0.84	0.61	90.74	
			CVrep (%)												
LCPC	US 3c	6	M	2347.05	2361.25	2350.35	2357.03	2373.18	2319.73	2342.20	2343.60	2349.30	0.67		
			CV (%)	0.22	0.22	0.82	0.22	0.64	2.33	0.21	0.17	0.60	122.57		
			CVrep (%)												
LCPC	US 3d	7	M	2374.55	2390.00	2386.08	2379.23	2384.10	2337.83	2364.60	2374.50	2373.86	0.70		
			CV (%)	0.20	0.23	0.42	0.17	0.23	0.71	0.40	0.04	0.30	68.52		
			CVrep (%)												
LCPC	US 3e	8	M	2416.63	2417.30	2417.28	2418.78	2406.00	2374.00	2394.00	2413.35	2407.17	0.66		
			CV (%)	0.45	0.17	0.11	0.40	0.32	1.07	0.31	0.31	0.39	74.82		
			CVrep (%)												
Lille	US 4	9	M	4098.54	4088.30	4351.00	4348.00	4375.00	4400.00	4559.00	4521.00	4342.61	3.96		
			CV (%)	0.55	1.44	2.36	0.58	1.97	1.36	0.41	2.25	1.67	57.67		
			CVrep (%)												
LCND	US 6	11	M	4887.26	4894.00	4840.00	4874.00	4737.00	4857.00	4818.00	4797.00	4838.03	1.09		
			CV (%)	0.53	1.22	0.38	0.55	2.04	1.68	1.31	1.05	1.10	33.77		
			CVrep (%)	0.72								0.72			
			CVrep (%)	13.07	12.57	12.14	13.17	16.53	11.83	16.48	11.52	13.41	14.84		
LCND	US 7 a	12	M	21.50	28.00	20.55	30.10	14.57	3.85	10.29	3.09	16.49	62.37		
			CV (%)	22.40								22.40			
			CVrep (%)												
			CVrep (%)	14.65	15.94	13.97	16.09	15.66	15.19	10.50	13.25	14.41	12.91		

Observable 11 :
Vitesse par transmission (m/s)

De haut en bas :
Valeur moyenne
Coefficient de variation
Coefficient de variation sur la répétabilité

Moyenne de l'observable US6 dans la gâchée 1

Coefficient de variation pour l'observable US6 dans la gâchée 1

Figure IV. 10 Organisation de la base de données pour une technique et une gâchée à un état de saturation

Sont reportées dans la base de données, pour chaque observable, les valeurs mesurées transmises par les équipes dans les feuilles normalisées ainsi que les premiers résultats statistiques. Nous disposons ainsi :

- De valeurs **moyennes** :

- De **l'observable sur la dalle**, calculée comme la moyenne des 3 ou 11 mesures effectuées cette dalle [IV. 1]. Celle-ci correspond à la case E8 de la Figure IV. 9.

$$\bar{X}_{o,k,g,s} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{i=n} x_{o,k,g,s}^m \quad [IV. 1]$$

Avec $x_{o,k,g,s}^m$ Valeur de l'observable mesurée en un point m

n Nombre de points de mesure sur la dalle (3 ou 10)

- De **l'observable dans la gâchée**, calculée comme la moyenne des valeurs moyennes mesurées par dalle [IV. 2].

$$\bar{X}_{o,g,s} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^{i=k} \bar{X}_{o,k,g,s} \quad [IV. 2]$$

Avec $\bar{X}_{o,g,s}$ Valeur moyenne de l'observable dans une gâchée

$\bar{X}_{o,k,g,s}$ Valeur moyenne de l'observable sur une dalle

k Nombre de dalles

- D'estimation de la **variabilité**. Pour cela on s'intéresse au coefficient de variation (CV) des mesures qui équivaut à l'écart-type divisé par la moyenne, le tout multiplié par 100 pour obtenir un pourcentage :

- **Coefficient de variation de la mesure en un point** : répétabilité de la mesure. Il correspond au coefficient de variation entre les 10 mesures effectuées au point 6 d'une dalle [IV. 3].

$$CV_{rep}(\%) = 100 \times \frac{\sqrt{\frac{1}{r-1} \sum_{i=1}^{i=r} (x_{o,k,g,s}^{6,r} - \bar{X}_{o,k,g,s})^2}}{\bar{X}_{o,k,g,s}} \quad [IV. 3]$$

Avec r Nombre de fois où la mesure a été répétée

Exemple : Le CV de la répétabilité de la mesure pour l'observable 11 (Cellule G34 Figure IV. 10) est calculé à partir des valeurs de la feuille normalisée Figure IV. 9 (Cellules E8 (écart-type) et E10 (moyenne))

$$\frac{E8_{(35.05)}}{E10_{(4887.25)}} \times 100 = G34_{(0.72\%)}$$

Ce coefficient de variation va nous permettre d'estimer le bruit de mesure lié à la technique. Toute variation observée inférieure à ce bruit de mesure ne pourra pas être considérée comme significative.

- **Coefficient de variation de la mesure dans la dalle.** On estime ce coefficient à partir des valeurs obtenues sur les 3 ou 11 points de mesure [IV. 4].

$$CV(\%) = 100 \times \frac{\sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{i=n} (x_{o,k,g,s}^m - \bar{X}_{o,k,g,s})^2}}{\bar{X}_{o,k,g,s}} \quad [IV. 4]$$

Ce coefficient de variation traduit l'influence de la matrice du béton au niveau du point de mesure sachant que la dalle a une composition homogène et a été coulée en une seule fois.

- **Coefficient de variation entre dalles.** Il est calculé à partir des valeurs moyennes obtenues sur chacune des dalles d'une même gâchée [IV. 5].

$$CV(\%) = 100 \times \frac{\sqrt{\frac{1}{k-1} \sum_{i=1}^{i=k} (\bar{X}_{o,k,g,s} - \bar{X}_{o,g,s})^2}}{\bar{X}_{o,g,s}} \quad [IV. 5]$$

Ce coefficient de variation traduit l'influence du coulage sur la mesure sachant que toutes les dalles d'une gâchée ont été coulées en une seule fois.

II. Consolidation et traitement des données

Le traitement des données se déroule en deux étapes : une première étape de tri et de consolidation des données et une seconde étape de calcul de variance pour la sélection finale des indicateurs.

II.1. Tri et consolidation des données

La première partie du travail consiste à reprendre l'ensemble de la base de données et à l'analyser de manière experte afin de repérer les données paraissant aberrantes. Après échanges avec le spécialiste de la technique, les valeurs ainsi repérées sont, soit éliminées si dues à des problèmes de mesure, soit conservées si considérées comme représentatives de réelles variations de propriétés.

II.2. Calculs de variabilité

Les objectifs de la base de données sont d'une part, de rendre plus facilement maniables et exploitables la grande quantité de données recueillies lors des campagnes de mesure et d'autre part, d'estimer la qualité et la fiabilité de ces mesures ainsi que la complémentarité des techniques pour la détection des indicateurs de durabilité. Ce second objectif implique une analyse approfondie des mesures. Pour ce faire, nous avons calculé la variabilité des mesures à différentes échelles, chacune d'elle apportant une information sur la qualité intrinsèque de la mesure ou sur sa sensibilité aux indicateurs. Ce travail sur les variabilités est à l'origine du choix de la construction des indicateurs qui seront utilisés par la suite.

Les variabilités sur lesquelles nous travaillons sont au nombre de 5 :

II.2.1. Variabilité V1 : Répétabilité locale

Elle exprime la répétabilité de la mesure en un point. Plus une mesure est précise, plus sa répétabilité est bonne, donc plus la variabilité V1 va être petite. La mesure de cette variabilité est faite en répétant la mesure de l'indicateur 10 fois en un point.

On pose l'hypothèse que cette variabilité est indépendante de la porosité et de l'état de saturation.

Pour obtenir la variabilité V1 globale d'un observable, le calcul de plusieurs variabilités intermédiaires est nécessaire.

- La **variabilité V1 sur une dalle** est calculée comme la variance de la mesure de répétabilité au point 6 [IV. 6] . Elle est liée au coefficient de variation [IV. 3].

$$V1_{o,k,g,s} = \frac{1}{r-1} \sum_{i=1}^r (x_{o,k,g,s}^{6,r} - \bar{X}_{o,k,g,s})^2 \quad [IV. 6]$$

Avec	$V1_{o,k,g,s}$	Variabilité V1 sur une dalleS
	$x_{o,k,g,s}^{6,r}$	Valeurs de l'observable à chacune des mesures de répétabilité successives au point 6
	$\bar{X}_{o,k,g,s}$	Valeur moyenne de l'observable sur la dalle.

Cette variabilité est estimée sur 2 dalles (en générale N1 et N2) de chaque composition à chaque état.

- La **variabilité V1 sur une gâchée** est égale à la moyenne des variabilités V1 calculées sur les éprouvettes 1 et 2 à un état de saturation donné. Elle est calculée par la formule suivante [IV. 7] :

$$V1_{o,g,s} = \frac{V1_{o,1,g,s} + V1_{o,2,g,s}}{2} \quad [IV. 7]$$

Avec	$V1_{o,g,s}$	Variabilité V1 dans une gâchée
	$V1_{o,1,g,s}$	Variabilité V1 sur la dalle N1 de la gâchée à un état de saturation
	$V1_{o,2,g,s}$	Variabilité V1 sur la dalle N2 de la gâchée à un même état de saturation

- La **variabilité V1 à un état de saturation** équivaut à la moyenne, sur l'ensemble des gâchées, des variabilités V1 par gâchée à un état de saturation donné [IV. 8].

$$V1_{o,s} = \frac{1}{g_{\max}} \sum_{i=1}^{i=g_{\max}} V1_{o,g,s} \quad [IV. 8]$$

Avec	$V1_{o,s}$	Variabilité V1 pour un état de saturation
	$V1_{o,g,s}$	Variabilité V1 dans une gâchée

- La **variabilité V1 globale** est égale à la moyenne, sur l'ensemble des états de saturation, des variabilités V1 à un état de saturation donné [IV. 9].

$$V1_{TOT} = \frac{1}{2}(V1_{o,5} + V1_{o,1}) \quad [IV. 9]$$

Avec	$V1_{TOT}$	Variabilité V1 totale de la répétabilité de la mesure pour un observable
	$V1_{o,5}$	Variabilité V1 à l'état saturé
	$V1_{o,1}$	Variabilité V1 à l'état sec

II.2.2. Variabilité V2 : Hétérogénéité irréductible du matériau

La **variabilité "V2"** traduit la variabilité de la mesure dans une dalle. Elle résulte de l'imperfection de la mesure locale et de la variabilité du matériau à l'échelle de la dalle. Elle est étroitement liée au volume investigué et au contact capteur-éprouvette. En effet, pour un volume d'investigation faible, la réponse de la technique de mesure ne sera pas la même si l'on se trouve au droit d'un granulat ou au droit de la matrice ciment (aléa spatial). A priori la variabilité V2 sera supérieure à la variabilité V1 car elle cumule la répétabilité de la mesure et la variabilité spatiale. Le calcul de cette variabilité est possible grâce à la réalisation de mesures en différents points de l'éprouvette.

Comme pour V1, on pose l'hypothèse que cette variabilité est indépendante de la porosité et de l'état de saturation.

- La **variabilité V2 sur une dalle** est égale à la variance de la mesure entre les 10 ou 3 points de mesure d'une éprouvette d'une gâchée à un état de saturation donné [IV. 10].

$$V2_{o,k,g,s} = \frac{1}{m_{\max} - 1} \sum_{i=1}^{m_{\max}} (x_{o,k,g,s}^{m,1} - \bar{X}_{o,k,g,s})^2 \quad [IV. 10]$$

Avec	$V2_{o,k,g,s}$	Variabilité V2 sur une dalle
	$x_{o,k,g,s}^{m,1}$	Valeur de l'observable au point de mesure
	$\bar{X}_{o,k,g,s}$	Valeur moyenne l'observable sur l'éprouvette

- La **variabilité V2 dans une gâchée** est définie comme la moyenne des variabilités V2 sur une dalle [IV. 11].

$$V2_{o,g,s} = \frac{1}{k_{\max}} \sum_{i=1}^{i=k_{\max}} V2_{o,k,g,s} \quad [IV. 11]$$

Avec $V2_{o,g,s}$ Variabilité V2 dans une gâchée
 $V2_{o,k,g,s}$ Variabilité V2 dans une dalle

- La **variabilité V2 à un état de saturation** correspond à la moyenne, sur l'ensemble des gâchées, des variabilités V2 dans une gâchée [IV. 12].

$$V2_{o,s} = \frac{1}{g_{\max}} \sum_{i=1}^{i=g_{\max}} V2_{o,g,s} \quad [IV. 12]$$

Avec $V2_{o,s}$ Variabilité V2 à l'état de saturation s
 $V2_{o,g,s}$ Variabilité V2 sur une gâchée

- La **variabilité V2 globale** est égale à la moyenne pondérée, sur l'ensemble des états de saturation, des variabilités V2 à un état de saturation donné.

Les états de saturations intermédiaires S2, S3, S4 sont pondérés d'un coefficient 1/3 car le nombre de points de mesures dans ces 3 états est inférieur d'un tiers à celui des états S1 et S5 (9 dalles pour S1 et S5, 3 dalles pour S2, S3, S4).

$$V2_{TOT} = \frac{1}{3} \left(V2_{o,5} + V2_{o,1} + \frac{1}{3} V2_{o,2} + \frac{1}{3} V2_{o,3} + \frac{1}{3} V2_{o,4} \right) \quad [IV. 13]$$

Avec $V2_{TOT}$ Variabilité V2 globale
 $V2_{o,5}$ Variabilité V2 à l'état saturé
 $V2_{o,1}$ Variabilité V2 à l'état sec
 $V2_{o,2}$ Variabilité V2 à l'état intermédiaire S2
 $V2_{o,3}$ Variabilité V2 à l'état intermédiaire S3
 $V2_{o,4}$ Variabilité V2 à l'état intermédiaire S4

II.2.3. Variabilité V3 : Hétérogénéité d'un béton « homogène »

La **variabilité "V3"** représente la variabilité de la mesure sur une gâchée. Cette variabilité traduit l'influence du coulage sur la mesure. Elle prend en compte la variabilité de fabrication des éprouvettes. Pour l'estimation de cette variabilité, les mesures ont été effectuées sur différentes éprouvettes de même composition (de 7 à 10 éprouvettes par gâchée).

On pose l'hypothèse que cette variabilité est indépendante de la porosité et de l'état de saturation.

- La **variabilité V3 sur une gâchée** est calculée comme la variance des valeurs moyennes par éprouvette à laquelle on rajoute la variabilité V2 de la gâchée [IV. 14] :

$$V3_{o,g,s} = \frac{1}{k_{\max} - 1} \sum_{i=1}^{k_{\max}} (\bar{X}_{o,k,g,s} - \bar{X}_{o,g,s})^2 + V2_{o,g,s} \quad [IV. 14]$$

Avec	$V3_{o,g,s}$	Variabilité V3 pour une gâchée g
	$\bar{X}_{o,k,g,s}$	Valeur moyenne de l'observable sur une dalle k
	$\bar{X}_{o,g,s}$	Moyenne des valeurs moyennes de l'observable sur une dalle k
	$V2_{o,g,s}$	Variabilité V2 dans la gâchée g

- La **variabilité V3 à un état de saturation** correspond à la moyenne des variabilités V3 des différentes gâchées [IV. 15].

$$V3_{o,s} = \frac{1}{g_{\max}} \sum_{i=1}^{i=g_{\max}} V3_{o,g,s} \quad [IV. 15]$$

Avec	$V3_{o,s}$	Variabilité V3 à l'état de saturation s
	$V3_{o,g,s}$	Variabilité V3 de la gâchée g

- La **variabilité V3 globale** se calcule par la moyenne pondérée des variabilités V3 pour un état de saturation avec un coefficient de pondération de 1/3 pour les états intermédiaires S2, S3, S4 [IV. 16].

$$V3_{TOT} = \frac{1}{3} \left(V3_{o,5} + V3_{o,1} + \frac{1}{3} V3_{o,2} + \frac{1}{3} V3_{o,3} + \frac{1}{3} V3_{o,4} \right) \quad [IV. 16]$$

Avec	$V3_{TOT}$	Variabilité V3 globale
	$V3_{o,5}$	Variabilité V3 à l'état saturé
	$V3_{o,1}$	Variabilité V3 à l'état sec
	$V3_{o,2}$	Variabilité V3 à l'état intermédiaire S2
	$V3_{o,3}$	Variabilité V3 à l'état intermédiaire S3
	$V3_{o,4}$	Variabilité V3 à l'état intermédiaire S4

II.2.4. Variabilité V4

La **variabilité "V4"** résulte du contraste entre les différents bétons ou les différents états d'un même béton. On calcule donc pour la première tranche deux variabilités V4 correspondant aux deux indicateurs étudiés (porosité et teneur en eau) : **V4-P** traduit la sensibilité de l'observable à la porosité et **V4-Sr** la sensibilité de l'observable à la teneur en eau.

Plus l'un des V4 est élevé plus l'indicateur est discriminant envers ce paramètre.

- La **variabilité "V4-P"** représente la variabilité de la mesure entre gâchées. Elle est donc principalement influencée par la différence de porosité. Le calcul de cette variabilité se fait par des mesures sur des éprouvettes de différentes porosités.
 - o La variabilité **V4-P à un état de saturation** correspond à la variance des valeurs moyennes d'un observable par gâchée dans un état de saturation à laquelle on ajoute la variabilité V3 pour ce même état de saturation [IV. 17].

$$V4_{o,s} = \frac{1}{g_{\max} - 1} \sum_{i=1}^{g_{\max}} (\bar{X}_{o,g,s} - \bar{X}_{o,s})^2 + V3_{o,s} \quad [IV. 17]$$

Avec	$V4_{o,s}$	Variabilité V4-P à un état de saturation s
	$\bar{X}_{o,g,s}$	Valeurs moyennes de l'observable pour une gâchée g à l'état de saturation s
	$\bar{X}_{o,s}$	Moyenne de l'observable à un état de saturation s
	$V3_{o,s}$	Variabilité V3 à l'état de saturation s

- o La **variabilité V4-P totale** est obtenue en faisant la moyenne pondérée des variabilités V4-P dans un état de saturation. Les coefficients de pondérations sont les mêmes que pour les variabilités précédentes : 1/3 pour S2, S3, S4 [IV. 18] :

$$V4 - P_{TOT} = \frac{1}{3} \left(V4_{o,1} + V4_{o,5} + \frac{1}{3} \times V4_{o,2} + \frac{1}{3} \times V4_{o,3} + \frac{1}{3} \times V4_{o,4} \right) \quad [IV. 18]$$

Avec	$V4 - P_{TOT}$	Variabilité V4-P totale
	$V4_{o,5}$	Variabilité V4-P à l'état saturé
	$V4_{o,1}$	Variabilité V4-P à l'état sec
	$V4_{o,2}$	Variabilité V4-P à l'état intermédiaire S2
	$V4_{o,3}$	Variabilité V4-P à l'état intermédiaire S3
	$V4_{o,4}$	Variabilité V4-P à l'état intermédiaire S4

- La **variabilité "V4-Sr"** correspond à la variabilité de la mesure d'un observable pour différents états de saturation. Le calcul de cette variabilité est possible grâce aux mesures réalisées sur les éprouvettes aux 5 états de saturation.

- La variabilité **V4-Sr pour une gâchée** correspond à la variance pondérée des $X_{o,g,s}$ sur les 5 états de saturation des valeurs moyennes d'un observable par gâchée dans un état de saturation à laquelle on ajoute la variabilité V3 d'une gâchée aux 5 états de saturation [IV. 19].

$$V4_{o,g} = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^{i=s_{\max}} f_j (\bar{X}_{o,g,s} - \bar{X}_{o,g})^2 + V3_{o,g} \quad [IV. 19]$$

Avec	$V4_{o,g}$	Variabilité V4-Sr pour une gâchée aux 5 états de saturation
	$\bar{X}_{o,g,s}$	Valeurs moyennes de l'observable pour une gâchée g à l'état de saturation s
	$\bar{X}_{o,g}$	Moyenne pondérée de l'observable pour une gâchée g sur les 5 états de saturation s
	$V3_{o,s}$	Variabilité V3 d'une gâchée g aux 5 états de saturation
	f_j	Facteur de pondération en fonction de l'état de saturation (3 pour S1 et S5, 1 pour S2, S3 et S4)

- La variabilité **V4-Sr totale** est égale à la moyenne des variabilités V4-Sr obtenues par gâchée [IV. 20]

$$V4 - Sr_{TOT} = \frac{1}{g_{\max}} \sum_{i=1}^{i=g_{\max}} V4_{o,g} \quad [IV. 20]$$

Avec	$V4 - Sr_{TOT}$	Variabilité V4-Sr pour une gâchée aux 5 états de saturation
	$V4_{o,g}$	Variabilités V4-Sr pour une gâchée g aux 5 états de saturation

II.3.Conclusions

La création d'une base de données « propre » est un travail long et fastidieux. Cependant à partir des données consolidées, il est possible, par une analyse statistique, de quantifier la qualité et sensibilité d'une mesure à l'aide de ses différentes valeurs de variabilités.

L'analyse multi-échelle des mesures permet d'évaluer d'une part, leur qualité intrinsèque (répétabilité des mesures), et d'autre part, leur sensibilité aux indicateurs recherchés (variabilité selon la porosité ou selon la saturation). La Figure IV. 11 récapitule l'ensemble de la démarche menant au calcul des différentes variabilités.

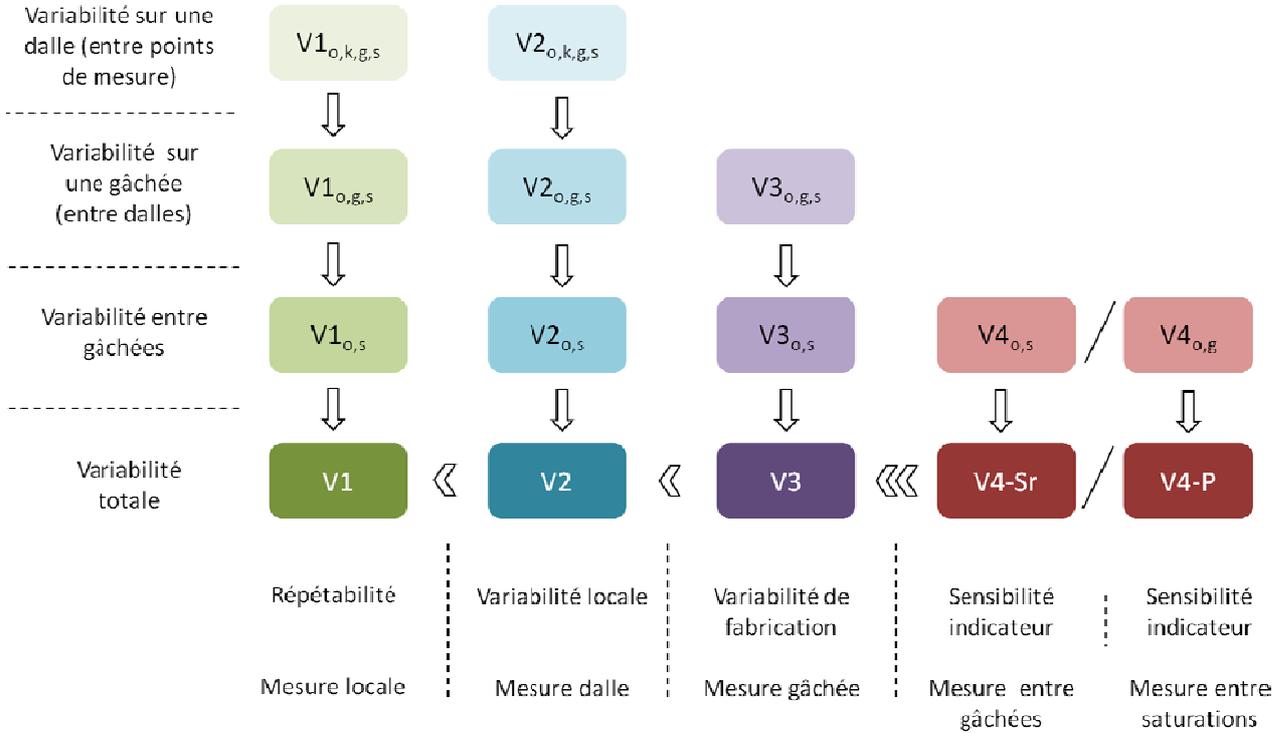


Figure IV. 11. Représentation schématique des liens entre les différentes variabilités calculées

D'une manière générale lorsque l'on réalise des mesures, on souhaite en premier lieu que ces mesures soient de bonne qualité. Pour cela, il est nécessaire qu'une mesure réalisée en un même point, pour un même état d'endommagement, à différents instants, donne toujours la même valeur. C'est cette qualité intrinsèque de la mesure qui est évaluée par la variabilité V1 que l'on souhaite donc la plus faible possible.

Chaque technique de mesure a un volume d'investigation qui lui est propre. La mesure de variabilité locale (V2), c'est-à-dire à l'intérieur d'un même corps d'épreuve mais en différents points, permet d'évaluer l'influence de ce volume. La variabilité de la mesure due à cet effet, bien que supérieure à la répétabilité locale, doit être la plus faible possible, de manière à ne pas mesurer uniquement d'une variation locale en sous-face (Exemple : présence d'un granulat ou d'une bulle d'air).

Les ouvrages ne sont pas coulés en une seule fois, avec une même toupie de béton. Pour illustrer les variations de mesures dues à ces phases de coulage, on s'est intéressé à la variabilité des mesures dans une gâchée. Cette variabilité (V3) est en générale plus

importante que la variabilité locale ou la répétabilité mais, ne traduisant pas de réelles variations de propriétés du béton, elle doit être la plus faible possible.

La variabilité $V4-X$, quant à elle, traduit la sensibilité de la mesure à l'indicateur recherché. Plus une mesure est sensible à un indicateur, plus sa gamme de variation est étendue lorsque l'indicateur varie. Les observables sensibles à un indicateur X ont une variabilité $V4-X$ élevée.

L'analyse simultanée de ces 5 variabilités montre 4 comportements types (Figure IV. 12), (l'ensemble des histogrammes de variabilité est donné en Annexe IV. 2) :

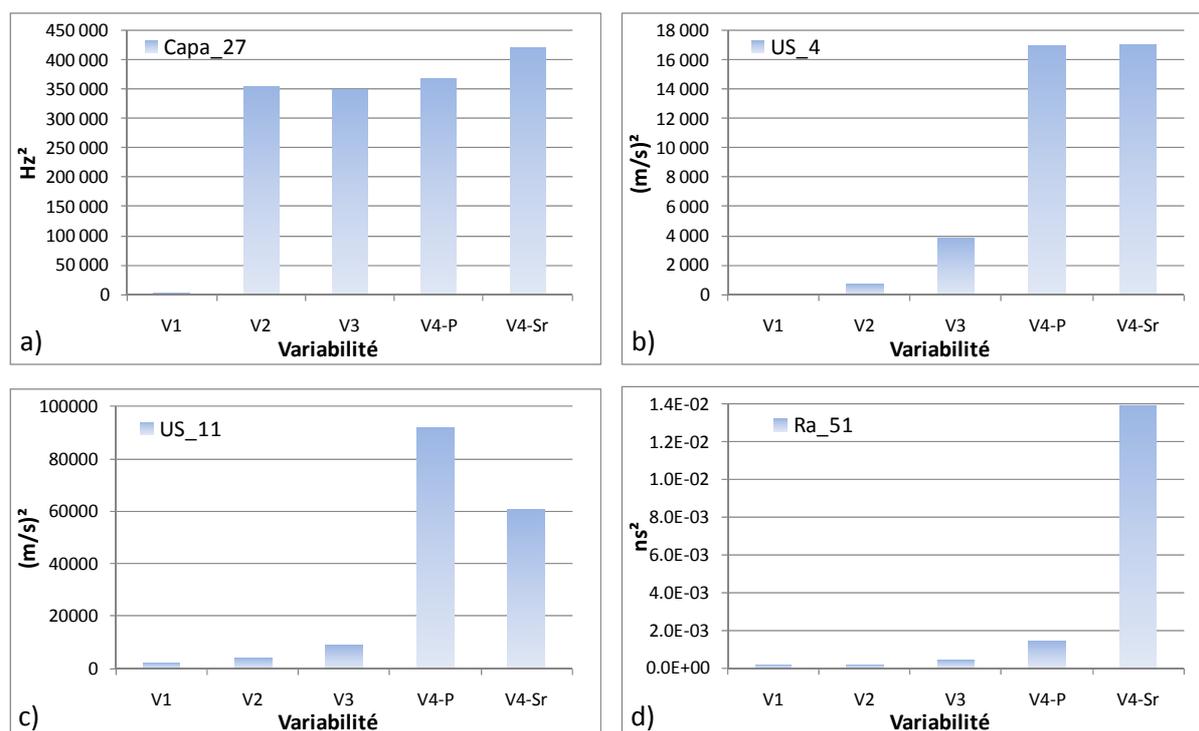


Figure IV. 12. Variabilités calculées pour 4 observables, a) Observable 27 : Capacité électrodes moyennes, b) Observable 4 : US Vitesse 1cm, c) Observable 11 : US Vitesse de transmission des ondes de compression, d) Observable 51 : Radar Temps d'arrivée OD offset 12,2 cm.

- Figure IV. 12a. Pour cet observable la mesure de répétabilité n'a pas pu être effectuée, la donnée V1 est manquante. On constate que la variabilité V2 (variabilité à l'intérieur d'une dalle) est forte, l'observable est donc très sensible aux variations locales de matériau. De plus, $V2 \approx V3 \approx V4-P$, ceci implique que la mesure de variation de porosité (V4-P) est masquée par la variabilité de la mesure aux échelles locale et de fabrication. Cet observable n'est donc pas à retenir pour cette tranche expérimentale.
- Figure IV. 12b. On a ici une évolution des variabilités telles que $V2 < V3 < V4-P \approx V4-Sr$. Cet observable fournit une information sur les variations de teneur en eau et en porosité de manière concomitante. Il ne sera donc pas possible de découpler les deux phénomènes avec cet observable utilisé isolément.

- Figure IV. 12c. L'observable 11 présente une prédominance de la variabilité $V4-P$ sur l'ensemble des autres variabilités telle que $V1 < V2 < V3 \ll V4-Sr \ll V4-P$. Cet observable est donc de bonne qualité (répétable, peu sensible aux variations locales de matériau ainsi qu'aux reprises de coulage) et discriminant car il est plus particulièrement sensible aux variations de porosité.
- Figure IV. 12d. L'observable 51 est essentiellement sensible aux variations de teneur en eau : $V1 < V2 < V3 < V4-P \ll V4-Sr$. Cet observable sera à privilégier lors de la recherche de variation d'humidité dans les ouvrages.

Chaque observable possède des valeurs de variabilité qui lui sont propres et qui reflètent sa capacité à détecter les indicateurs recherchés. Nous avons montré que l'observation des histogrammes de répartition des variabilités permet de déterminer grossièrement les sensibilités des observables aux indicateurs. Cependant ce regard qualitatif n'est pas suffisant et l'élaboration de critères de qualité quantifiés est nécessaire. Ceux-ci permettront une comparaison directe et objective de tous les observables ainsi que leur classement en fonction de/des (l') indicateur(s) recherché(s). Ce travail de création de critères de qualité et de sélection d'observable est présenté dans la suite de ce chapitre.

III. Valorisation de la base de données

La création d'une base de données n'est pas une finalité en soi. Dans le projet SENSO, la valorisation de la base de données passe par la sélection d'observables pour travailler ensuite en combinaison de techniques ou en fusion de données. Cette partie dresse le processus de sélection des observables puis fait le point sur les débouchés possibles en termes d'approche multi-techniques.

III.1. Procédure de sélection des observables

Dans l'optique d'une combinaison de méthodes non destructives, il est nécessaire de sélectionner les techniques et plus particulièrement le ou les observables ayant la sensibilité la plus forte et la complémentarité la meilleure vis-à-vis de l'indicateur recherché. La procédure de sélection des observables mise en œuvre repose sur trois critères de sélection :

- (1) La qualité intrinsèque de l'observable, liée à la qualité de la mesure et à sa répétabilité ;
- (2) La pertinence de l'observable, c'est-à-dire sa capacité à mesurer des variations d'un indicateur ;

- (3) La complémentarité entre observables.

Pour chacun des critères, on définit des « mesures », indice de qualité pour le critère 1 et indice de pertinence pour le critère 2, qui permettent de juger objectivement et de sélectionner les observables les mieux adaptés. Dans un premier temps, on s'intéresse aux critères 1 et 2 pour établir une liste d'observables présélectionnés.

Les indices de qualité et de pertinence sont calculés selon deux variantes (variantes 1 et 2), conduisant ainsi à la sélection de deux jeux d'observables [SBA, à p.]. Le choix global des observables a alors été réalisé :

- en comparant les deux sélections,
- en tenant compte des avis des experts des techniques (présents dans le projet), qui permettent de juger, au-delà des seuls critères statistiques.

On dispose à l'issue de cette étape d'une sélection d'observables retenus pour la recherche des valeurs de porosité et de teneur en eau des bétons, sur la base de leur qualité intrinsèque et de leur pertinence.

On analyse alors la complémentarité / redondance éventuelle entre observables d'une même famille (ce qui permet d'en privilégier certains, en s'appuyant, là encore, sur les jugements des experts) en exploitant le troisième critère. On établit alors la liste définitive des observables retenus.

III.2. Choix des observables : définition des critères de pertinence et de qualité

Tous les observables mesurés dans la phase d'étude expérimentale ne seront pas retenus pour la phase de combinaison de techniques et de fusion de données. Afin de sélectionner les observables deux classements ont été établis :

- Variante 1. Les indices de qualité et de pertinence sont définis à partir des variabilités V1 à V4-X calculées au préalable (§II.2) ;
- Variante 2. Les indices sont obtenus à partir de la qualité du modèle de régression reliant indicateurs et observables.

Exemple de régression bilinéaire reliant porosité et teneur en eau [IV. 21] :

$$O_i = a_i \cdot S_r + b_i \cdot P + c_i \quad [IV. 21]$$

Avec : O_i Valeur de l'observable i
 S_r Teneur en eau

- P Porosité
- a, b, c Coefficients de la régression

Les définitions de ces indicateurs ont été données par [LMD, 09].

III.2.1. Indice de qualité

L'indice de qualité IQ traduit la répétabilité et la sensibilité de la mesure. Il est obtenu selon les deux variantes par les formules :

- Variante 1 :

$$IQ = \left(-\log \frac{V1}{V3}\right) + \left(-\log \frac{V2}{V3}\right) \quad [IV. 22]$$

- Avec : V1 Variabilité de la mesure en un point (répétabilité)
- V2 Variabilité de la mesure sur une dalle
- V3 Variabilité de la mesure dans la gâchée

Pour qu'un observable soit de bonne qualité il doit avoir une très bonne répétabilité. On privilégiera les observables ayant au maximum $V1 < V2 < V3$ donc ayant un IQ le plus grand possible.

- Variante 2 :

$$IQ = r^2 \quad [IV. 23]$$

- Avec : r^2 Coefficient de détermination de la régression

L'idée est que, si la mesure est de qualité (et si, de plus l'observable est sensible à au moins l'un des deux indicateurs), plus le coefficient de détermination de la régression multilinéaire est élevé, plus l'observable est utile. On privilégiera les observables à forte valeur de IQ. Cette mesure n'est donc pas totalement intrinsèque à l'observable, puisqu'elle intègre une dimension « sensibilité » à l'indicateur.

III.2.2. Indices de pertinence

Les indices de pertinence sont, pour la tranche 1, au nombre de deux : l'indice de pertinence envers la porosité et l'indice de pertinence envers la teneur en eau. IP-Sr et IP-P

décrivent la capacité d'un indicateur à faire la distinction entre du bruit de mesure dans la gâchée et une différence de mesure porteuse d'information.

- Variante 1 :

$$IP-i = -\log\left(\frac{V3_{TOT}}{(V4 - X)}\right) \quad [IV. 24]$$

Avec :	$V3_{TOT}$	Variabilité V3 de l'observable
	$V4-Sr$	Variabilité entre les différents états de saturation
	$V4-P$	Variabilité entre les différents entre les différentes gâchées
	i	Indicateur envers lequel on test la pertinence

$V4-X$ traduit la sensibilité de l'observable à l'indicateur i . L'observable est d'autant plus sensible que cette variance est élevée et il est d'autant plus pertinent, pour distinguer des variations de l'indicateur que $V4-X$ est grand par rapport à $V3$.

- Variante 2 :

$$IP-i = \frac{a}{\sigma_a} \quad \text{ou} \quad IP-i = \frac{b}{\sigma_b} \quad [IV. 25]$$

Avec :	a (resp ^t b)	Pente de la régression
	σ_a (resp ^t σ_b)	Ecart-type du coefficient a (resp ^t b)

L'idée est que la qualité de l'estimation de l'indicateur à partir de la mesure de l'observable est d'autant meilleure que la pente (a ou b) est forte et estimée avec une faible incertitude, ce qui conduit à privilégier les fortes valeurs du rapport IPI.

III.2.3.Sélection des observables

La procédure de sélection des observables peut se faire suivant deux logiques :

- Soit sur une démarche purement statistique avec un calcul des indices de qualité et de pertinence basé sur les variabilités aux différentes échelles des mesures ;
- Soit sur le calcul d'indices issus de régression bilinéaire.

Bien que ces deux procédures reposent sur des critères formellement différents, elles traduisent les mêmes idées et sont liées aux mêmes grandeurs mathématiques (rapport de

variance, rapport d'un écart-type à une moyenne). Ces deux démarches devraient donc conduire à des sélections d'observables comparables.

Pour être préférentiellement retenu, un observable doit avoir un bon indice de qualité IQ ainsi qu'un bon indice de pertinence IP. De plus, les observables ayant un de leurs indices de pertinence prépondérant sur l'autre seront à privilégier car cela signifie qu'ils sont davantage sensibles à l'un des indicateurs qu'à l'autre. Des seuils ont été établis pour chacun des critères de sélection et sont donnés dans le Tableau IV. 3.

Tableau IV. 3. Seuils de sélection des critères de qualité et de pertinence des indicateurs

Critère	IQ	IP
Statistique	> 0,6	> 0,5
Régression	> 0,4	> 0,4

L'application stricte des seuils de sélection des deux procédures a permis de retenir 9 observables dont la liste est donnée dans le Tableau IV. 4. Toutefois, parmi ces 9 observables, 3 couples étaient porteurs d'une information redondante (observables n°6 et 4 tous deux porteurs d'une information sur la vitesse des ondes ultrasonores, observables n° 36 et 35 : valeur de résistivité électrique, observables n°51 et 49 : temps d'arrivée d'onde radar pour différents offsets). Les observables redondants ont donc été éliminés de la sélection et seuls 6 observables sont retenus par les deux procédures de sélection.

Tableau IV. 4. Observables retenus par les deux systèmes de classement

Technique	Labo	Observable	N°
Ultrason	LCPC	Vitesse 3 cm	6
Ultrason	LCPC	Vitesse 1 cm	4
Ultrason	LCND	Vitesse transmission épaisseur, 250Hz, ondes de compression	11
Résistivité électrique	I2M-GCE	Logarithme de la résistivité quadripôle 10 cm	36*
Résistivité électrique	I2M-GCE	Logarithme de la résistivité quadripôle 5 cm	35*
Résistivité électrique	LMDC	Wenner 5 cm	40
Radar	LMDC	Amplitude pic pic	41
Radar	LCPC	Temps d'arrivée, offset 13.2 cm	51
Radar	LCPC	Temps d'arrivée, offset 7 cm	49

En gris : observables répondant aux critères de sélection mais porteurs d'une information redondante avec un autre des observables de la liste.

A ces 6 observables communs aux deux sélections ont été ajoutés des observables distingués par l'une ou l'autre des méthodes et qui, après discussions avec les experts de la technique, ont semblé pouvoir apporter une information complémentaire. Cette liste d'observables complémentaires est donnée dans le Tableau IV. 5.

On aboutit à une sélection finale de 15 observables couvrant l'ensemble des techniques utilisées lors du projet (la thermographie infrarouge mise à part car elle n'a pu fournir des observables constants sur l'ensemble du volet expérimental).

Tableau IV. 5. Observables retenus par seulement l'un ou l'autre des systèmes de classement

Technique	Labo	Observable	N°
Ultrason	Lille	OS vitesse de groupe moyenne	1
Ultrason	LCPC	US vitesse apparente	2
Ultrason	Lille	OS atténuation moyenne	15
Ultrason	Lille	Facteur de qualité	17
Impact écho	LCPC	Fréquence pic 4	24
Capacité	LCPC	Capa grande électrodes	26
Résistivité électrique	I2M-GCE	Contraste 5/10	39
Radar	LMDC	Fréquence centrale onde directe	42
Radar	LMDC	Vitesse radar onde directe	47

IV. Premiers résultats

Le travail de sélection d'observables de qualité a permis une post-exploitation des mesures. Ces données sont utilisées pour :

- d'une part, estimer la représentativité des mesures de cnd afin d'obtenir, pour un observable, le nombre de mesure nécessaire à l'obtention d'une valeur caractéristique du matériau ;
- d'autre part, combiner les résultats issus de plusieurs techniques par régression bilinéaire ou fusion de données pour optimiser.

IV.1. Estimation de la qualité d'une mesure de CND

En posant l'hypothèse de relations de type linéaire $Y = f(X)$ entre l'observable Y et l'indicateur recherché X, Breysse [BRE, 11²] a calculé la sensibilité du paramètre Y à la propriété X comme [IV. 26].

$$s_x(Y) = \frac{\Delta Y / Y}{\Delta X / X} \quad [IV. 26]$$

Avec : $s_x(Y)$ Sensibilité du paramètre Y

La sensibilité indique l'aptitude à déceler une variation de X à partir d'une mesure de Y. Plus la sensibilité est élevée, plus la technique est capable de détecter une variation de la propriété X.

Cependant, la sensibilité de la technique n'est pas le seul paramètre entrant en jeu dans cette aptitude : la qualité de la technique est également importante.

Il est possible, pour chaque observable, de calculer le rapport « signal sur bruit » défini par :

$$SB = \frac{\Delta Y(\Delta X)}{\sigma(Y)} = \frac{s_x(Y) \cdot \frac{\Delta X}{X} \cdot Y}{\sigma(Y)} \quad [IV. 27]$$

Avec : SB Rapport signal sur bruit

$\sigma(Y)$ Ecart-type de la mesure de Y

Les mesures de répétabilité locale donnent pour chaque observable, sa valeur moyenne ($\mu(Y)$), sa variance ($V(Y)$), et son écart-type ($\sigma(Y)$). Pour des valeurs de SB supérieures à 1, il est possible de détecter des variations de X. Répéter les mesures en un point permet de réduire les effets de bruit de la mesure.

Or, nous avons vu précédemment que la plupart des techniques d'END ne sont pas sensibles à un mais à plusieurs indicateurs dont les effets sont difficilement dissociables, d'où l'utilisation de régressions bilinéaires. Or, en supposant l'un des indicateurs de la régression connu, par exemple S_r dans [IV. 21], Breyse *et al.* [BRE, 11¹] ont montré qu'il est possible de déterminer un nombre de mesures minimum à effectuer en un point pour obtenir un indicateur X avec un seuil de confiance $(1-\alpha)$.

Pour cela, on utilise la théorie de l'échantillonnage pour une distribution Gaussienne pour laquelle il est dit que pour un seuil de confiance $(1-\alpha)$, la valeur moyenne vraie $E(Y_i)$ de l'observable est située dans l'intervalle :

$$\left[\mu(Y_i) - \frac{k_{\alpha/2} \cdot \sigma(Y_i)}{\sqrt{n}} \leq E(Y_i) \leq \mu(Y_i) + \frac{k_{\alpha/2} \cdot \sigma(Y_i)}{\sqrt{n}} \right] \quad [IV. 28]$$

- Avec :
- $\mu(Y_i)$ Moyenne des valeurs de l'observable mesurées
 - $\sigma(Y)$ Ecart-type de la mesure de Y
 - $E(Y_i)$ Moyenne vraie de l'observable
 - n Nombre de mesures effectuées

Il est alors possible de calculer le nombre minimum de mesures nécessaire pour estimer l'indicateur avec un degré de précision $\pm \Delta E(Y_i)$ pour un seuil de confiance donné :

$$n \geq (k_{\alpha/2} \cdot a_i \cdot \Delta E(Y_i))^2 \cdot V1_i \quad [IV. 29]$$

Le tableau ci-dessous donne un exemple du nombre minimum de mesure nécessaire pour estimer le module d'Young saturé ± 500 MPa :

Tableau IV. 6. Nombre minimum de mesures pour l'estimation de E_{sat} à ± 500 MPa [BRE, 11¹]

Observable	1	11	36*	41	51
Nombre de tests	3	7	16	1796	44

Il est possible de tracer pour chacun des couples d'indicateurs pour un niveau de confiance donné la variation du nombre d'essais nécessaires en fonction de la précision recherchée. La Figure IV. 13 montre le nombre d'essais minimum requis pour atteindre une précision visée sur Sr, pour un niveau de confiance de 90% lorsque le module d'Young est connu. Le nombre de mesures à réaliser croît avec la diminution de l'incertitude.

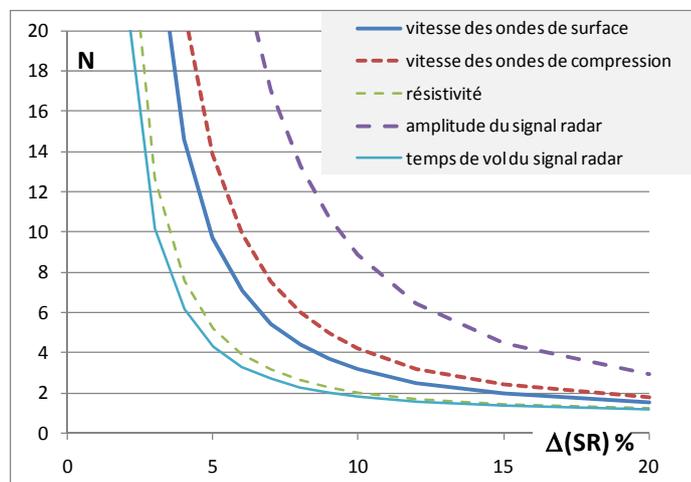


Figure IV. 13. Nombre minimal d'essais requis pour atteindre une précision visée sur Sr [BRE, 11²]

En multipliant le nombre de mesures on augmente la précision de la valeur moyenne mesurée. Cependant, il ne faut pas oublier que cette valeur est une valeur locale et qu'elle ne représente pas l'intégralité de l'ouvrage. Il faudra répéter ce même nombre N de mesure à chaque endroit de la structure dont on souhaite obtenir une valeur d'indicateur. Il est donc intéressant d'utiliser une méthode à grand rendement, telle que la thermographie infrarouge, pour positionner les points sur lesquels on souhaite obtenir une information plus précise et sur lesquels on viendra appliquer une méthode plus précise.

IV.2. Combinaison de mesure par régression bi-linéaire

Les travaux présentés ici reposent sur l'utilisation des relations multilinéaires de la forme [IV. 30], dont un cas particulier a été présenté en [IV. 21] :

$$O_i = a_i X_1 + b_i X_2 + c_i \quad [IV. 30]$$

- Avec :
- O_i Observable i
 - X_1 Indicateur 1
 - X_2 Indicateur 2
 - a, b, c Coefficients de la régression

L'équation de régression bilinéaire donne pour chaque couple (X_1, X_2) une valeur théorique d'observable, l'ensemble de ces points décrivant le plan de régression modèle. La Figure IV. 14 illustre la concordance entre mesures et plan de régression.

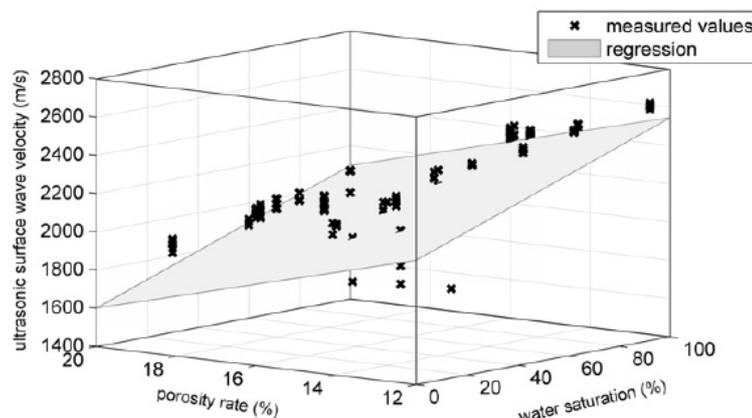


Figure IV. 14. Exemple de régression bilinéaire: vitesse des ondes de surface (Observable 2) en fonction de la porosité et du degré de saturation [PLO,11]

Les 6 indicateurs de la tranche 1: degré de saturation (Sr), porosité (P), modules élastiques sec ou saturé (Esec, Esat) et résistances en compression (Rcsec, Rcsat), peuvent

être étudiés deux à deux par régression bilinéaire. On obtient alors pour chaque observable des valeurs de coefficients a, b et c dépendantes des indicateurs étudiés. Le Tableau IV. 7 rassemble les valeurs de ces coefficients pour le couple saturation/porosité.

Tableau IV. 7. Exemples de relation multilinéaire entre observables et indicateurs [LMD, 09]

	Observable	Labo	a (Sr)	b (P)	c	r²
1	OS vitesse de groupe moyenne	Lille	2.93	-58.18	2736.23	0.63
6	US vitesse apparente	LCPC	4.96	-55.90	2720.50	0.62
9	Vitesse longitudinale onde de compression	Lille	-87.70	8.90	507.00	0.62
11	Vitesse transmission épaisseur, 250Hz, ondes de compression	LCND	8.90	-87.68	5078.55	0.62
17	Facteur de qualité	Lille	0.22	-0.53	13.25	0.62
24	Fréquence pic 4	LCPC	16.14	-131.94	7296.12	0.42
26	Capa grande électrodes	LCPC	-3.76	-1.51	-337	0.47
36*	Log de la résistivité quadripôle 10 cm	I2M-GCE	-0.01	-0.12	5.26	0.67
41	Amplitude pic pic	LMDC	-0.001	-0.004	0.64	0.70
51	Temps d'arrivée, offset 13.2 cm	LCPC	0.004	0.007	0.76	0.95

Les régressions ont été établies à partir des mesures effectuées sur 7 compositions de béton (gâchée G6 exclue car avec un granulat aux propriétés trop différentes des autres bétons, et gâchée G1 exclue car porosité trop faible ayant empêché d'atteindre les taux de saturation visés), dans 5 états de saturations.

Les Figure IV. 15 a à d illustrent et permettent de mieux comprendre les dépendances mesurées entre observables et indicateurs :

- Les deux figures du haut montrent la redondance des deux mesures (même allures des dépendances : plus le matériau est humide et peu poreux, plus la vitesse des ondes ultrasonores augmente).
- Les deux figures du bas fournissent à l'inverse des informations complémentaires (leur plan de régression sont sécants) et leur utilisation combinée va conduire à l'identification des indicateurs.

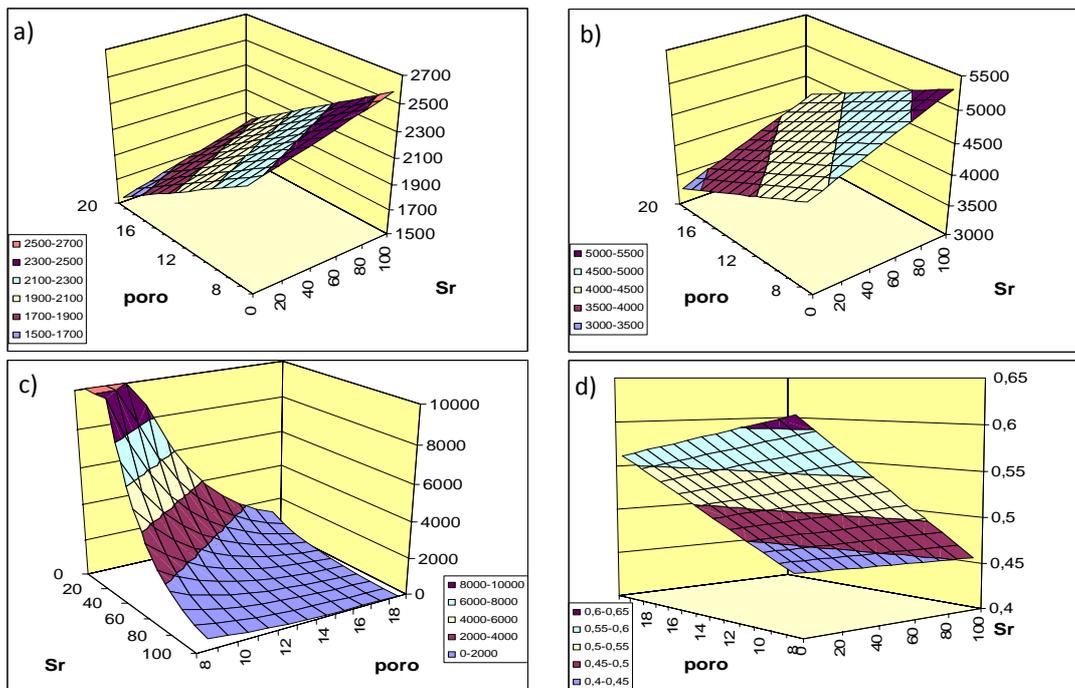


Figure IV. 15. Modèles de régression identifiés pour 4 observables en fonction de la porosité et du degré de saturation a) Observable 6 : US Vitesse 3 cm, b) Observable 9 : OS atténuation, écart-type c) Observable 36 : Résistivité électrique quadripôle 10 cm, d) Observable 51 : Radar Temps d'arrivée offset 13,2cm (d'après [BRE, 09])

L'intersection entre le plan de régression et le plan horizontal (correspondant à la valeur mesurée) d'un l'observable donne une droite pouvant être projetée dans le plan (Sr, P). Cette droite conduit à une infinité de couples de solutions (Sr,P). Cependant en combinant les projections des droites de plusieurs observables complémentaires on va aboutir à un (des) point(s) d'intersection dont les coordonnées seront les valeurs des indicateurs (Figure IV. 16). Dans l'idéal, toutes les droites se coupent au même point, solution unique et exacte des valeurs d'indicateurs. Dans la pratique ce n'est pas le cas. Les différentes incertitudes conduisent à l'apparition de points d'intersection multiples. La Figure IV. 16 montre trois couples (Sr,P) pouvant être solutions.

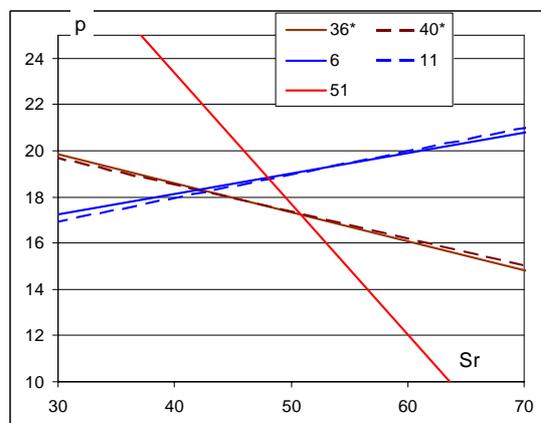


Figure IV. 16. Couplage des mesures de différents observables sur la gâchée 3, état S3, dalle n°5 [LMD, 09]

Dans un tel cas il est difficile de choisir quel couple doit avoir notre préférence. Pour répondre à cette question un processus d'estimation plus complet a été développé utilisant la fusion de données. Nous allons le présenter sommairement, même si nous n'avons pas participé directement à son développement. Cette méthode ouvre en effet des perspectives très intéressantes.

IV.3. Fusion de données

La procédure de fusion de données repose sur la théorie des possibilités, à savoir qu'à toute valeur de l'observable correspond une distribution de possibilités de(s) l'indicateur(s) et sur l'emploi d'opérateurs sur les distributions de possibilités déduites de chaque valeur d'observable pour affiner les présomptions. La démarche générale de construction et de validation de l'outil de fusion de données a été décrite en détail dans [LMD, 09]. Seules les grandes lignes seront retranscrites ici.

La Figure IV. 17 illustre le lien entre une mesure d'observable et le couple d'indicateurs Sr/P. L'intersection du plan de régression bilinéaire de l'observable (issu du travail précédent) et du plan horizontal ($Obs_i = \text{valeur mesurée}$) fournit, dans le plan horizontal (Sr, p) donne la courbe de possibilité maximale.

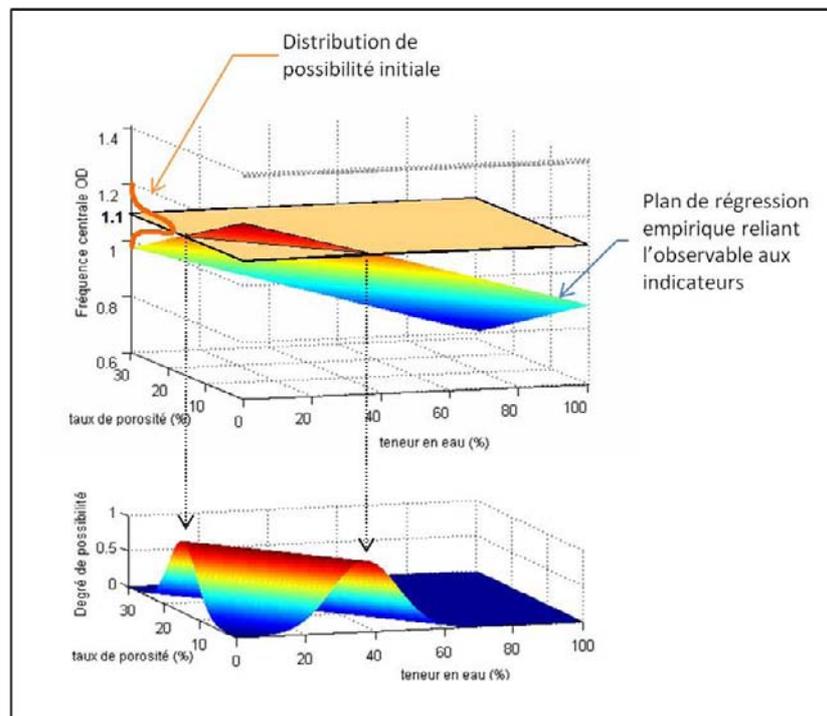


Figure IV. 17. Identification de la distribution de possibilité des indicateurs pour l'observable 42 (d'après [PLO, 11])

L'étendue de la distribution de possibilités autour de cette courbe est fonction de l'étendue de l'incertitude de mesure de Obs_i , qui dépend de V_3 . Cette approche tient

compte de manière explicite de l'incertitude de mesure. L'importance de cette incertitude est particulièrement visible sur les Figure IV. 18 c et d représentant les projections sur le plan horizontal (Sr,P) des distributions de possibilités.

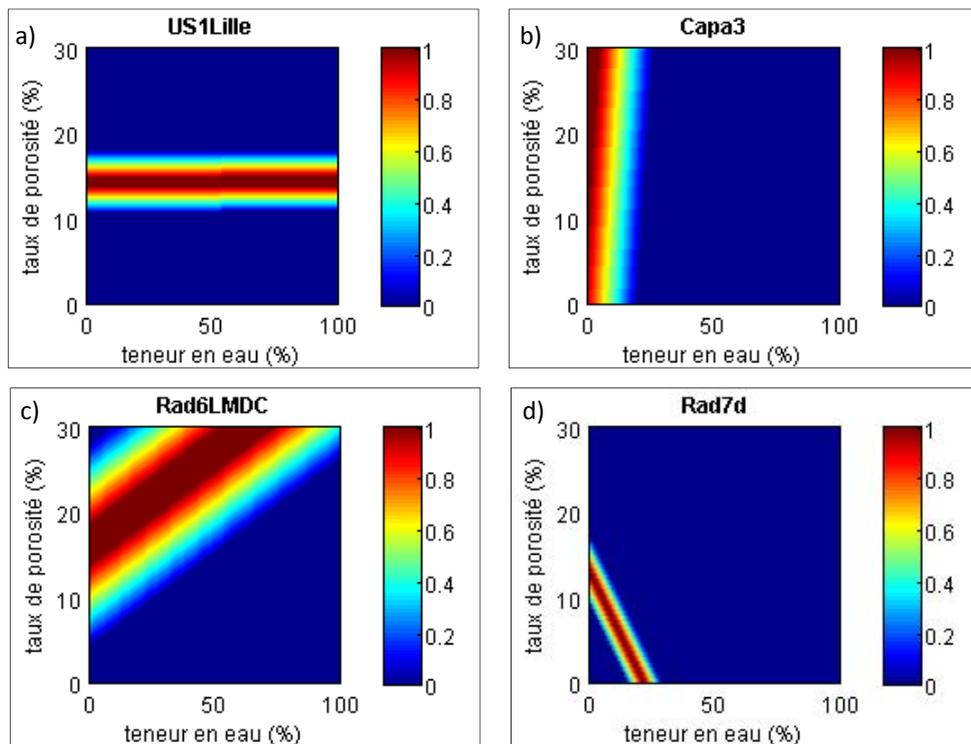


Figure IV. 18. Exemples de distributions

a) $V_{OS} = 2209 \text{ m/s}$, b) $Capa_{\text{petite électr.}} = -162$, c) $V_{OD} = 14 \text{ cm/s}$, d) $t_{\text{arrivée } 14.7 \text{ cm}} = 1.106 \text{ [LMD, 09]}$

Le principe de la fusion est de trouver les zones d'accord et de désaccord, des différentes distributions que l'on souhaite corréler, pour en extraire une ou des informations suffisamment fiables. Toute la difficulté de la fusion réside dans le choix de l'opérateur de combinaison qui permet de réaliser un compromis entre un résultat précis mais sûrement faux, et un résultat certain mais trop imprécis.

Il existe deux types de fusion : la fusion en cascade et la fusion en parallèle. Le projet SENSO utilise la fusion en parallèle, pour laquelle toutes les informations sont combinées. Cette démarche nécessite l'indépendance des sources.

La Figure IV. 19 illustre le principe de la fusion dans le plan saturation/porosité : à gauche est représenté l'ensemble des faisceaux de possibilités des différents indicateurs à fusionner, à droite on observe le résultat de la fusion, et entre les deux se trouve l'opérateur de combinaison.

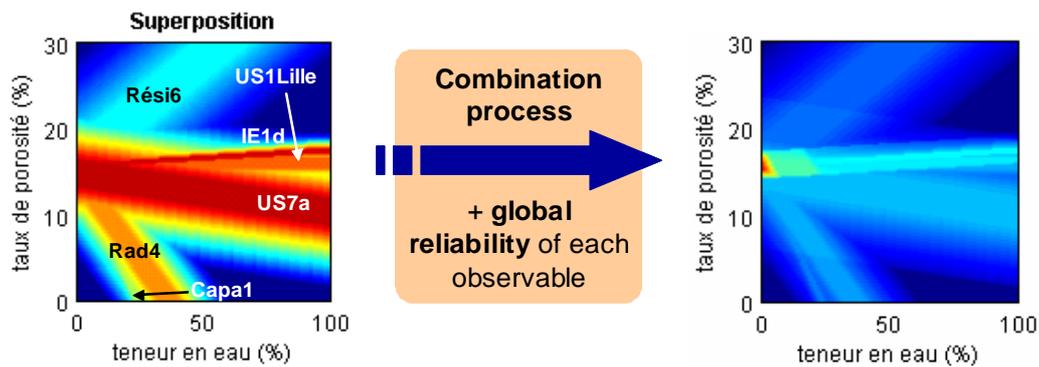


Figure IV. 19. Illustration de la fusion : détermination de la distribution de possibilité à partir de plusieurs observables [BRE, 09]

Une interface a été développée sous Matlab® pour faciliter l’exploitation des mesures et le diagnostic. La Figure IV. 20 montre cette interface, permettant le choix des observables et la saisie des valeurs mesurées, et les représentations graphiques 2D qui peuvent être obtenues, en haut, avant fusion, en bas, après fusion.

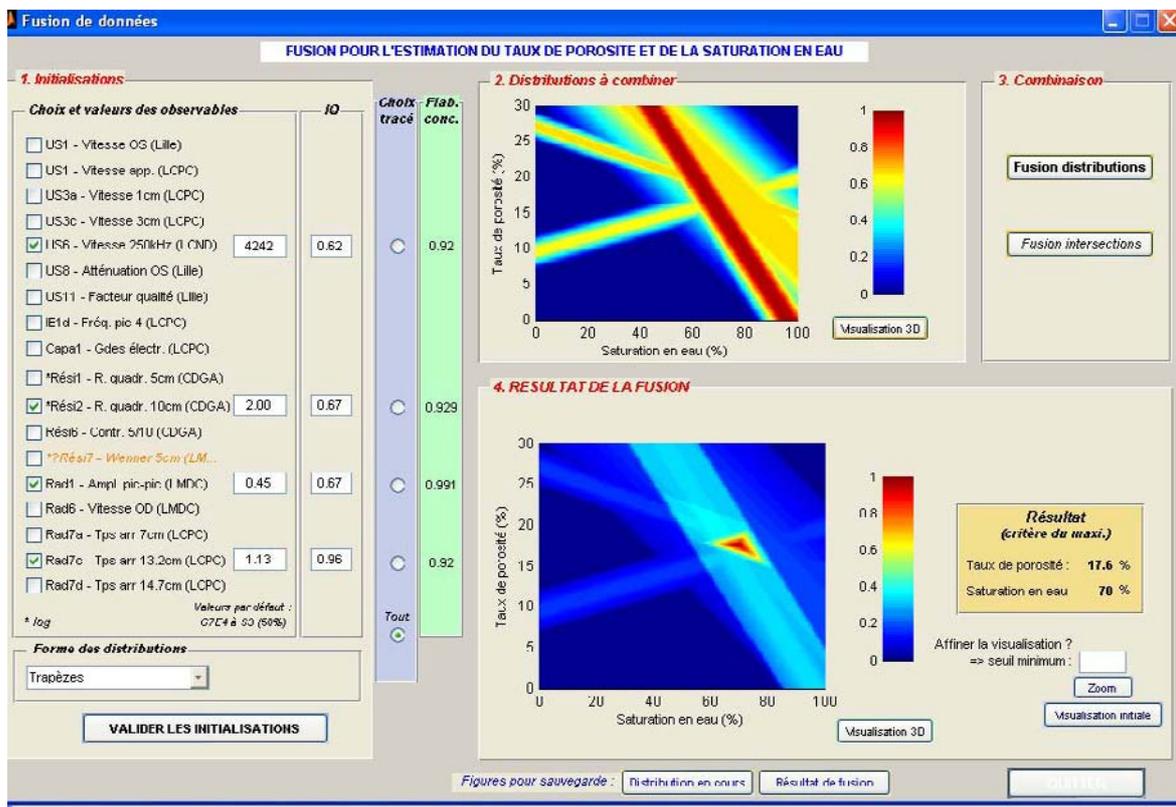


Figure IV. 20. Interface graphique du module Matlab [LMD, 09]

Cette interface permet également l’obtention de représentations 3D des résultats de la fusion dont un exemple est donné en Figure IV. 21. On voit ici apparaître tout l’intérêt de la fusion de données.

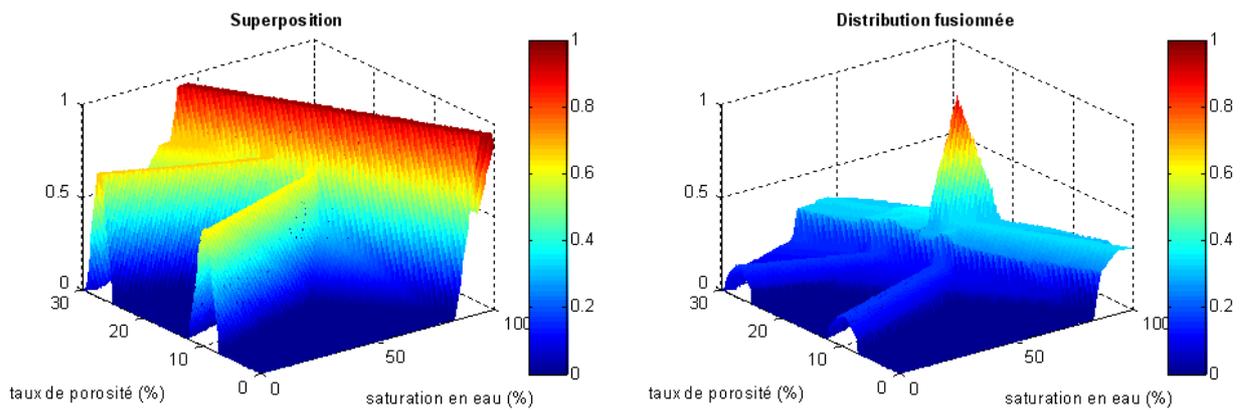


Figure IV. 21. Représentation 3D des distributions de possibilités et des surfaces fusionnées pour le cas de la figure Figure IV. 20 [LMD, 09]

V. Conclusions

La base de données créée à partir des mesures SENSO a permis d'identifier une liste d'observables à privilégier lorsque l'on souhaite obtenir des valeurs d'indicateurs définis. La liste établie précédemment est valable uniquement pour la recherche des indicateurs visés par la tranche expérimentale n°1 c'est-à-dire la porosité, la teneur en eau, la résistance mécanique et le module élastique. Cependant la même démarche peut être adoptée pour la détermination d'autres indicateurs.

Un observable seul, étant le plus souvent sensible à plusieurs des indicateurs que l'on cherche à déterminer, n'est pas apte à quantifier un indicateur. Pour ce faire, un travail de combinaison de plusieurs observables est nécessaire afin de découpler les effets des différents indicateurs, sur les différents observables. Ce travail s'appuie également sur la base de données. Dans le projet SENSO deux voies ont été suivies :

- La combinaison de techniques par l'utilisation de régressions bi-linéaires (porosité, S_r), (E_{sec}, S_r) , (E_{sat}, S_r) , $(R_{c_{sec}}, S_r)$; ce travail a été réalisé par le Pr Breyse et le Dr Sbartaï ;
- La combinaison de techniques par fusion de données ; ce travail a été mené par les Dr Garnier et Dr Ploix ;

Le travail de création, de mise en forme et de consolidation d'une base de données est un travail long et fastidieux qui n'apporte en lui-même aucune avancée technologique. Toutefois cette étape reste indispensable à l'exploitation et à la valorisation des mesures, surtout dans le cas d'un projet comme le projet SENSO où le nombre de partenaires et de techniques impliqués est important.

L'exploitation qui en est faite dans le projet est intéressante de par sa démarche novatrice, sélection d'observables en fonction des indicateurs recherchés, et de par les outils utilisés : régressions bi-linéaires et fusion de données. Cependant, quelques points restent à améliorer parmi lesquels le choix du modèle de régression : ils ont été pris linéaire pour tous les observables. Or, adapter la forme de la régression, de manière à être plus proche de la réalité physique, pourrait dans le cas de certaines techniques améliorer les résultats. Un autre enjeu majeur est le recalage et la calibration des modèles pour être applicables à tous types de béton. En effet, la fusion de données est basée sur les modèles de régressions linéaires établis sur les bétons SENSO en écartant les bétons de granulats calcaires ainsi que ceux à l'état sec. Ceci implique, qu'à l'heure actuelle la combinaison de technique par régressions bi-linéaire et/ou par fusion de données, ne fonctionne que pour des bétons de compositions proches de celles des bétons SENSO.

C'est pourquoi, afin d'approfondir les résultats encourageants issus de SENSO un nouveau projet (RGCU-C2D2 Concevoir et Construire pour le Développement Durable) intitulé ACDC (Analyse et capitalisation pour le Diagnostic des Constructions) a été lancé. On retrouve à l'intérieur du volet 1 de ce projet le développement de méthodologies de surveillance contenant notamment le suivi et l'évaluation en temps réel des ouvrages, ainsi que la fiabilité des mesures issues du contrôle non destructif.

La démarche de combinaison de techniques de contrôle non destructif initiée dans le projet SENSO a montré tout son potentiel. La généralisation de la méthodologie bâtie sur les bétons SENSO permettrait, à terme, de proposer aux bureaux d'études un outil de diagnostic. Il permettrait le choix entre plusieurs combinaisons de techniques en fonction de leur coût, de leur temps, et de leur qualité vis-à-vis d'un objectif donné.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES



Les travaux de thermographie infrarouge et de couplage de techniques présentés dans ce manuscrit s'inscrivent dans le cadre du développement des outils de contrôle non destructif des ouvrages. Plus globalement, ils s'inscrivent dans l'amélioration de la politique de gestion du patrimoine.

La thermographie infrarouge est un outil reconnu pour sa capacité à acquérir des données sans contact, sur de larges zones d'ouvrage et avec des vitesses d'acquisition permettant le grand rendement. En contrepartie c'est une technique sensible à de nombreux paramètres dont il est nécessaire de connaître les valeurs afin de pouvoir les corriger (émissivité du matériau, température de l'environnement, distance caméra – scène thermique...). Les résultats se présentent sous forme de thermogrammes mettant ainsi en exergue des variations locales ou les gradients de température à la surface des objets. Ces variations ou gradients, sont les signes de modification des flux de chaleur, soit par un apport ou une perte de chaleur, soit par des variations des propriétés thermiques du matériau.

Dans un premier temps une étude bibliographique a permis d'identifier les paramètres de sensibilité de la technique ainsi que les paramètres extérieurs affectant la mesure. La diffusion de la chaleur, et donc la répartition des températures dans un corps, est régie par les propriétés thermiques du matériau (conductivité thermique, chaleur massique et masse volumique).

En traduisant les phénomènes thermiques présents dans l'épaisseur du matériau, la thermographie infrarouge permet de détecter la présence de défauts en profondeur. Il existe deux formes de thermographie infrarouge : la thermographie infrarouge passive qui s'appuie sur des gradients de température naturellement présents dans le matériau et la thermographie infrarouge active qui nécessite un apport d'énergie. L'étude a permis de mieux appréhender les traitements effectués en thermographie infrarouge active, forme de thermographie permettant la quantification de défauts.

Nous nous sommes par la suite intéressés à la capacité de cette technique à mettre en évidence des variations propriétés identifiées comme indicateurs de durabilité : la porosité et la teneur en eau. Le premier travail a consisté à étudier l'influence de ces deux paramètres sur les propriétés thermiques intrinsèques du matériau. A l'état sec, la diffusivité thermique, sur une étendue classique des porosités pour les bétons (entre 12,5 et 18,1%), décroît de 20%. De manière complémentaire, l'influence de la variation de la teneur en eau donne les résultats suivants : pour une porosité donnée, l'augmentation d'environ 70% de la teneur en eau (de l'état sec à une teneur en eau massique de 70%) conduit à une diminution

de 10% de la diffusivité. Ainsi, sur les bétons étudiés, l'influence de la porosité aurait dû être prédominante sur celle du degré de saturation.

Or, les résultats numériques et expérimentaux s'accordent sur l'incapacité de la thermographie infrarouge à faire la distinction entre bétons de différentes porosités. L'influence de la teneur en eau n'a, quant à elle, été observée qu'en théorie (approche numérique par éléments finis). L'approche expérimentale retenue (avec le protocole utilisé) ne l'a pas mise en évidence malgré les gammes étendues de variations. Ceci est principalement dû au protocole expérimental utilisé pour lequel une forte résistante thermique est présente en surface. L'évolution des températures de surface ne dépend plus de la conductivité thermique mais uniquement de la chaleur massique et de la masse volumique. Dans le cas de l'étude de la porosité, les variations de ces deux grandeurs sont faible sur la gamme de porosité étudiée 3%. Cela explique pourquoi il n'a pas été possible de différencier les bétons. Dans le cas du degré de saturation, l'augmentation de la masse d'eau entraîne une très forte augmentation de la chaleur massique entre les différents états (30% entre l'état sec et un degré de saturation de 70%) qui aurait dû être identifiée. Dans cette seconde partie de l'étude, les problèmes rencontrés sont principalement dus aux conditions d'exposition (température de l'air) qui ne sont identiques entre les dalles aux différents états de saturation, ainsi qu'aux températures initiales qui diffèrent entre les corps d'épreuve. Toutefois ces mesures ont permis d'identifier des sources d'erreur potentielles des mesures afin d'améliorer le protocole expérimental. La maîtrise des conditions initiales et la connaissance des conditions environnementales paraissent essentielles.

Nous avons ensuite choisi d'étudier les délaminations, qui sont des dégradations couramment détectées en thermographie infrarouge. L'objectif était de préciser les limites de détection de la technique, ainsi que de proposer une méthodologie permettant d'optimiser la détection voire d'envisager l'analyse inverse (en termes de profondeur). Nos travaux ont porté sur une analyse en mode transitoire (évolution des effets thermiques dans le temps) dans le cas de délaminations artificielles, afin de distinguer les instants de mesure à privilégier. La campagne de mesure a été réalisée à Bordeaux (GMT +1) sur des dalles en béton, contenant de fine lame de polystyrène représentant les délaminations (délaminations carrées de 10 cm de coté). Les sollicitations thermiques utilisées sont les variations de température extérieure et l'ensoleillement direct naturel ; les résultats ainsi obtenus sont appuyés par une approche numérique.

Le seuil de détection des délaminations fixé généralement (et empiriquement) à une profondeur deux fois plus faible que l'étendue est validé dans le cas d'une délamination soumise à ensoleillement direct. Dans le cas d'un ouvrage à l'ombre le seuil ne convient pas.

Les mesures expérimentales, ont montré une capacité de détection des délaminations jusqu'à une profondeur d'environ 5 cm pour des mesures réalisées entre 14 et 15h. Les simulations numériques ont permis de modéliser les mêmes corps d'épreuve sans ensoleillement direct (ouvrages à l'ombre). Dans cette configuration, la profondeur maximale de détection des délaminations, par analyse des contrastes thermiques entre zones saines et délaminées, est de 3 cm (ce qui est en dessous du seuil couramment admis) avec un optimum de détection entre 11h30 et 12h30.

L'étude numérique a montré qu'un suivi temporel de la surface entre 6h et 12h30 avec une analyse des gradients temporels de température permet d'une part d'identifier des délaminations jusqu'à une profondeur plus importante (4 cm) mais également de classer ces délaminations en termes de profondeur relativement les unes aux autres.

L'originalité de cette approche « transitoire en mode passif » et l'amélioration de la qualité des résultats qui en découle (en terme de capacité de détection par exemple), font présager de l'intérêt de pousser plus avant ces analyses. Il serait ainsi intéressant de poursuivre cette approche afin de définir plus précisément le seuil de détection prenant en compte l'amplitude thermique de la journée, ainsi que l'instant du pic de « détectabilité », relativement aux caractéristiques géométriques de l'altération, et au mode de sollicitation (ensoleillement direct ou non).

La prise en compte d'une géométrie plus réaliste des délaminations est également traitée. Ainsi, nous avons souhaité considérer le cas de délaminations présentant des pontages. Ce paramètre existant, mais jusque là jamais étudié en laboratoire, induit indubitablement des effets sur les transferts de chaleur dans la délamination. L'étude vise donc à relativiser les seuils de détection précédemment définis.

La présence d'un taux de pontage surfacique de 15% induit une diminution du contraste de température de 60%, expérimentalement, et de 65 % numériquement pour une délamination située à 2 cm de profondeur. L'étude numérique met en avant la prédominance de l'influence du taux de pontage sur la profondeur de la délamination en termes de contrastes thermiques. Dès lors, l'évaluation des profondeurs de délamination devient plus complexe : par exemple une délamination à 2 cm sans pontage présente le même contraste de température en surface qu'une délamination à 0,5 cm de profondeur et 5% de pontage. Il existe donc une infinité de combinaisons « profondeur – taux de pontage » conduisant à la même réponse thermique du matériau.

Les travaux sur le pontage présentés ne sont qu'une première ébauche et demandent à être approfondis. On devra s'intéresser aux paramètres conditionnant les échanges au

niveau des points de contact entre épontes (influence des granulats, répartition non uniforme, ouverture plus ou moins forte, zone sèche, saturée...).

La dernière partie des travaux porte sur le couplage de différentes techniques de contrôle non destructif. Les travaux sont menés sur une base de données construite dans le cadre du projet ANR SENSO. Celle-ci recense les résultats de différentes techniques CND, obtenus sur différents bétons, présentant différents conditionnement en laboratoire. Une méthodologie de sélection d'observables est décrite, dans le but d'estimer les valeurs d'indicateurs de durabilité des bétons (porosité, résistance mécanique, teneur en eau...). Cette sélection s'effectue en trois étapes : tout d'abord on analyse statistiquement la qualité intrinsèque de chaque observable à l'aide de différentes variabilités, puis on s'intéresse à la pertinence de l'observable vis-à-vis des indicateurs recherchés, et enfin, la dernière étape repose sur la complémentarité entre observables pour la détermination d'un couple d'indicateurs.

Pour chaque groupe d'indicateurs on obtient une sélection réduite d'observables. Deux outils de combinaison de techniques utilisant ces sélections sont brièvement exposés : la combinaison par régression bi-linéaire et la fusion de données. Tout deux reposent sur des modèles de régression qui ont été choisis linéaires. Les premiers résultats issus de ces outils sont prometteurs et valident la démarche de sélection effectuée.

La poursuite de ces travaux (déjà initiée dans le cadre d'autres projets en cours) devra prendre en compte des modèles de régression basés sur la physique de chacune des techniques, afin d'améliorer la qualité des résultats. Un autre aspect des travaux devrait porter sur le développement de la calibration et le recalage des modèles pour s'adapter à tout nouveau type de béton. En effet, les résultats obtenus sur cette base de données ont montré leurs limites dans le cas d'un test sur un matériau différent de celui sur lequel les régressions ont été construites. La méthodologie de calibration des lois sur tout autre béton permettrait d'adapter les régressions et donc d'appliquer la méthodologie développée. Ces travaux chercheraient à déterminer le nombre minimum de calibrations nécessaire vis-à-vis d'un degré de confiance visé.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES



- [ABR, 09] ABRAHAM O., VILLAIN G., LU L., COTTINEAU L.-M., DURAND O., 2009, *A laser interferometer robot for the study of surface wave sensitivity to various concrete mixes*, NDTCE'09, Nantes, 30/6-3/7 2009, pp.597-602.
- [AFN, 87] AFNOR, 1987, *Norme A 09-400 Essais non destructifs _ Thermographie infrarouge _ Vocabulaire*, Norme Afnor, Paris, 7p.
- [AGG, 10] AGGELIS D.G., KORDATOS E.Z., SOULIOTI D.V., MATIKAS T.E., 2010, *Combined use of thermography and ultrasound for the characterization of subsurface cracks in concrete*, *Construction and Building Materials*, Vol. 24, pp.1888-1897.
- [AND, 98] ANDRADE C., 1998, *The proposal of RILEM recommendations for the diagnosis of corrosion of reinforcement*, Journées d'études de la commission Construction-Bâtiment du CEFACOR, St Rémy-lès-Chevreuse, pp. 86-94.
- [ALL, 88] ALLPORT J., MCHUGH J., 1988, *Quantitative evaluation of transient video thermography*, *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, vol.7A, pp. 253-262 in [MAL, 01].
- [AST, 01] ASTM D 4788-88, 2001, *Standart Test Method for detecting delaminations in bridge decks using infrared thermography*, 2p.
- [AVD, 03¹] AVDELIDIS N.P., MOROPOULOU A., 2003, *Applications of infrared thermography for the investigation of historic structures*, *Journal of Cultural Heritage*, Elsevier, vol. 5, pp.119-127.
- [AVD, 03²] AVDELIDIS N.P., MOROPOULOU A., THEOULAKIS P., 2003, *Detection of water deposits and movement in porous materials by infrared imaging*, *Infrared Physics & Technology*, Elsevier, vol. 44, pp.193-190.
- [AVD, 03³] AVDELIDIS N.P., MOROPOULOU A., 2003, *Emissivity considerations in building thermography*, *Energy and Buildings*, Elsevier, vol. 35, pp.663-667.
- [BAL, 02] BALARAS C.A., ARGIRIOU A.A., 2002, *Infrared thermography for building diagnosis*, *Energy and buildings*, Elsevier, vol. 34, pp. 171-183.
- [BAR, 88] BARON J., SAUTEREY R., 1988, *Les bétons hydrauliques*, Editions des Ponts et Chaussées, 550 p. in DELACRE E., OSTROWSKI C., 2002, *Rapport bibliographique sur la détermination des propriétés thermiques des matériaux*, Université de Sherbrooke, 41p.
- [BAR, 07] BARREIRA E., DE FREITAS V.P., 2007, *Evaluation of building materials using infrared thermography*, *Construction and Building Materials*, Elsevier, vol.21, pp. 218-224.

- [BEZ, 87] BEZIAT A., 1987, *Etude expérimentale de la conductivité thermique de matériaux argileux hautement compacts. Contribution à l'étude du stockage de déchets radioactifs*. Thèse de doctorat de l'université d'Orléans.
- [BIA, 04] BIANCHI A.M., FAUTRELLE Y., ETAY J., 2004, *Transferts thermique*, Presses polytechniques et universitaires romanes, Lausanne, 550 p.
- [BEN, 09] BEN LARBI W., 2009, *Experimental Comparison of Lock-in and Pulsed Thermography for the Nondestructive Evaluation of Aerospace Materials*, 6th International Workshop advances in signal Processing for Non Destructive Evaluation of Materials, London, Québec, 8p.
- [BRA, 11] BRACHELET F., DU T., DEFER D., ANTCZAK E., 2011, *Détermination de la diffusivité thermique et de l'épaisseur du béton d'enrobage par thermographie infrarouge*, Actes de la 29^{ème} Rencontre de l'AUGC, Tlemcen, Vol. 3: Approches et modélisation, pp.1-10.
- [BRE, 08¹] BREYSSE D., KLYSZ G., DÉROBERT X., SIRIEIX C., LATASTE J.F., 2008, *How to combine several non-destructive techniques for a better assessment of concrete structures*, Cement and Concrete Research, Vol. 38, Issue 6, pp.783-793.
- [BRE, 08²] BREYSSE D., ELACHACHI S.M., BALAYSSAC J.P., LAURENS S., 2008, *Méthodologie de qualification des observables issus du contrôle non destructif pour qualifier l'état du béton*, European Journal of Environmental and Civil Engineering, vol. 12/4, pp.459-472.
- [BRE, 09] BREYSSE D., LARGET M., SBARTAI M., PLOIX M.A., GARNIER V., 2009, *Combiner et fusionner les mesures de CND pour mieux estimer les propriétés du béton*, European Journal of Environmental and Civil Engineering, vol. 13/4, pp.501-515.
- [BRE, 11¹] Breysse D., Larget M., Sbartai Z.M., Lataste J.F., Balayssac J.P., 2011, *Quality of NDT measurements and accuracy of concrete physical properties quantitative assessment*, European Journal of Environmental and Civil Engineering, Vol.15/4, pp.619-632.
- [BRE, 11²] BREYSSE D., 2011, *Que peuvent nous apporter les techniques non destructives pour l'évaluation in-situ des propriétés du béton?*, PBI Préfa Béton International, Vol.3, pp.96-101.
- [BUS, 92] BUSSE G., WU D., KRAPEN W., 1992, *Thermal wave imaging with phase sensitive modulated thermography*, Journal of Applied Physics, vol. 71, pp. 3962-3965.

- [CAM, 63] CAMPBELL-ALLEN D., THORNE C.P., 1963, *The thermal conductivity of concrete*, Magazine of Concrete Research, Cement and Concrete Association, Vol. 15, pp.39-48.
- [CAR, 06] CARPENTIER O., 2006, *Auscultation de sites miniers par méthodes thermiques. Suivi des réactions de combustion*, Thèse de doctorat, Université d'Artois.
- [CAR, 94] CARINO N.J., 1994, *Nondestructive Testing of Concrete: History and Challenges*, SP-144, American Concrete Institute, pp. 624-678.
- [CAR, 01] CARINO N.J., 2001, *The impact-echo method: an overview*, Proceedings of the 2001 Structures Congress & Exposition, Washington D.C., American Society of Civil Engineers, 18p.
- [CAR, 03] CARINO N.J., 2003, *Nondestructive test methods to evaluate concrete structures*, Special seminar, 6th CANMET/ACI International Conference on durability of concrete, Thessalonica, Greece, 75p.
- [CAR, 59] CARSLAW H.S., JAEGER J.C., 1959, *Conduction of Heat in Solids*, Clarendon press, Oxford, second edition, 510 p.
- [CAW, 88] CAWLEY P., ADAMS R.D., 1988, *The mechanics of the coin-tap method of non – destructive testing*, Journal of Sound and Vibration, Vol. 122, Issue 2, pp. 229-316.
- [CEL, 10] CELAYA M., NAZARIAN S, RAO C., VON QUINTUS H., 2010, *Delamination detection of HMA airport pavements with NDT devices*, 2010 FAA worldwide airport technology transfer conference, Atlantic City, USA, 15p.
- [CHO,83] CHOWN G.A., BURN K.N., 1983, *Thermographic identification of building enclosure effect and deficiencies*, in BALARAS C.A., ARGIRIOU A.A., 2002, *Infrared thermography for building diagnostics*, Energy and buildings, Elsevier, vol. 34, pp. 171-183.
- [CIE, 87] CIELO P., MALDAGUE X., DÉOM A.A., LEWAK R., 1987, *Thermographic nondestructive evaluation of industrial materials and structures*, Materials Evaluation, vol.45, pp. 452-460 in [MAL, 01].
- [CLA, 03] CLARK M.R., MCCANN D.M., FORDE M.C., 2003, *Application of infrared thermography to the non-destructive testing of concrete and masonry bridges*, NDT&E International, Elsevier, vol. 36, pp. 265-275.
- [COL, 10] COLLINS ENGINEER, 2010, *Bridge Inspection Manuel Indiana*, Indiana Department of Transport, Edited by Brilljent LLC, 968p.

- [COU, 97] COUTURIER J.-P., 1997, *Analyse fréquentielle de la thermographie de phase pulsée*, Mémoire pour l'obtention du grade de Maître ès Sciences, Université de Laval.
- [DAR, 02] DARABI A., MALDAGUE X., 2002, *Neural network based defect detection and depth estimation in TNDE*, NDT&E International, vol.35, pp.165-175.
- [DER, 08] DEROBERT X., LAQUINTA J., KLYSZ G., BALAYSSAC J.-P., 2008, *Use of capacitive and GPR techniques for the non-destructive evaluation of cover concrete*, NDT&E International, Vol. 41, Issue 1, pp. 44-52.
- [DEV, 82] DE VRIENDT A.B., 1982, *La transmission de la chaleur : Généralités – La conduction*, Gaëtan Morin éditeur, vol.1, tome 1, 395p.
- [DOS, 00] DOS SANTOS W.N., 2000, *Experimental investigation of the effect of moisture on thermal conductivity and specific heat of porous ceramic material*, Journal of Material science, Vol.35, pp. 3977-3982.
- [DOS, 03] DOS SANTOS W.N., 2003, *Effect of moisture and porosity on the thermal properties conventional refractory concrete*, Journal of European Ceramic Society, Vol.23, pp. 745-755.
- [DRE, 95] DREUX G., FESTA J, 1995, *Nouveau guide du béton*, Editions Eyrolles, Paris, septième édition, 318p,
- [DUT, 10] DU TAO, 2010, *Thermographie infrarouge active par induction électromagnétique application à l'auscultation d'éléments en béton renforcé*, Thèse de doctorat de l'Université d'Artois, 222p.
- [FIL, 06] FILALI M., 2006, *Conductivité thermique apparente des milieux granulaires soumis à des contraintes mécaniques : modélisation et mesures*, Thèse de Doctorat, Institut national polytechnique de Toulouse, 211 p,
- [FLI, 01] FLIR SYSTEMS, 2001, *Fiche technique TermaCAM SC 2000*; FLIR Systems, 2p.
- [GAR, 08¹] GARNIER V., MORIERES S., CHAIX J.-F., PAYAN C., CORNELOUP G., 2008, *Analysis of the backscattered waves in an heterogeneous material : Application on concretes*, Journal of the Acoustical Society of America, Volume 123, Issue 5, Full paper : POMA 4, 045015 (2008).
- [GAR, 08²] GARNIER V., CHAIX J.-F., MORIERES S., 2008, *Caractérisation de bétons par ondes rétrodiffusées*, Congrès COFREND, Toulouse, 21-23 mai 2008.

- [GAU, 84] GAUSSORGUES G., 1984, *La thermographie infrarouge principes – technologies – applications*, Technique et Documentation, Lavoisier, Paris, deuxième édition, 482p.
- [GIL, 07] GILLES P., TOUSSAINT P., 2007, *Les besoins en CND d'un gestionnaire d'ouvrages d'art*, Diagno'béton, Aix en Provence, 4p.
- [GRI, 98] Grinzato E., VAVILOV V., KAUPPINEN T., 1998, *Quantitative infrared thermography in buildings*, Energy and Buildings, Elsevier, vol. 29, pp. 1-9.
- [HAM, 91] HAMRELIUS T., 1991, *Accurate temperature measurement in thermography. An overview of relevant features, parameters and definitions*, Thermosense XIII, SPIE, vol.1467, pp. 448-457.
- [HAR, 70]. HARMATHY T.Z., 1970, *Thermal properties of concrete at elevated temperatures*, Journal of materials, pp. 47-74.
- [HOL, 87] HOLT F.B., EALES J.W., 1987, *Nondestructive Evaluation of Pavements*, Concrete International, Vol. 9, Issue 6, pp 41-45.
- [HUS, 00] HUSTON D. PELCZARSKI N., ESSER B., MASER K., Juin 2010, *Damage detection in roadways with ground penetrating radar*, Congress GPR 2000: Proceedings of eighth international conference on ground penetrating radar, Gold Coast, Australia, vol. 4084, pp.91-94.
- [IND, 10] INDIANA DEPARTMENT OF TRANSPORTATION, Juin 2010, *Bridge inspection manual*
- [KHA, 98] KHAN M.S., WASHER G.A., CHASE S.B., 1998, *Evaluation of dual band infrared thermography system for bridge deck delamination surveys*, Structural Materials Technology III, Proc. SPIE, vol. 3400, pp. 224-235.
- [KHA, 02] KHAN M.I., 2002, *Factors affecting the thermal properties of concrete and applicability of its prediction models*, Building and Environment, Pergamon, vol. 37.
- [KIM, 03] KIM K.H., JEON S.E., KIM J.K., YANG S., 2003, *An experimental study on thermal conductivity of concrete*, Cement and Concrete Research, Vol.33, pp.363-371.
- [KLY, 04] KLYSZ G., 2004, *Caractérisation du béton d'enrobage par technique radar : Exploitation de l'onde directe émetteur-récepteur*, Thèse de Doctorat, Université Paul Sabatier Toulouse III, 240 p.
- [LAN, 06] LANOT-GROUSSET S., 2006, *Projet SENSO _ Compte rendu de mission IR _ Tranche 1- Campagne 1 (état sec)*, Rapport interne CDGA, Université Bordeaux 1, 20p,

- [LAR, 11] LARGET M., BREYSSE D., SIRIEIX C., 2011, *Characterisation of geometrical properties of concrete using passive infrared thermography*, European Journal of Environmental and Civil Engineering, Vol.15/5, pp.759-772.
- [LAT, 01] LATASTE J.F., BREYSSE D., ABRAHAM O., FARGEOT B., 2001, *Évaluation Non Destructive de l'état d'endommagement des ouvrages en béton armé Stratégie générale et Identification des besoins*, XIXème Rencontres Universitaires de Génie Civil, Villeneuve d'Ascq, 6p.
- [LAU, 01] LAURENS S., 2001, *Aptitude de la technique radar à la caractérisation du béton d'enrobage _ Aide au diagnostic de la corrosion des armatures*, Thèse de Doctorat en co-tutelle, INSA Toulouse, Université de Sherbrooke (Canada), 211 p.
- [LMD, 09] LMD-SENSO, 2009, *Stratégie d'Evaluation Non destructive pour la Surveillance des Ouvrages en béton – Rapport Final*, Projet ANR, 263p.
- [LOE, 54] LOEB A.L., 1954, *Thermal conductivity:VIII A theory of thermal conductivity of porous materials*, Journal of the American Ceramic Society, Vol. 37, pp.96-99 in DOS SANTOS W.N., 2003, *Effect of moisture and porosity on the thermal properties conventional refractory concrete*, Journal of European Ceramic Society, Vol.23, pp. 745-755.
- [MAC, 91] MACLACHLAN-SPICER J.W., KERNS W.D., AAMODT L.C., MURPHY J.C., 1991, *Time-resolved infrared radiometry (TRIR) of multilayer organic coatings using surface and subsurface heating*, Thermosense XV, SPIE Proc, vol.1467, pp.311-321 in [MAL, 01].
- [MAI, 02] MAIERHOFER C., BRINK A., RÖLLIG M., WIGGENHAUSER H., *Transient thermography for structural investigation of concrete and composites in the near surface region*, Infrared Physics & Technology, vol.43, pp. 271-278.
- [MAI, 03] MAIERHOFER C., BRINK A., RÖLLIG M., WIGGENHAUSER H., *Detection of shallow voids in concrete structures with impulse thermography and radar*, NDT&E International, vol.36, pp. 257-263.
- [MAI, 05] MAIERHOFER C., BRINK A., RÖLLIG M., WIGGENHAUSER H., 2005, *Quantitative impulse-thermography as non-destructive testing method in civil engineering – Experimental results and numerical simulations*, Construction and Building Materials, vol.19, pp.731-737.

- [MAI, 07] MAIERHOFER C., ARNDT R., RÖLLIG M., *Influence of concrete properties on the detection of voids with impulse-thermography*, *Infrared Physics & Technology*, vol.79, pp. 213-217.
- [MAJ, 90] MAJOURAU S., *La télédétection thermique proche : Exemples de dégradations appliquées au barrage du Chambon (Isère) et à la falaise de la Roque Gageac (Dordogne)*, Thèse de doctorat, Université Bordeaux 1.
- [MAL, 90] MALDAGUE X., 1990, *Evaluation non destructive par thermographie infrarouge*, *IEEE Canadian Review*, vol. 8, pp. 11-15.
- [MAL, 93] MALDAGUE X., 1993, *Nondestructive Evaluation of Materials by Infrared Thermography*, Springer-Verlag, London in COUTURIER J.-P., 1997, *Analyse fréquentielle de la thermographie de phase pulsée*, Mémoire pour l'obtention du grade de Maître ès Sciences, Université Laval, Québec, 73p.
- [MAL, 96] MALDAGUE X., MARINETTI S., 1996, *Pulse phase infrared thermography*, *Journal of Applied Physics*, vol. 79, pp. 2694-2698.
- [MAL, 97] MALDAGUE X., COUTURIER J.P., 1997, *Review of pulse phase thermography*, *Proceedings of the 4th Workshop on Advances Infrared Technology and Application*, Florence, Italie, vol. 53, pp. 271-286.
- [MAL, 01] MALDAGUE X., 2001, *Theory and practice of infrared technology for non destructive testing*, Wiley, 684p.
- [MAR, 72] MARSHALL A.L., 1972, *The thermal properties of concrete*, *Building Science*, Vol. 7, pp.167-174.
- [MAR, 80] MARSHALL S.J., 1980, *Detecting moisture in buildings using infrared thermography*, *Thermosense III*, SPIE Proc, vol. 254, pp.111-117.
- [MAT, 05] MATTEI S., 2005, *Rayonnement thermique des matériaux opaques*, *Techniques de l'Ingénieur*, BE 8 210, 24p.
- [MEO, 05] MOELA C., DI MAIO R., ROBERTI N., CARLOMAGNO G. M., 2005, *Application of infrared thermography and geophysical methods for defect detection in architectural structures*, *Engineering Failure Analysis*, vol. 12, pp. 875-892.
- [MIS, 65] MISSENARD A., 1965, *Conductivité thermique des solides, liquides gaz et de leurs mélanges*, éditions Eyrolles, Paris, pp.307-324.

- [MORa, 01] MORABITO P., 2001, *Thermal properties of concrete. Variations with the temperature and during the hydration phase*, Report BE96-3843/2001:18-4 Improved Production of Advanced Concrete Structures (IPACS), Published by Department of Civil & Mining Engineering, Division of Structural Engineering, 23 p.
- [MOR, 00] MOROPOULOU A., KOU I M., AVDELIDIS N.P., KAKARAS K., 2000, *Intelligent passive control methods to inspect quality of airport runways and asphalt pavement*, Computational methods for smart structures and materials, WIT Press, pp. 85-93.
- [MOR, 01] MOROPOULOU A., AVDELIDIS N.P., KOU I M., KAKARAS K., 2000, *An application of thermography for detection of delaminations in airport pavement*, NDT&E International, Elsevier, vol. 34, pp. 329-335.
- [MOR, 02] MOROPOULOU, A., AVDELIDIS, N., P., KOU I, M., AND KAKARAS, K., 2002, *Flaw detection and evaluation of airport pavements by means of infrared thermography*, http://www.goinfrared.com/media/Detection_Evaluation_Airport_Paving.pdf
- [NAA, 06] NAAR S., 2006, *Evaluation non destructive du béton par mesures de résistivité électrique et thermographie infrarouge passive*, Thèse de Doctorat en cotutelle, Université Bordeaux 1, Université de Sherbrooke, 248p.
- [NEV, 00] NEVILLE A., 2000, *Propriétés des bétons*, éditions Eyrolles, Paris, 806p.
- [OSI, 96] OSIANDER R., SPICER J.W.M., MURPHY J.C., 1996, *Analysis methods for full-field time-resolved infrared radiometry*, Thermosense XX, SPIE Proc, vol. 2766, pp. 218-227.
- [OST, 03] OSTROWSKI C. ANTCZACK E., DEFER D., DUTHOIT B., 2003, *Association of Infra-red thermography and thermal impedance applied to the detection of empty spaces under concrete slabs*, NDTCE Berlin 2003, 3p.
- [OST, 05] OSTROWSKI C., 2005, *Auscultation des ouvrages en béton par thermographie infrarouge active et passive*, Thèse de doctorat en cotutelle, Université d'Artois, Université de Sherbrooke, 171p.
- [PAJ, 89] PAJANI D., 1989, *Mesure par thermographie infrarouge*, Add éditeur, 418p.
- [PIA, 0] PIAU J.-M ., BENDADA A., MALDAGUE X., LEGOUX J.-G., 2008, *Nondestructive testing of open microscopic cracks in plasma-sprayed-coatings using ultrasound excited vibrothermography*, Nondestructive Testing and Evaluation, vol.23, n°2, pp.109-120.

- [PIW, 09] PIWAKOWSKI B., SAFINOWSKI P., 2009, *Non-destructive non-contact air-coupled concrete evaluation by an ultrasound automated device*, NDTCE'09, Nantes, 30/6-3/7 2009, 6p.
- [PLO, 11] PLOIX M.A., GARNIER V., BREYSSE D., MOYSAN J., 2011, *NDE data fusion to improve the evaluation of concrete structures*, NDT&E International, Vol.44, Issue 5, pp.442-448.
- [REI, 08] REINER D., BILLOUT M., BIWER C., 2008, *Rapport d'information : Infrastructure de transport : remettre la France sur la bonne voie*, Rapport d'information N°196 fait au nom de la commission des Affaires économiques par la mission d'information portant sur le fonctionnement et le financement des infrastructures de transports terrestres, 83p, <http://www.senat.fr/rap/r07-196/r07-196.html> au 11 juillet 2011.
- [RHA, 02] RHAZI J., LAURENS S., BALAYSSAC J.P., BALLIVY G., 2002, *Evaluation de l'état de santé des structures de béton par les technologies acoustiques et électromagnétiques*, 4th Structural Specialty Conference of the Canadian Society for Civil Engineering, Montréal, Canada, 8p.
- [RIL, à p.] RILEM, à paraître, *Chapter 5: Assessment of bonding, delamination and interfaces in Final report of Technical Committee 207-INR: Interpretation of NDT results and assessment of RC structures*, chaired by Pr. Breysse, 40p.
- [SAC, 82] SACADURA J.F., 1982, *Initiation aux transferts thermiques*, Ed Tech & Doc, 445p.
- [SAK, 02] SAKAGAMI T., KUBO S., 2002, *Development of new non-destructive testing technique for quantitative evaluations of delamination defects in concrete structures based on phase delay measurement using lock-in thermography*, Infrared Physics & Technology, vol.43, pp.311-316.
- [SAN, 97] SANSALONE M., STREETT W.B., 1997, *Impact-Echo: Nondestructive Testing of Concrete and Masonry*, Bullbrier Press, Jersey Shore , PA 17740, ISBN 0-9612610-6-4, 339p.
- [SBA, 01] SBARTAÏ M., 2001, *Caractérisation physico-chimique des bétons par radar _ Approche neuromimétique de l'inversion*, Thèse de Doctorat en co-tutelle, Université Paul Sabatier Toulouse III, Université de Sherbrooke (Canada), 244 p.
- [SBA, à p.] SBARTAI Z.M., BREYSSE D., LARGET M., BALAYSSAC J.P., *Strategy of Combining NDT Techniques for Improving Concrete Properties Evaluation*, Cement and concrete composite, à paraître.

- [SCH, 98] SCHEFF J.J., 1998, *Nondestructive Testing of Concrete Bridge Decks Using Ground Penetrating Radar and the Chain Drag Method*, Mémoire pour l'obtention du grade de Master of Science in Civil Engineering, Université de Virginie-Occidentale, 144p.
- [SCO, 03] SCOTT M., REZAIZADEH A., DELAHAZA A., SANTOS, C.G., MOORE M., GRAYBEAL B., WASHER G., 2003, *A comparison of non destructive evaluation methods for bridge deck assessment*, NDT&E International, vol. 36, pp. 245-255. 13.
- [SIR, 95] SIRIEIX C., RISS J., GENTIER S., ARCHAMBAULT G., 1995, *Heated areas during shrearing of a rock joint*, Proceedings of the second international conference on the Mechanics of Jointed and Faulted Rock, Autriche, Edited by Hans-Peter ROSSMANITH, pp. 181-187.
- [SIR, 05] SIRIEIX C., DEFER D., 2005, *Méthodes thermiques d'évaluation non destructive*, Chapitre B5 de *Méthodes d'évaluation non destructive de l'état d'altération des ouvrages en béton*, sous la direction de BREYSSE D., ABRAHAM O., Edition Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, ISBN 2-85978-405-5, pp.253-274.
- [TAT, 94] TATRO S.B., 2006, *Thermal properties*, Chapitre 22, pp. 226-236. in ASTM STP 169D, *Significance of test and properties of Concrete & Concrete-Making Materials*, Editeurs Lamond J.F., Pielert J.H.
- [THO, 99] THOMAS R.A., 1999, *Thermography Monitoring Handbook*, Coxmoor Publishing Company, Oxford.
- [TOU, 98] TOURET J.P., 1998, Actes du colloque « Recherche & Innovation en Génie Civil », MENRT, Paris.
- [TSU, 07] TSUBOKAWA, Y., MIZUKAMI, J., ESAKI, T., AND HAYANO, K., 2007, *Study on infrared thermographic inspection of de-bonded layer of airport flexible pavement*, FAA Worldwide Airport Technology Transfer Conference. Atlantic City, New Jersey.
- [VAL, 08] VALLUZZI M.R., GRINZATO E., PELLEGRINO C., MODENA C., 2008, *IR thermography for interface analysis of FRP laminates externally bonded to RC beams*, Materials and Structures, vol.42, pp. 25-34.
- [VAV, 82] VAVILOV V.P., TAYLOR R., 1982, *Theoretical and practical aspects of the thermal non-destructive testing of bonded structures*, Research Techniques in Non-destructive Testing, vol.5, pp. 238-279 in [MAL, 01].

- [WAS, 98] WASHER G.A., 1998, *Developments for the non-destructive evaluation of highway bridges in the USA*, NDT&E International, vol.31, pp. 245-249.
- [WIL, 88] WILLIAMS, T. L., 1988, *Industrial and civil applications of thermography* in *Applications of thermal imaging*, IOP Publishing Ltd, Philadelphia.
- [ZIM, 89] ZIMMERMAN R.W., 1989, *Thermal conductivity of fluid-saturated rocks*, Journal of Petroleum Science and Engineering, Vol. 3, pp. 219-227 in [KHA, 02] KHAN M.I., 2002, *Factors affecting the thermal properties of concrete and applicability of its prediction models*, Cement and Concrete Research, Vol.33, pp.363-371.

ANNEXES



Annexe I. 1. Émissivité des matériaux

Matériaux	Température (°C)	Émissivité
Ciment	0 à 200	0,96
Papier	38 à 371	0,93
Ardoise	20	0,72
Asphalte	38	0,93
Basalte	20	0,72
Brique rouge rugueuse	21	0,93
Brique réfractaire	1 000	0,38
Porcelaine	22	0,92
Coton (vestimentaire)	20	0,77
Verre poli	0 à 93	0,92 à 0,94
Granit	21	0,45
Glace lisse	0	0,97
Glace rugueuse	0	0,98
Peinture bleue à base de Cu_2O_3	24	0,94
Peinture blanche à base de ZrO_2	24	0,95
Peinture jaune à base de PbO	24	0,90
Peinture à l'aluminium 10 % Al	38	0,52
Peinture à l'aluminium 26 % Al	38	0,30
Peinture à huile (toutes couleurs)	93	0,92 à 0,96
Verre, 1,98 mm	282	0,90
Verre, 1,98 mm	838	0,41
Caoutchouc dur	23	0,94
Caoutchouc tendre, gris	24	0,86
Sable	20	0,76
Grès rouge	38	0,60 à 0,83
Sciure de bois	20	0,75
Argile	20	0,69
Neige en fines particules	- 7	0,82
Neige granuleuse	- 8	0,89

Annexe II. 1. Agencement des dalles dans l'étuve et lors des mesures

Palette 1

Haut

G4	G5	G6
G1	G8	G7
G3	G3a	G2

G5	G6	G1
G8	G7	G3
G3a	G2	G4

G6	G1	G8
G7	G3	G3a
G2	G4	G5

G1	G8	G7
G3	G3a	G2
G4	G5	G6

G8		G3
G3a	G2	G4
G5	G6	G1

Bas

Palette 2

Haut

G7	G3	G3a
G2	G4	G5
G6	G1	G8

G3	G3a	G2
G4	G5	G6
G1	G8	G7

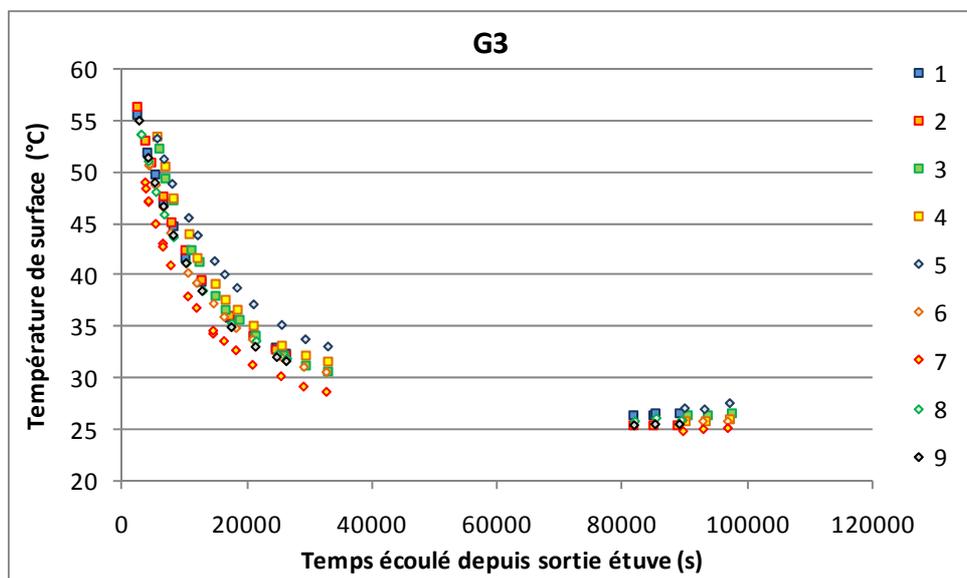
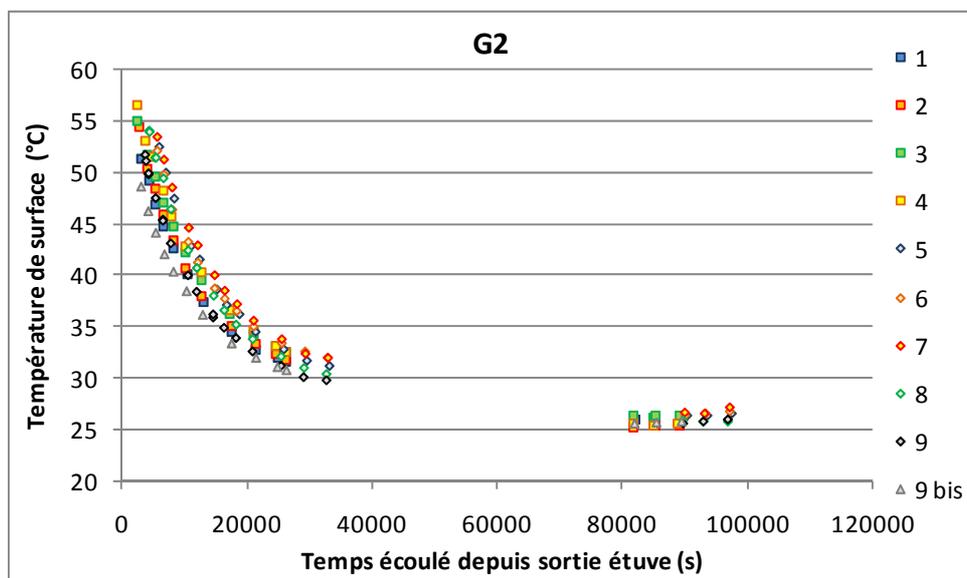
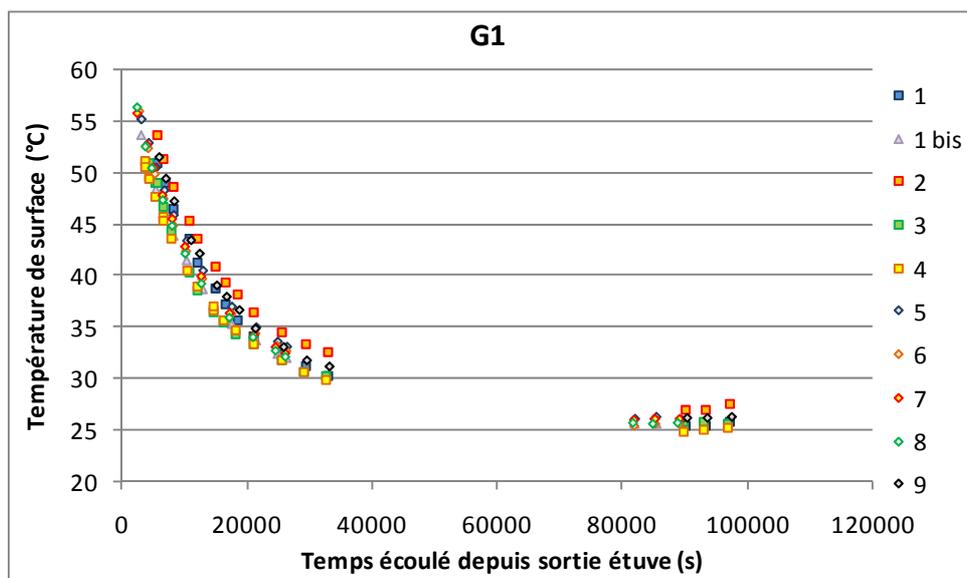
G3a	G2	G4
G5	G6	G1
G8	G7	G3

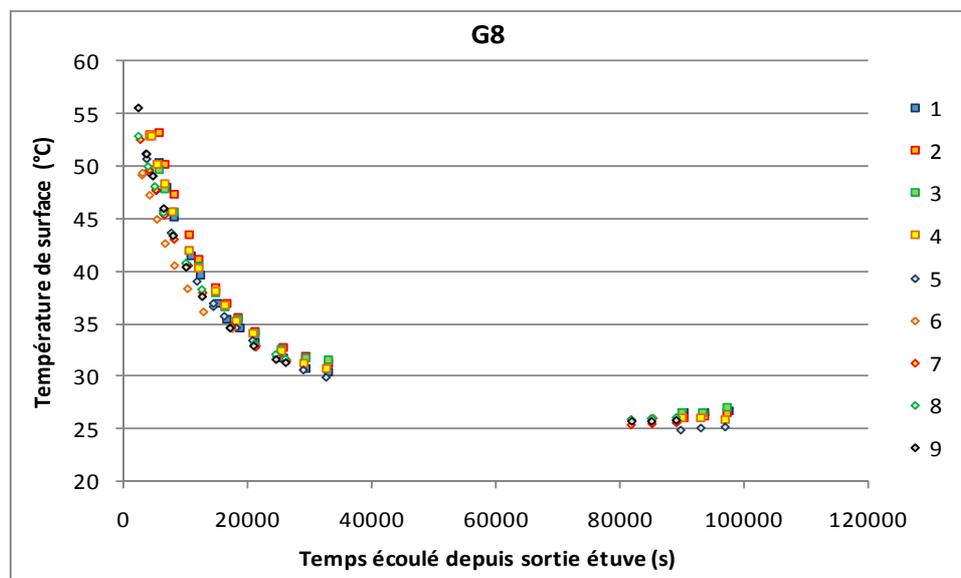
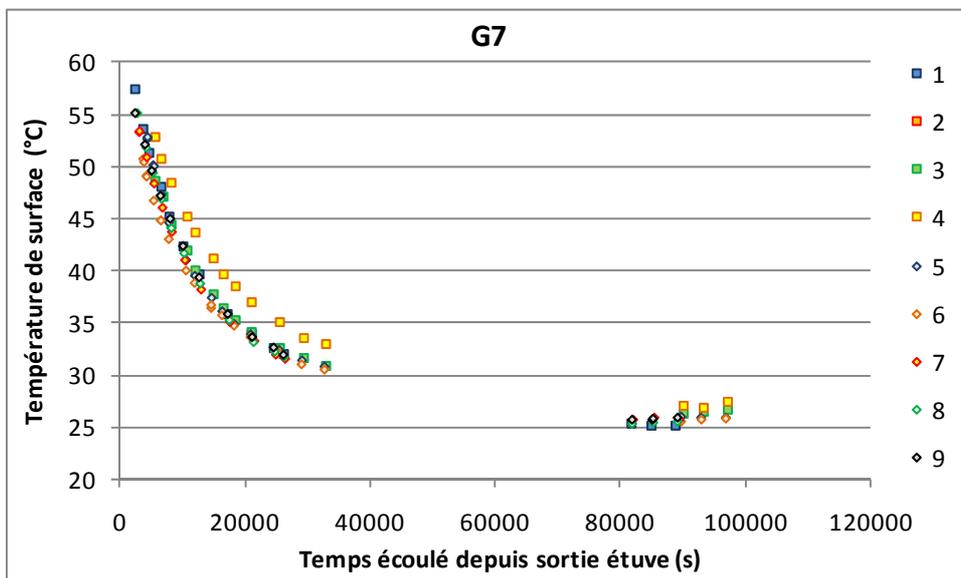
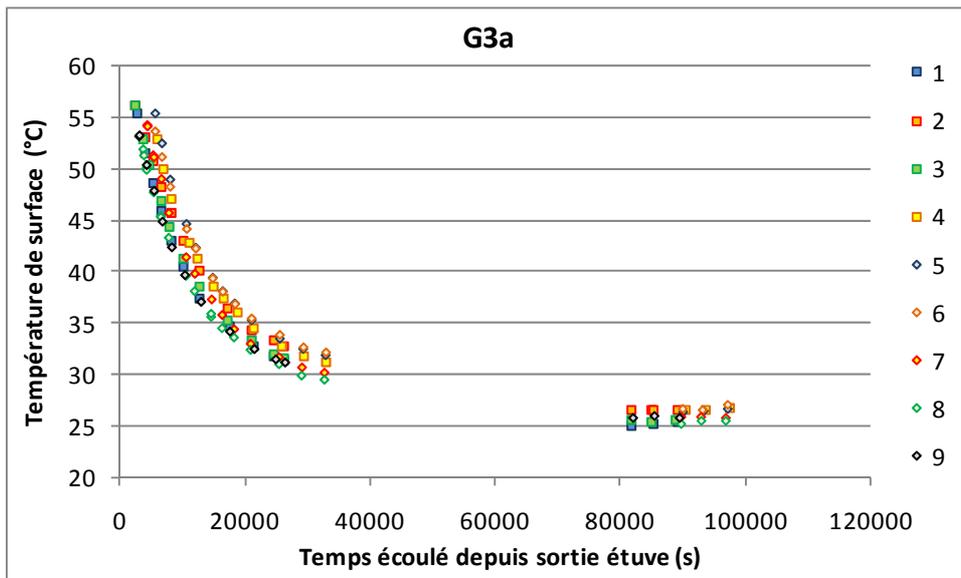
G2	G4	G5
G6	G1	G8
G7	G3	G3a

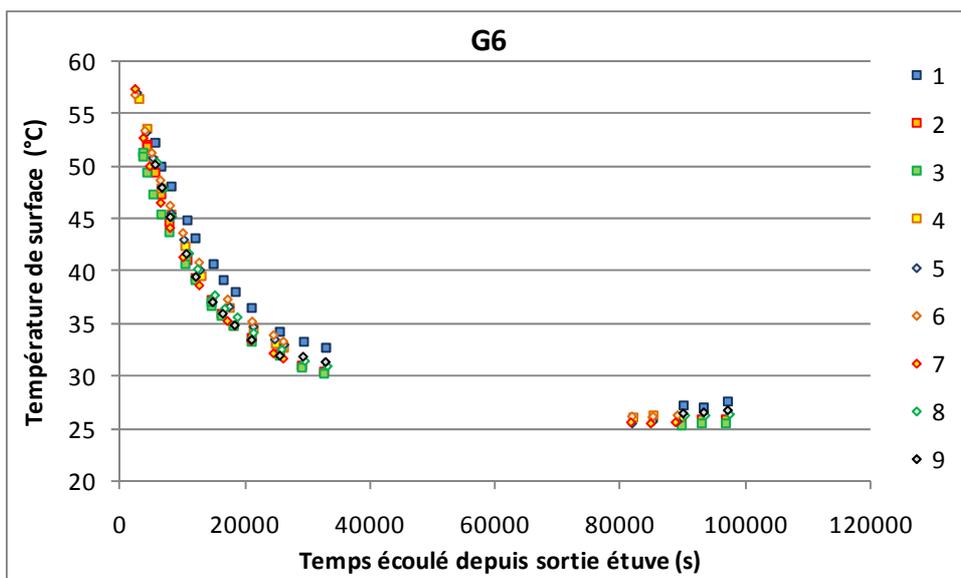
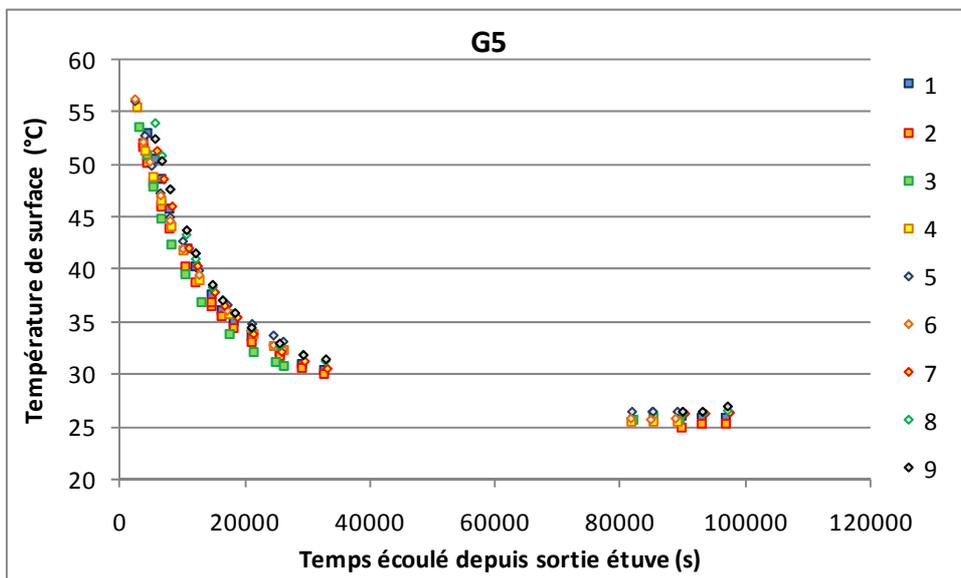
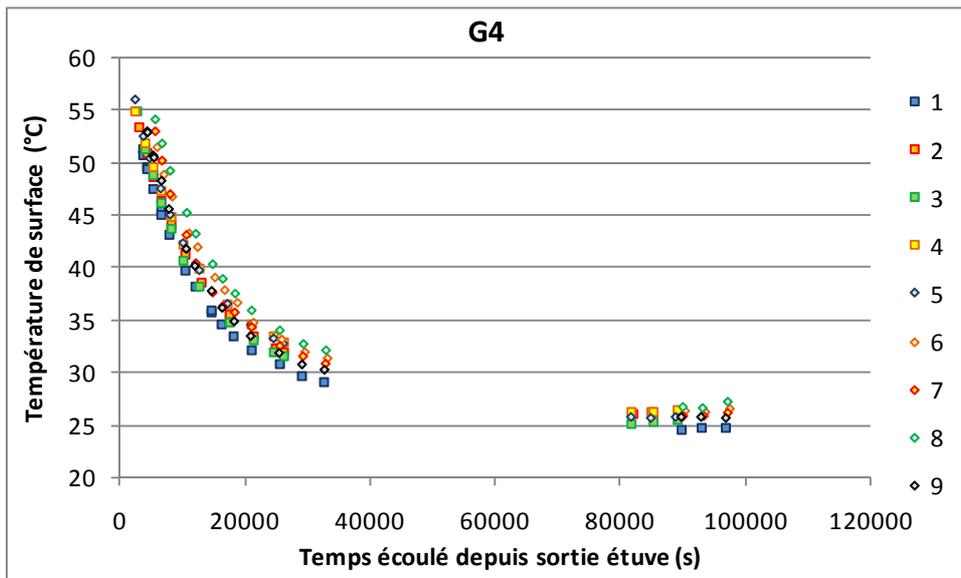
G4	G5	G6
G1	G8	G7
G3	G3a	G2

Bas

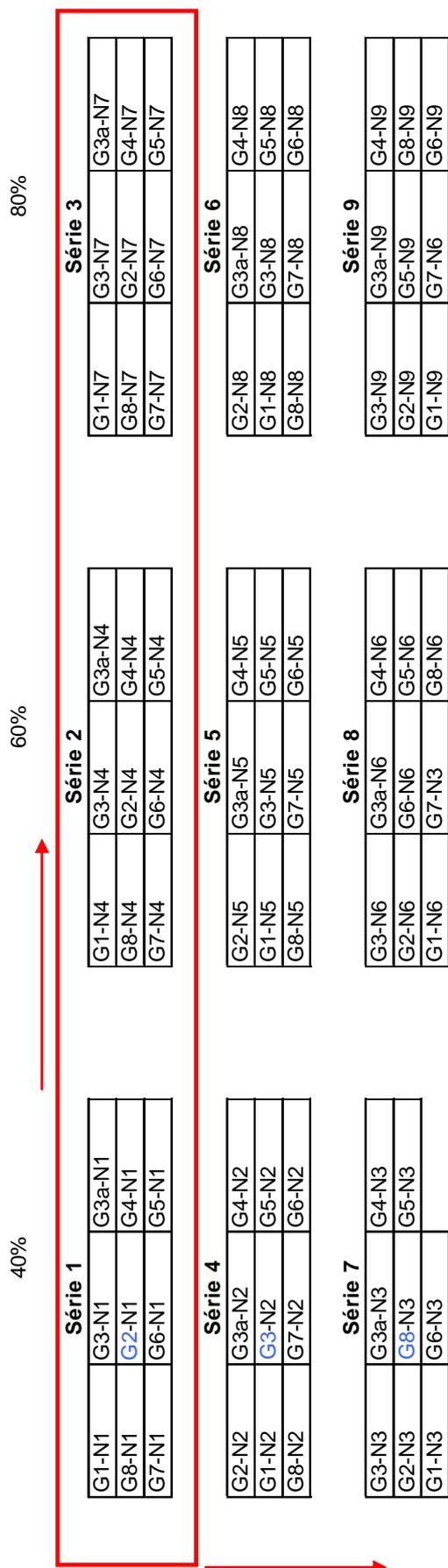
Annexe II. 2. Evolution des températures de surface des 90 dalles à l'état sec







Annexe II. 3. Organisation des séries de dalle pour la mesure de teneur en eau



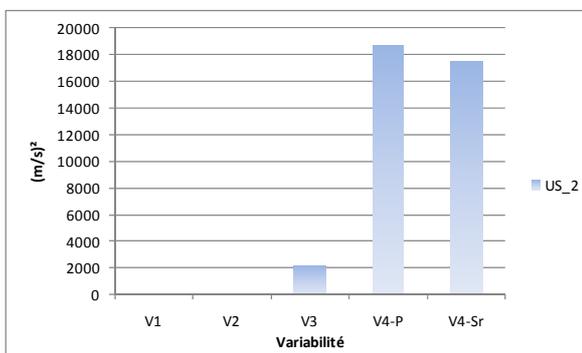
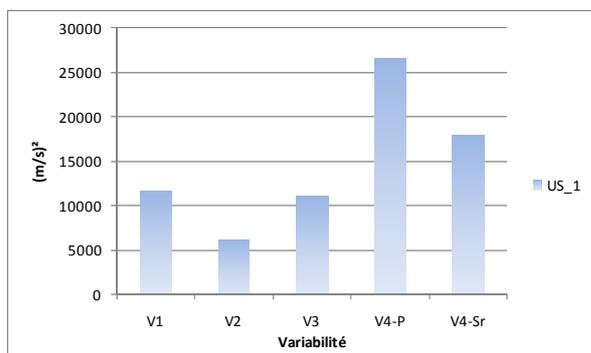
Annexe IV. 1. Liste des observables du projet SENSO

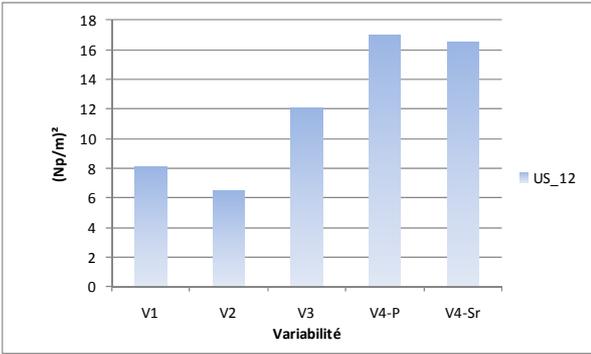
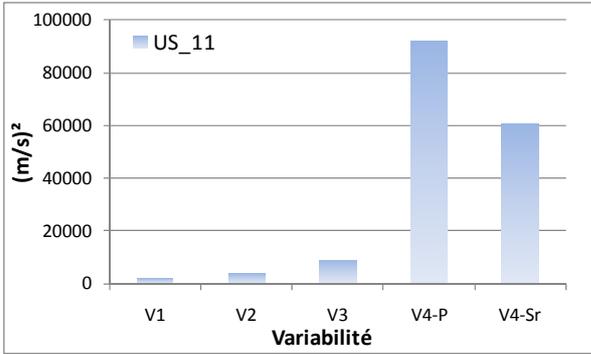
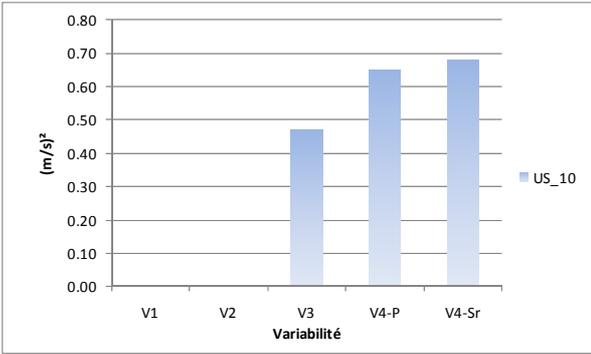
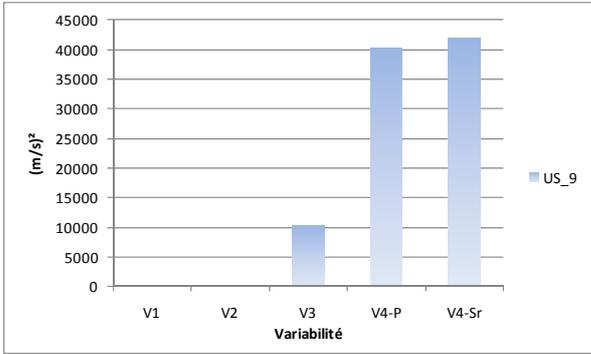
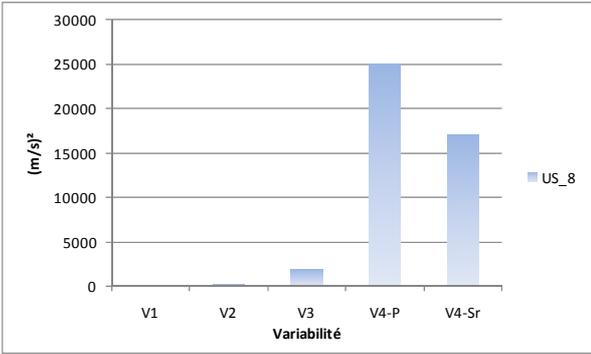
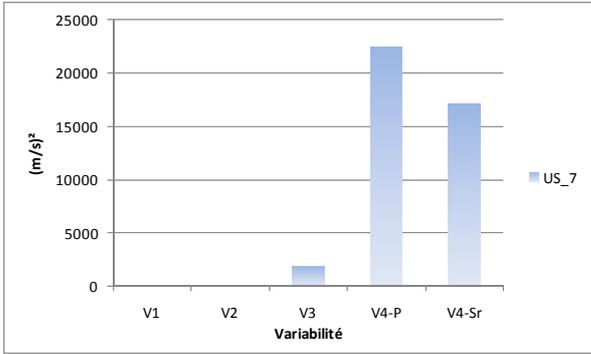
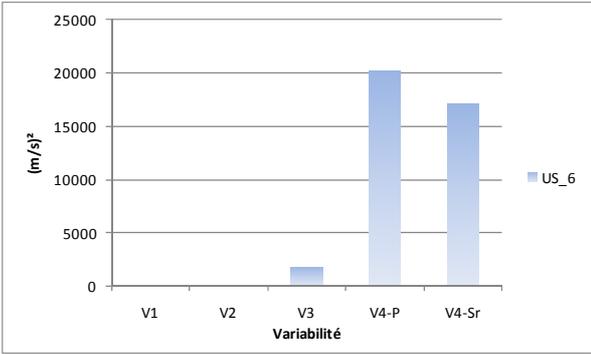
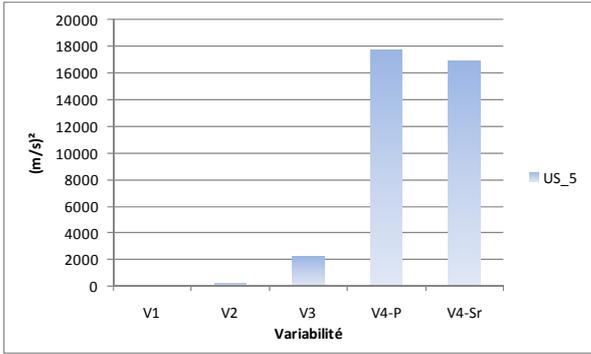
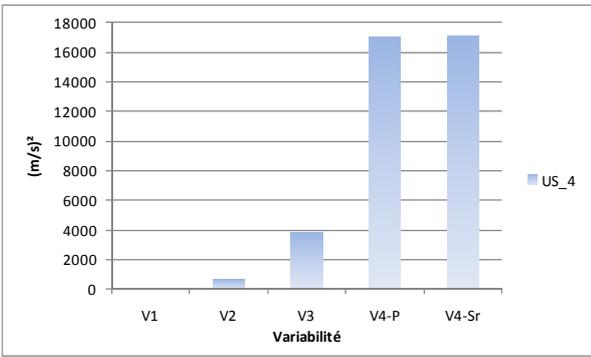
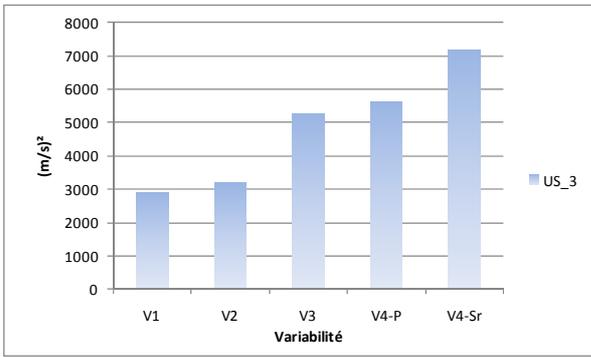
Technique	Labo	N°	Code	Observable
Ultrason	Lille	1	US 1	OS vitesse de groupe moyenne (m/s)
Ultrason	LCPC	2	US 1'	US vitesse apparente
Ultrason	Lille	3	US 2	OS vitesse de groupe - écart-type
Ultrason	LCPC	4	US 3a	vitesse 1 cm
Ultrason	LCPC	5	US 3b	vitesse 2 cm
Ultrason	LCPC	6	US 3c	vitesse 3 cm
Ultrason	LCPC	7	US 3d	vitesse 4 cm
Ultrason	LCPC	8	US 3e	vitesse 5 cm
Ultrason	Lille	9	US 4	vitesse longi transmission (ondes de compression) dans la longueur (m/s), 50 kHz
Ultrason	Lille	10	US 5	CV vitesse trans. (m/s), 50 kHz, OC
Ultrason	LCND	11	US 6	vitesse transmission épaisseur (m/s), 250 kHz, ondes de compression
Ultrason	LCND	12	US 7 a	atténuation ondes rétrodiffusées 1 MHz (Np/m)
Ultrason	LCND	13	US 7 b	atténuation ondes rétrodiffusées 2 MHz (Np/m)
Ultrason	LCND	14	US 7c	non linéaire
Ultrason	Lille	15	US 8	OS atténuation moyenne (dB/m)
Ultrason	Lille	16	US 9	OS atténuation, écart-type (dB/m)
Ultrason	Lille	17	US 11	facteur de qualité
Ultrason	LCPC	18	US 11'	Q apparent
Ultrason	LCPC	19	US 11 a	facteur qualité 1 cm
Ultrason	LCPC	20	US 11 b	facteur qualité 2 cm
Impact Echo	LCPC	21	IE 1 a	fréquence pic 1
Impact Echo	LCPC	22	IE 1 b	fréquence pic 2
Impact Echo	LCPC	23	IE 1 c	fréquence pic 3
Impact Echo	LCPC	24	IE 1 d	fréquence pic 4
Impact Echo	LCPC	25	IE 1 e	fréquence pic 5
CAPA	LCPC	26	Ca 1	capa grandes électrodes
CAPA	LCPC	27	Ca 2	capa moyennes électrodes
CAPA	LCPC	28	Ca 3	capa petites électrodes
Th Inf	CDGA	29	Th In 1	IR - temp (t1=1,645 h, gde mesure)
Th Inf	CDGA	30	Th In 2	IR - temp (t2=22,27 h, gde mesure)
Th Inf	CDGA	31	Th In 3	IR - temp (t1, pte mesure)
Th Inf	CDGA	32	Th In 4	IR - temp (t2, pte mesure)
Th Inf	CDGA	33	Th In 5	IR - pente grande mesure
Th Inf	CDGA	34	Th In 6	IR - pente petite mesure
Résistivité	CDGA	35	Re 1	résistivité quadripole 5 cm
Résistivité	CDGA	35*	Log Re 1	log de résistivité quadripole 5 cm
Résistivité	CDGA	36	Re 2	résistivité quadripole 10 cm
Résistivité	CDGA	36*	Log Re 2	log de résistivité quadripole 10 cm
Résistivité	CDGA	37	Re 4	anisotropie 5 cm
Résistivité	CDGA	38	Re 5	anisotropie 10 cm
Résistivité	CDGA	39	Re 6	contraste 5/10
Résistivité	LMDC	40	Re7	Wenner 5cm
Résistivité	LMDC	40*	Log Re7	Wenner 5cm
Radar	LMDC	41	Ra 1	amplitude pic pic
Radar	LMDC	42	Ra 4	fréquence centrale onde directe (GHz)
Radar	LMDC	43	Ra 5a	amplitude spectrale max OD
Radar	LMDC	44	Ra 5b	amplitude OD à 500 MHz
Radar	LMDC	45	Ra 5c	amplitude OD à 1000 MHz
Radar	LMDC	46	Ra 5d	amplitude OD à 2000 MHz
Radar	LMDC	47	Ra 6	vitesse radar onde directe (cm/s)
Radar	LCPC	48	Ra 6'	vitesse radar onde directe (cm/s)
Radar	LCPC	49	Ra 7a	temps d'arrivée, offset 7,0 cm
Radar	LCPC	50	Ra 7b	temps d'arrivée, offset 10,1 cm
Radar	LCPC	51	Ra 7c	temps d'arrivée, offset 13,2 cm
Radar	LCPC	52	Ra 7d	temps d'arrivée, offset 14,7 cm

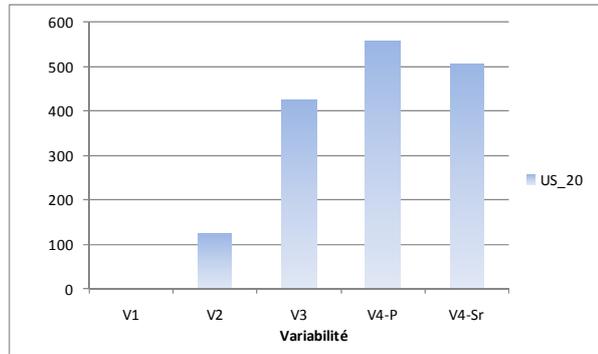
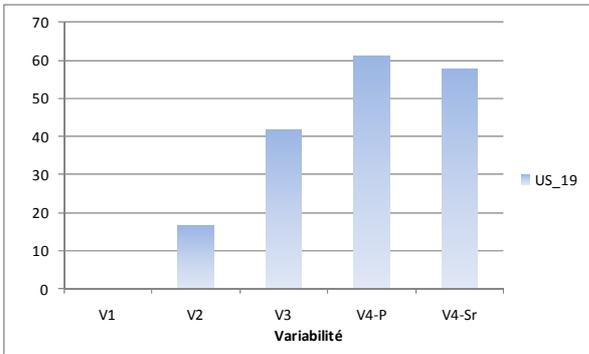
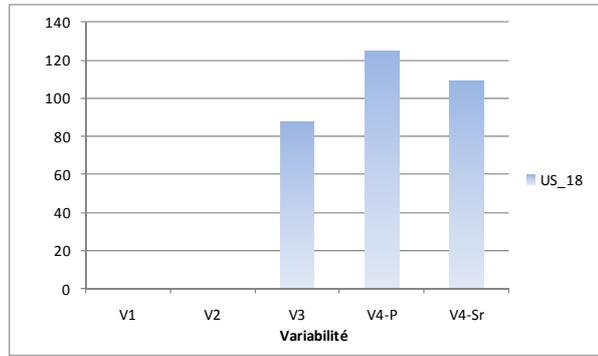
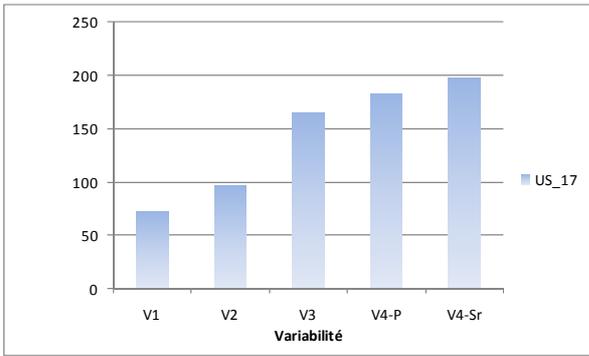
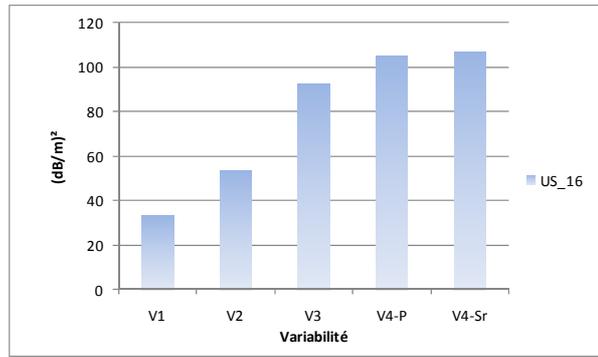
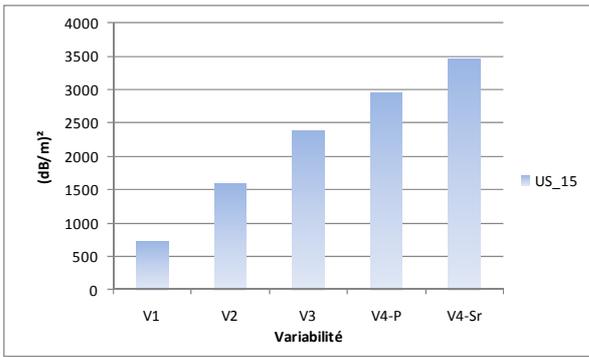
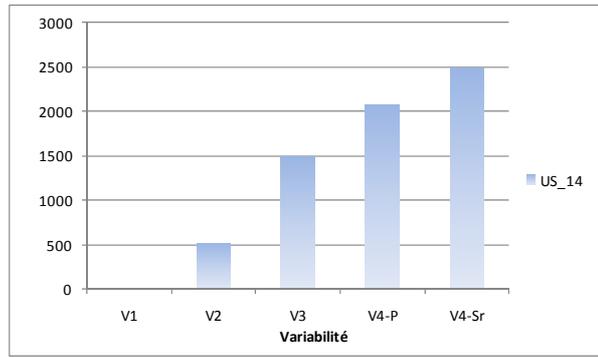
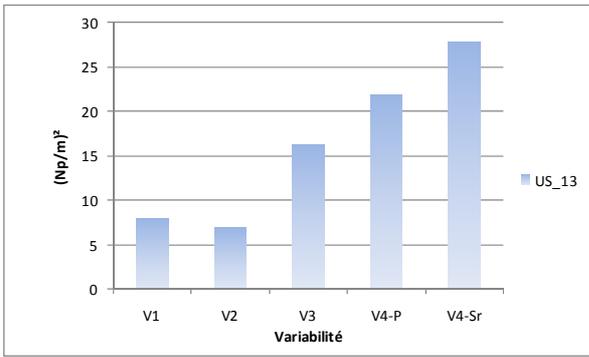
Annexe IV. 2. Histogrammes de variabilité des observables

Ultrasons

N° Observable	V1	V2	V3	V4-P	V4-Sr
1	11575	6196	11103	26548	17979
2			2213	18741	17514
3	2912	1391	5259	5629	7187
4		637	3876	16970	17070
5		292	2218	17661	16868
6		120	1788	20231	17152
7		116	1863	22454	17151
8		249	1871	25084	17104
9		10208	40325	41869	10208
10			4.70E-01	6.51E-01	6.79E-01
11	1726	3798	8879	91923	60522
12	8	6	12	17	16
13	8	7	16	22	28
14		523	1485	2078	2485
15	726	1582	2397	2953	3459
16	33	54	93	105	107
17	73	97	165	182	197
18			88	124	109
19		16	42	61	58
20		124	425	559	506

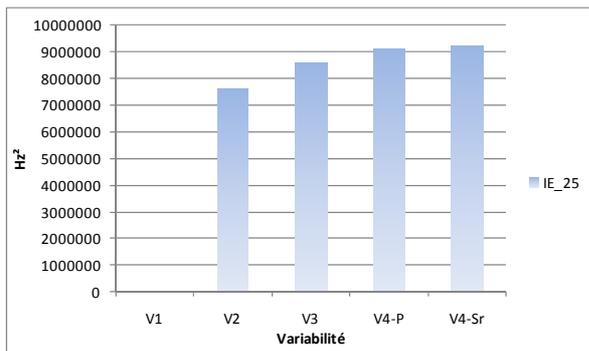
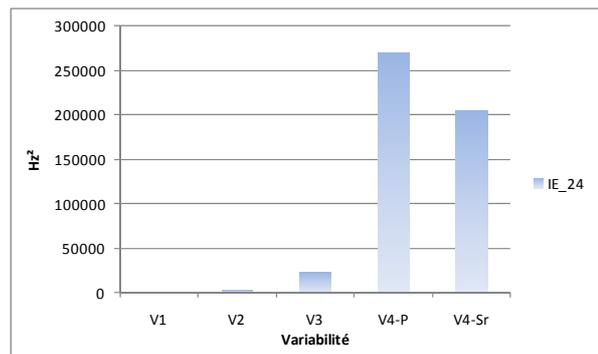
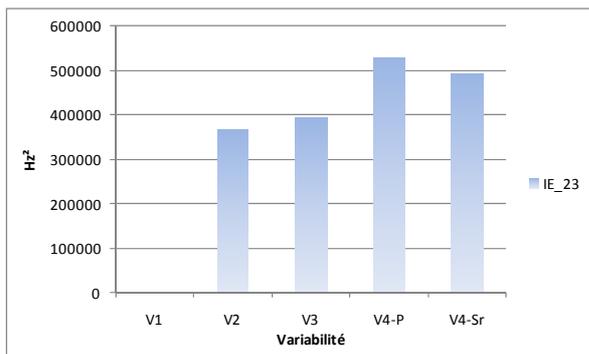
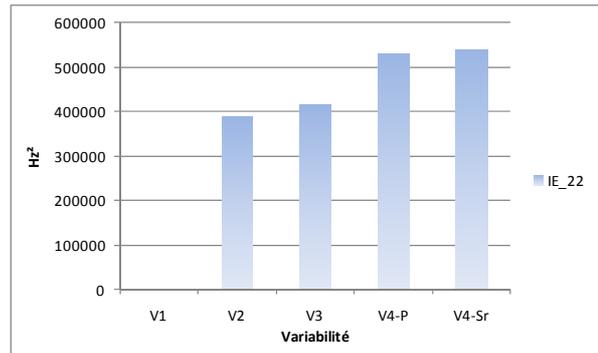
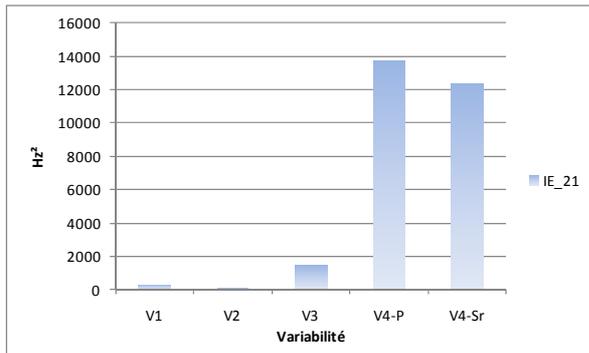






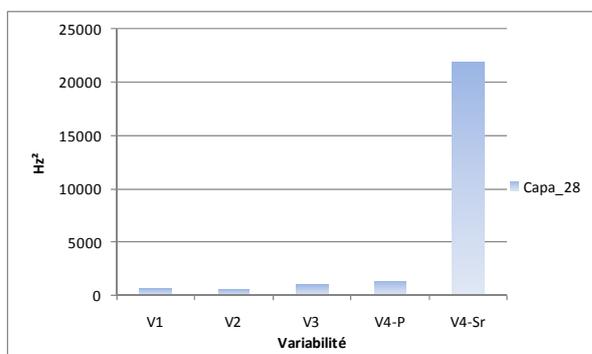
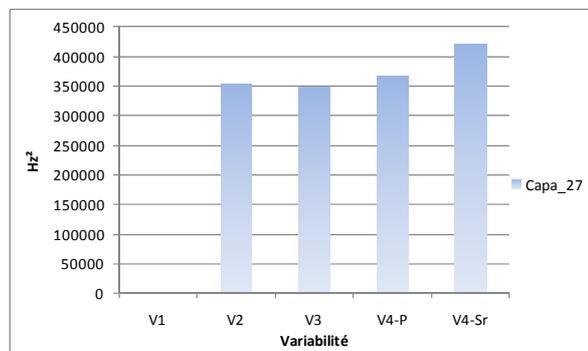
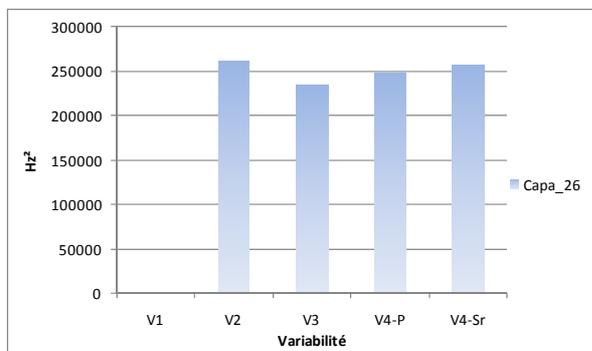
Impact-echo

N° Observable	V1	V2	V3	V4-P	V4-Sr
21	287	76	1445	13728	12299
22	0	387760	415843	532297	539651
23	0	365229	394433	527931	493943
24	1398	2295	22977	269461	205503
25	43371	7630724	8569867	9126383	9211530



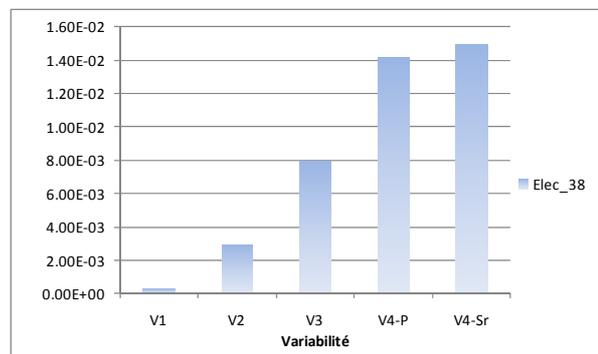
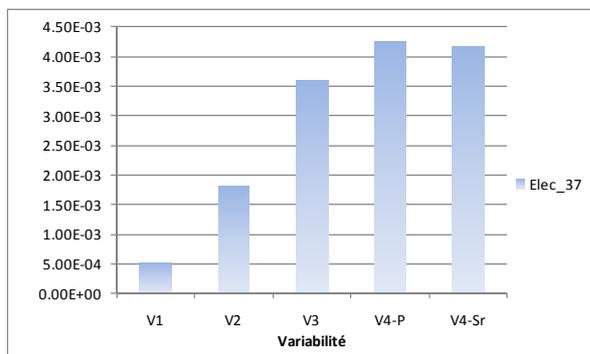
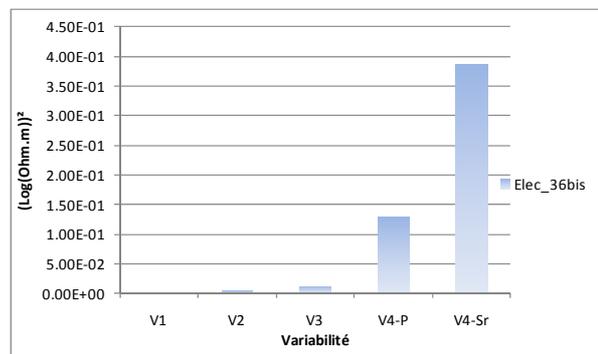
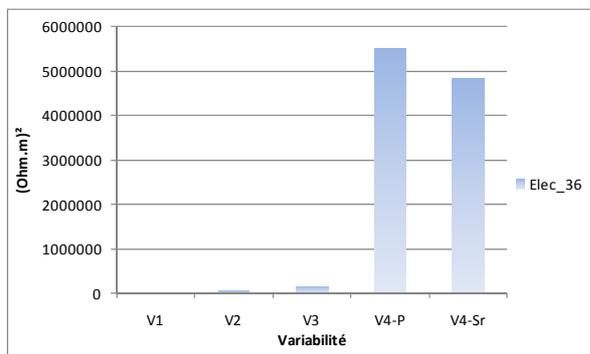
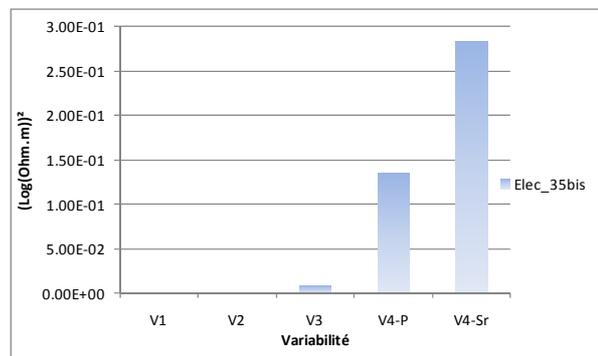
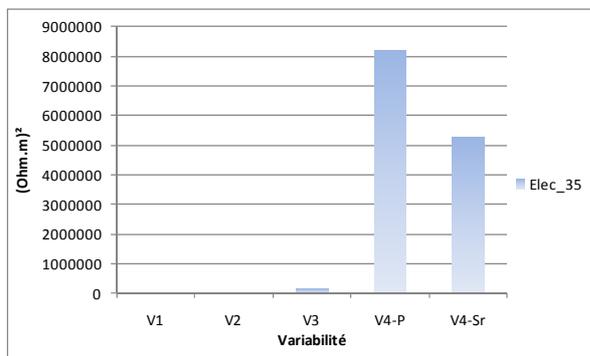
Capacimétrie

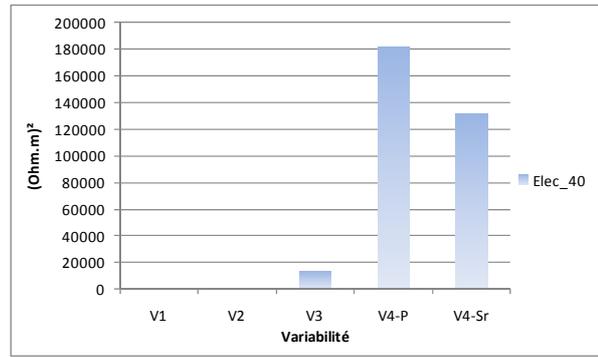
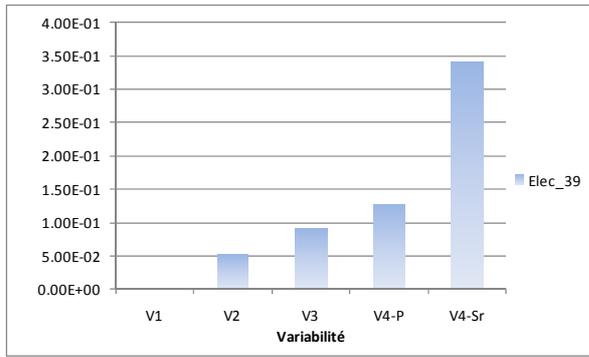
N° Observable	V1	V2	V3	V4-P	V4-Sr
26	7	261846	234090	247751	257706
27	68	353503	348939	368407	421184
28	687	517	1024	1356	21921



Résistivité électrique

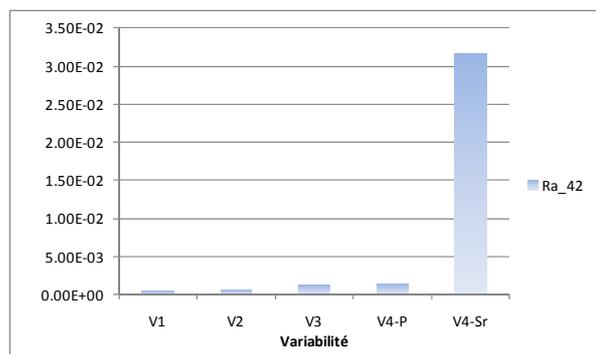
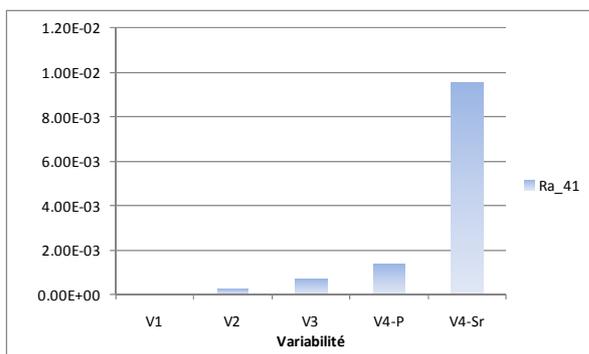
N° Observable	V1	V2	V3	V4-P	V4-Sr
35	158	49510	173066	8220191	5258654
35 bis	9.78E-05	1.04E-03	8.39E-03	1.35E-01	2.84E-01
36	230	53063	152682	5513854	4842177
36 bis	1.22E-04	2.61E-03	1.23E-02	1.30E-01	3.87E-01
37	5.06E-04	1.80E-03	3.59E-03	4.24E-03	4.18E-03
38	2.69E-04	2.88E-03	7.95E-03	1.41E-02	1.49E-02
39	1.19E-03	5.20E-02	9.16E-02	1.27E-01	3.41E-01
40	56	51	43481	181658	131155

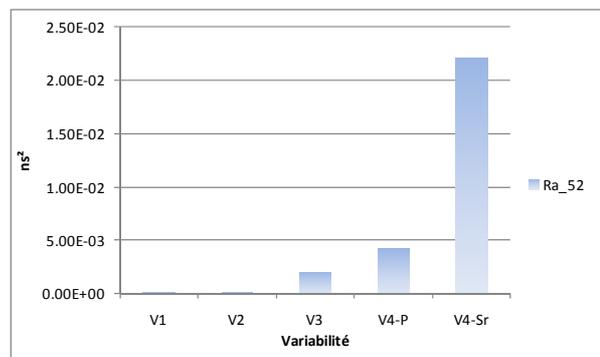
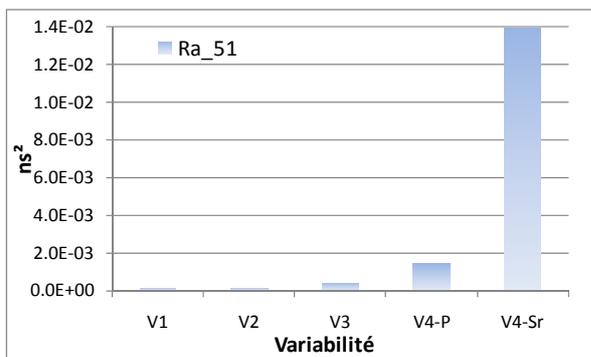
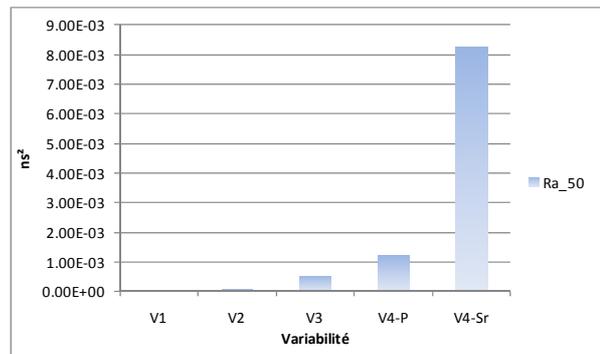
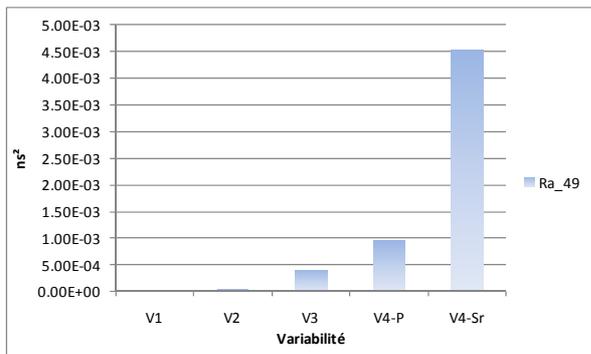
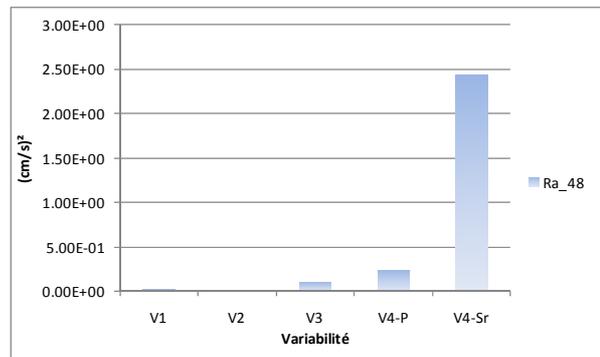
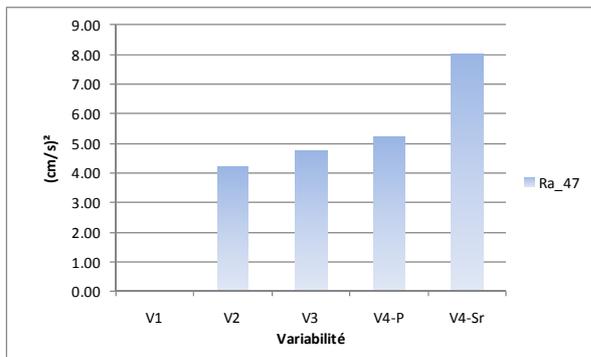
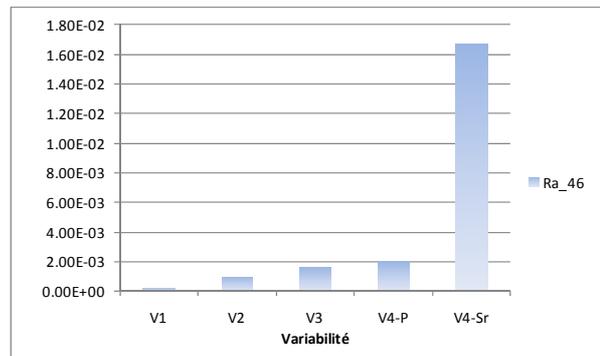
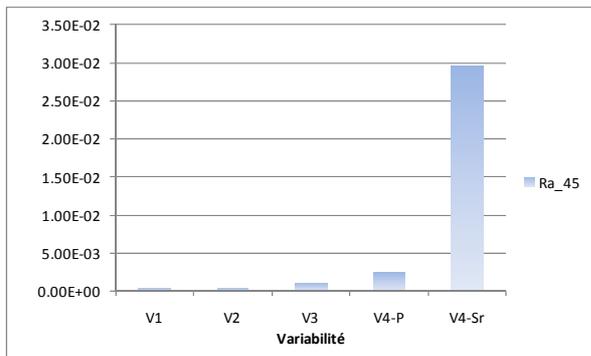
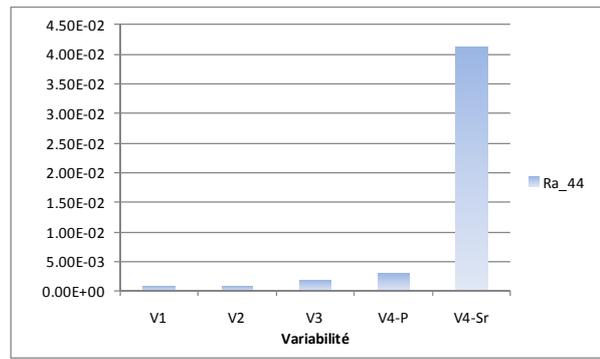
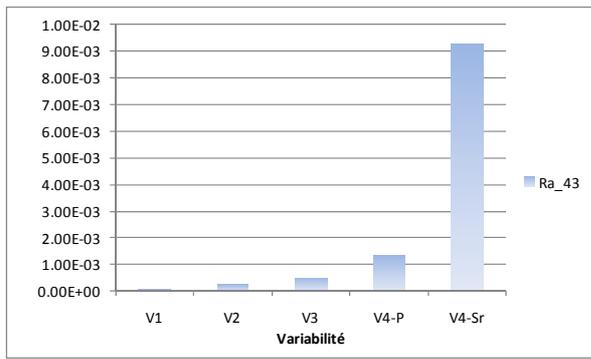




Radar

N° Observable	V1	V2	V3	V4-P	V4-Sr
41	5.25E-05	2.40E-04	6.72E-04	1.37E-03	9.54E-03
42	4.36E-04	5.49E-04	1.20E-03	1.36E-03	3.16E-02
43	6.50E-05	2.78E-04	5.11E-04	1.37E-03	9.25E-03
44	7.60E-04	7.51E-04	1.78E-03	3.02E-03	4.13E-02
45	3.68E-04	4.70E-04	1.00E-03	2.55E-03	2.95E-02
46	2.45E-04	9.70E-04	1.63E-03	2.00E-03	1.66E-02
47	0.02	4.23	4.77	5.19	8.02
48	2.01E-02	1.09E-03	1.04E-01	2.39E-01	2.43E+00
49		3.82E-05	4.02E-04	9.53E-04	4.54E-03
50	6.65E-06	8.78E-05	5.05E-04	1.24E-03	8.24E-03
51	1.64E-04	1.35E-04	4.15E-04	1.42E-03	1.39E-02
52	1.10E-05	1.42E-04	2.05E-03	4.14E-03	2.22E-02





CONTRIBUTION A L'EVALUATION DE LA DEGRADATION DU BETON : THERMOGRAPHIE INFRAROUGE ET COUPLAGE DE TECHNIQUES

Résumé : Ces travaux traitent de l'utilisation de la thermographie infrarouge dans le cadre du contrôle non destructif des ouvrages de génie civil.

Une première partie, traite de l'étude des paramètres influençant la mesure *in situ*, de la capacité de la technique à détecter la variation de propriétés intrinsèques au matériau, et de la détection de délaminations. Les résultats présentés sont issus de mesures expérimentales appuyées par une approche numérique aux éléments finis. Dans un premier temps, une étude sur la capacité de la thermographie infrarouge à détecter des variations de porosité ou de teneur en eau a été réalisée. Dans un second temps, des travaux sont menés sur la détermination des seuils de détection des délaminations en fonction des conditions d'exposition. Ils ont montré un seuil de détection correspondant à un rapport de 2, entre l'extension latérale du défaut et sa profondeur, pour un ensoleillement direct, et à un rapport de 3,3 pour un ouvrage soumis uniquement aux variations de température de l'air. La réalisation d'un suivi temporel combiné à l'étude de l'évolution des gradients temporels de température permet d'améliorer ces seuils de détection. Enfin, une étude originale sur le pontage présent au niveau des délaminations, a montré la prédominance de l'influence de celui-ci sur la profondeur des délaminations.

Une deuxième partie porte sur les travaux réalisés dans le cadre du projet ANR-SENSO. Ils traitent de la combinaison des résultats issus de différentes techniques de CND dans le cadre plus large de l'amélioration des diagnostics pour la gestion du patrimoine.

Mots-clés : contrôle non destructif, thermographie infrarouge, béton, propriétés thermiques, délamination, porosité, teneur en eau.

A CONTRIBUTION ON THE EVALUATION OF CONCRETE DEGRADATION: INFRARED THERMOGRAPHY AND COUPLING TECHNIQUE

Abstract: This thesis focuses on the use of infrared thermography as a tool for non destructive testing of buildings. Mainly, the application is on civil engineering projects.

The first part includes identifying the parameters that can affect this *in situ* technique. This particularly deals with the infrared thermography capacity to detect intrinsic property variations, and delamination detection. Combination of experiments on concrete slabs and numerical simulations are used. In a first step, a study on the capacity of thermography to detect porosity and water content variation was conducted. In a second step a study on the thresholds for detecting delaminations based on exposure conditions is carried out. As an outcome, the threshold that has been detected corresponds to a ratio of 2 between the lateral extension of the defect and its depth to direct sunlight; while a ratio of 3,3 if it is exposed to air temperature variations. This study suggests that a time monitoring combined with the study of the evolution of temporal temperature gradients can improve the detection limits. Finally, an original study showed the predominance of the influence of bridging on the depth of delamination.

The second part tackles the works carried out during the ANR project SENSO. Results from different non destructive tools were coupled for the purpose of improving diagnosis in the asset management.

Keywords: non destructive testing, infrared thermography, concrete, thermal properties, delamination, porosity, water content.