

THÈSE DE DOCTORAT EN COTUTELLE

Présentée à

L'UNIVERSITÉ
BORDEAUX 1
ÉCOLE DOCTORALE DES
SCIENCES PHYSIQUES ET DE
L'INGÉNIEUR

et

L'UNIVERSITÉ DE
SHERBROOKE
FACULTÉ DE GÉNIE -
DÉPARTEMENT DE GÉNIE
CIVIL

Par **M. Samuel NAAR**

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR
Spécialité : MÉCANIQUE

et

PHILOSOPHAE DOCTOR
(PhD)

ÉVALUATION NON DESTRUCTIVE DU BÉTON PAR MESURES DE RÉSISTIVITÉ ÉLECTRIQUE ET THERMOGRAPHIE INFRAROUGE PASSIVE

Soutenue le 17 mai 2006

Devant la commission d'examen formée de :

M. François BUYLE-BODIN (Professeur, Université de Lille 1)
M. Jean-Paul BALAYSSAC (Maître de conférences, Université Toulouse III)
M. Jean-Louis GALLIAS (Professeur, Université de Cergy-Pontoise)
M. Denys BREYSSE (Professeur, Université Bordeaux 1)
Mme Colette SIRIEIX (Maître de conférences, Université Bordeaux 1)
M. Gérard BALLIVY (Professeur, Université de Sherbrooke)
Mme Joëlle RISS (Professeur, Université Bordeaux 1)
M. Patrice RIVARD (Professeur adjoint, Université de Sherbrooke)

Président
Rapporteur
Rapporteur
Co-directeur
Co-directrice
Co-directeur
Examinatrice
Examineur

M. Jean-François LATASTE (Maître de conférences, Université Bordeaux 1)

Invité

Remerciements

Je tiens en premier lieu à remercier très chaleureusement mes directeurs de thèse. Grâce à eux, ces trois années resteront une passionnante aventure scientifique et humaine :

- monsieur Denys BREYSSE et madame Colette SIRIEIX, de l'Université Bordeaux 1 en France. Je les remercie de m'avoir proposé un sujet de recherche aussi riche et passionnant. Tout au long de ces trois années de thèse, ils ont su me guider et m'encourager ;
- monsieur Gérard BALLIVY et Jamal RHAZI, de l'Université de Sherbrooke au Canada. Je les remercie sincèrement de m'avoir fait bénéficier de leurs compétences, et de m'avoir accueilli au sein du Groupe de Recherche en Auscultation et en Instrumentation.

Je remercie également madame Joëlle RISS pour m'avoir accueilli au sein du Centre de Développement des Géosciences Appliquées où j'ai passé une grande partie de mon temps pendant ces trois années de thèse ; et pour m'avoir permis de poursuivre une année supplémentaire en tant qu'Attaché Temporaire d'Enseignement et de Recherche ; et pour avoir accepté de participer à mon jury de thèse.

A monsieur François BUYLE-BODIN qui a accepté d'être membre du jury de thèse. Il m'a fait l'honneur de présider mon jury. Je lui exprime ma sincère reconnaissance.

Monsieur Jean-Paul BALAYSSAC et monsieur Jean-Louis GALLIAS ont accepté de rapporter ce travail, d'en faire une lecture critique et d'apporter des remarques constructives. Qu'ils trouvent ici l'expression de mon profond respect et de toute ma gratitude.

J'adresse toute mon estime à monsieur Patrice RIVARD qui m'a fait la joie de participer à mon jury de thèse. Ses conseils avisés m'ont été d'une grande aide. Je le remercie tout particulièrement de m'avoir réservé un accueil si chaleureux au Québec et de m'avoir fait découvrir cette « maudite » Province du Canada.

Monsieur Jean-François LATASTE est à l'origine de ces travaux de recherche. Je lui témoigne ici toute ma sympathie, et le remercie vivement pour sa disponibilité, son enthousiasme, ses connaissances, et pour l'aide précieuse qu'il m'a apporté à travers nos multiples discussions. Je le remercie très amicalement d'avoir accepté d'être LE membre invité de mon jury de thèse.

Cette étude n'aurait pu être menée à bien sans la collaboration de Danick CHARBONNEAU et Michel DUPRAT. Je tiens à les remercier ici très amicalement.

Un grand merci à tous les membres du Centre de Développement des Géosciences Appliquées de Bordeaux et du Groupe de Recherche en Auscultation et en Instrumentation de Sherbrooke : les enseignants, le personnel technique et administratif. Et notamment : Marie-Charlotte, Clermont, Jacqueline, Josée, Nicole, Sylvie et Mohamed. Et à tous les doctorants de

ces deux laboratoires qui ont contribué à l'ambiance chaleureuse de ces trois années. J'ai réellement apprécié tous les moments passés avec vous.

J'adresse mes affectueux remerciements à toutes celles et tous ceux qui m'ont toujours soutenu (ou subi, hi) tout au long des ces dernières années : à la fac, sur un terrain de sport, à vélo, à l'apéro...

A commencer par les bordelais dont la compagnie quotidienne n'est pas de tout repos, mais avec qui le moral reste toujours au beau fixe : Aymeric, Baptiste, Ben, Carote, Cécile, Elisio, Fab le palois, Jéjé et Gwen, Julien, Lolo et Véro, Martin, Matt, Mohsen, Nath, Nico, Pat, Rana, Sophie, Tonio et Poupeline, Vince et Cissou, Xav'...

Aux rennais ou ex-rennais, avec qui j'ai partagé de bons moments : Alan, Ben et Chrys, Cat, Delphine et Alex', Erwan, Flo, Julie et Yo, Mirette...

A tous les québécois que j'ai pu côtoyer dans la « maison bleue » : François, Gab, Izza, Nic, Phil, et tout particulièrement à toi JN et à tes parents... Que notre amitié perdure.

A toute la famille Lafargue : André, Dude, Jo, Maïa et Lisa. J'ai passé des moments inoubliables en votre compagnie.

Et aux Amis : Ash, Aurélien, Bixento, Cédric, ma chum Céline, Erwan et Fred, Florian, Katia, Luc, Mehdi...

Je termine en remerciant toute ma famille : mes parents, Léon et Cathy, mon petit frère, Jim, et ma petite sœur, Lisou. Je les remercie pour leur soutien quotidien, leur confiance aveugle et pour tous les moyens qu'ils ont mis en œuvre pour que je puisse aller le plus loin possible. Je les embrasse fortement et leur dédie ce manuscrit en gage de gratitude et de reconnaissance. Et à mes grands-parents...

Un grand remerciement à Edouard et Mauricette, et à JB.

A l'Avenir...

Préambule

Le travail de recherche présenté dans ce mémoire a trait à l'auscultation non destructive des ouvrages en béton par mesures de résistivité électrique et par thermographie infrarouge passive. Il s'est déroulé en cotutelle entre deux universités dans le cadre d'une collaboration franco-québécoise. En France, le suivi a été assuré par Monsieur Denys BREYSSE, Professeur, et Madame Colette SIRIEIX, Maître de Conférences, du **Centre de Développement des Géosciences Appliquées** (CDGA) de l'Université Bordeaux 1. Au Canada, ce travail a été encadré par Monsieur Gérard BALLIVY, Professeur titulaire, Monsieur Patrice RIVARD, Professeur adjoint, et Monsieur Jamal RHAZI, Professeur associé, du **Groupe de Recherche en Auscultation et en Instrumentation** (GRAI) de l'Université de Sherbrooke (Québec). Le travail de doctorat a été par conséquent partagé entre les deux établissements d'accueil et financé par les deux laboratoires.

En France, il s'est articulé autour du projet national de recherche sur l'« **Évaluation de la dégradation du béton d'enrobage et aide au diagnostic et à la réparation des ouvrages** », soutenu par le Réseau Génie Civil et Urbain (RGC&U, Ministère de la Recherche et Ministère de l'Équipement). Il a été piloté par Madame Ginette ARLIGUIE, Professeur au Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions - LMDC - (INSA - Université Paul Sabatier - Toulouse). Démarré en 2002 pour une durée de 36 mois, ce projet a impliqué une dizaine de partenaires : le Laboratoire d'Étude et de Recherche sur les Matériaux (LERM, Arles), la SOVEP, l'Office National d'Études et Recherches Aérospatiales (ONERA, Toulouse), le Centre de Développement des Géosciences Appliquées (CDGA, Université Bordeaux 1), le Laboratoire de Mécanique de Lille, l'École Centrale de Lille (groupe électronique-acoustique), le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC, Nantes), le Service d'Études Techniques des Routes et Autoroutes (SETRA) et le Centre d'Études Techniques de l'Équipement (CETE Sud-Ouest). Aujourd'hui terminé, il trouve une suite dans le projet SENSO « Stratégie d'Évaluation Non destructive pour la Surveillance des Ouvrages en béton », soutenu par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR), qui a débuté en janvier 2006 pour une durée de 36 mois.

Au Canada, ce travail s'inscrit dans le cadre de La Chaire industrielle du Conseil de Recherche en Sciences Naturelles et en Génie du Canada (CRSNG) sur l'« **Auscultation des structures de béton** » créée le 1^{er} septembre 2001 au Département de génie civil de la Faculté de génie de l'Université de Sherbrooke et attribuée à Monsieur Gérard BALLIVY. L'Université est associée au Centre d'Expertise et de Recherche en Infrastructures Urbaines (CERIU, Montréal), au Ministère des Transports du Québec, à Hydro-Québec, à GéoLab Inc., au groupe SM International, à la Corporation de gestion de la voie maritime du Saint-Laurent, à Advitam Solution, à Janin Atlas, à Andec, à Roctest Ltée et à Géophysique GPR International.

La thèse en cotutelle a permis de rapprocher les visions françaises et québécoises dans le domaine de l'auscultation, d'exploiter la complémentarité des compétences entre les deux équipes d'accueil, toutes les deux déjà fortement impliquées au niveau national, et de vérifier la pertinence des différentes approches proposées.

Les différentes mesures décrites dans ce mémoire (sur corps d'épreuves ou campagne de mesures in situ) ont été réalisées dans le cadre de ces deux actions nationales.

Table des matières

TABLE DES MATIERES	I
TABLE DES ILLUSTRATIONS.....	VII
TABLE DES TABLEAUX	XI
INTRODUCTION GENERALE.....	1
PREMIERE PARTIE : REVUE DES CONNAISSANCES	5
CHAPITRE 1 : L'AUSCULTATION DES STRUCTURES EN BETON	7
1.1 AUSCULTATION, ÉVALUATION ET DIAGNOSTIC.....	7
1.1.1. Définition des termes.....	7
1.1.2. Pourquoi ausculter, évaluer ou poser un diagnostic ?.....	8
1.1.3. Les exigences des maîtres d'ouvrages.....	9
1.1.4. Le contrôle destructif et ses limites	10
1.1.4.1. Représentativité de l'information recueillie.....	10
1.1.4.2. Étendue spatiale de l'information recueillie.....	10
1.1.4.3. Accessibilité et sensibilité de l'ouvrage.....	10
1.1.4.4. Aspect économique.....	11
1.2 L'ÉVALUATION NON DESTRUCTIVE (END).....	11
1.2.1. Intérêt des techniques d'END.....	11
1.2.2. Utilisation possible de l'END.....	11
1.2.3. Les méthodes d'END à disposition	12
1.2.3.1. Les inspections visuelles.....	12
1.2.3.2. Les méthodes acoustiques : soniques et ultrasoniques.....	13
1.2.3.3. Les méthodes électromagnétiques.....	13
1.2.3.4. Les méthodes électriques : résistivité, potentiel et vitesse de corrosion.....	13
1.2.3.5. Les méthodes thermiques.....	13
1.2.3.6. Les méthodes radiographiques.....	14
1.2.3.7. Les méthodes optiques.....	14
1.2.3.8. Bilan.....	14
1.2.4. Choix d'une méthode.....	14
1.3 CONCLUSION.....	15
1.4 JUSTIFICATION DE LA DÉMARCHE.....	17
CHAPITRE 2 : LA RESISTIVITE ELECTRIQUE DU BETON	21
2.1 LE MATÉRIAU BÉTON ET LA MESURE DE RÉSISTIVITÉ.....	21
2.1.1. Définition de la résistivité électrique d'un matériau.....	21
2.1.2. Mécanismes de conduction du courant électrique dans les matériaux.....	22
2.1.2.1. La conduction électronique.....	22
2.1.2.2. La conduction électrolytique.....	22
2.1.2.3. la conduction diélectrique.....	23
2.1.3. Mécanismes de conduction du courant électrique dans le béton.....	23
2.1.4. Gamme de résistivité électrique.....	24
2.1.5. Théories de la résistivité.....	25
2.1.5.1. Théorie des matériaux multiphasés.....	25
2.1.5.2. Théorie du facteur de formation.....	26
2.2 LA MESURE DE RÉSISTIVITÉ EN GÉNIE CIVIL.....	27
2.2.1. Les différentes techniques de mesure.....	27
2.2.1.1. Mesures en laboratoire.....	27

2.2.1.2. Mesures sur site	29
2.2.2. Mesures de résistivité électrique sur site	30
2.2.2.1. En géophysique	30
2.2.2.2. Principe général.....	31
2.2.2.3. Notion de résistivité apparente	32
2.2.2.4. Notion de profondeur d'investigation	32
2.2.2.5. Principe de superposition	34
2.2.2.6. Principe de réciprocité.....	34
2.2.2.7. Dispositifs utilisés sur site.....	34
2.2.3. Le dispositif utilisé : le quadripôle carré	36
2.2.3.1. Avantages.....	37
2.2.3.2. Protocole de mesure	39
2.2.3.3. Exploitation des mesures	40
2.3 CONCLUSION.....	40
CHAPITRE 3 : LES PROPRIÉTÉS THERMIQUES DU BÉTON	43
3.1 LES MÉCANISMES DE TRANSMISSION DE LA CHALEUR	43
3.1.1. Notion de température et de flux thermique	43
3.1.2. La conduction	44
3.1.2.1. Définition	44
3.1.2.2. Équation de Fourier.....	44
3.1.3. La convection	45
3.1.3.1. Définition	45
3.1.3.2. Loi de Newton	45
3.1.4. Le rayonnement	45
3.1.4.1. Définition	45
3.1.4.2. Le spectre électromagnétique	46
3.1.4.3. Propriétés fondamentales du corps noir.....	46
3.1.4.4. La loi fondamentale de Stefan-Boltzmann	46
3.1.4.5. Les corps communs	47
3.1.4.6. Émissivité.....	48
3.1.4.7. Le rôle de l'atmosphère	49
3.1.5. Bilan	50
3.2 LES PROPRIÉTÉS THERMIQUES DU BÉTON.....	50
3.2.1. La conductivité thermique	50
3.2.2. La chaleur spécifique	50
3.2.3. La diffusivité thermique	50
3.2.4. L'effusivité	51
3.2.5. L'inertie thermique	51
3.2.6. Bilan	52
3.3 LA THERMOGRAPHIE INFRAROUGE.....	52
3.3.1. La thermographie infrarouge active.....	52
3.3.2. La thermographie infrarouge passive	53
3.3.2.1. La méthode.....	53
3.3.2.2. Grandeurs mesurées	54
3.3.2.3. Détection d'une anomalie	55
3.3.3. Avantages et limites.....	56
3.3.3.1. Avantages.....	56
3.3.3.2. Limites.....	58
3.3.3.3. Applications	60
3.4 SYNTHÈSE	60
CHAPITRE 4 : LES FACTEURS INFLUENÇANT LES PROPRIÉTÉS ELECTRIQUES ET THERMIQUES DU BÉTON.....	63
4.1 INFLUENCE DES PARAMÈTRES PROPRES AU BÉTON	63
4.1.1. Le ciment	63
4.1.1.1. En électrique	64
4.1.1.2. En thermique.....	64
4.1.2. Les granulats.....	65

4.1.2.1. En électrique	65
4.1.2.2. En thermique	66
4.1.3. Le rapport E/C	67
4.1.3.1. En électrique	68
4.1.3.2. En thermique	68
4.1.4. La porosité	69
4.1.4.1. En électrique	69
4.1.4.2. En thermique	70
4.1.5. Le degré de saturation	71
4.1.6. Les ions chlorures	71
4.1.6.1. En électrique	71
4.1.6.2. En thermique	71
4.1.6.3. Étude expérimentale	71
4.2 AJOUTS DANS LE BÉTON	75
4.2.1. Cendres volantes	75
4.2.1.1. En électrique	75
4.2.1.2. En thermique	75
4.2.2. Fumée de silice	75
4.2.2.1. En électrique	76
4.2.2.2. En thermique	76
4.2.2.3. Étude expérimentale	76
4.2.3. Fibres	78
4.2.3.1. En électrique	78
4.2.3.2. Étude expérimentale	78
4.3 INFLUENCE DES FACTEURS EXTÉRIEURS	83
4.3.1. Humidité de surface	84
4.3.1.1. En électrique	84
4.3.1.2. En thermique	84
4.3.1.3. Modélisation de l'effet d'une couche saturée sur les mesures de résistivité électrique	84
4.3.2. Température	90
4.3.2.1. En électrique	90
4.3.2.2. En thermique	93
4.4 INFLUENCE DE LA STRUCTURE	94
4.4.1. Effet de bord sur la mesure électrique	94
4.4.2. Effet de fond sur la mesure électrique	95
4.4.3. Effet des armatures sur la mesure électrique	98
4.5 INFLUENCE DES ALTÉRATIONS DU BÉTON	98
4.5.1. Généralités	98
4.5.2. La carbonatation	99
4.5.2.1. Définition	99
4.5.2.2. La carbonatation et la mesure électrique	100
4.5.2.3. Modélisation de l'effet d'une couche carbonatée sur les mesures de résistivité électrique	101
4.5.3. La réaction alcalis-granulats	103
4.5.4. La fissuration et la délamination	103
4.6 SYNTHÈSE	103
CHAPITRE 5 : LE COUPLAGE DE METHODES D'END	107
5.1 UTILISATION DE PLUSIEURS MÉTHODES D'END	108
5.2 LE COUPLAGE	110
5.2.1. Définition	110
5.2.2. Objectifs	110
5.2.3. Analyse des différentes possibilités de couplage	111
5.3 CHOIX DES MÉTHODES D'END	114
5.3.1. Motivation pour le choix de la mesure de résistivité électrique	114
5.3.1.1. Expérience acquise	114
5.3.1.2. Nature de la conduction électrique et influence des altérations du béton sur les propriétés électriques	114
5.3.2. Motivation pour le choix de la thermographie infrarouge passive	114
5.3.2.1. Expérience acquise	114

5.3.2.2. Nature de la conduction thermique et influence des altérations du béton sur les propriétés thermiques.....	115
5.3.3. Complémentarité des deux méthodes choisies	115
5.4 CONCLUSION.....	116
DEUXIEME PARTIE : RESULTATS EXPERIMENTAUX	119
CHAPITRE 6 : EVALUATION DES CONDITIONS HYDRIQUES DANS LE BETON.....	121
6.1 INTRODUCTION	121
6.1.1.1. Définition	121
6.1.1.2. En électrique	122
6.1.1.3. En thermique.....	124
6.1.1.4. Autre méthode utilisée pour évaluer l'humidité.....	124
6.2 ÉTABLISSEMENT DES PARAMÈTRES DE LA FORMULE D'ARCHIE DANS LE CAS DES BÉTONS ..	126
6.2.1. Introduction	126
6.2.2. Corps d'épreuve à porosité variable	127
6.2.2.1. Description des corps d'épreuve.....	127
6.2.2.2. Résultats des mesures électriques.....	128
6.2.3. Corps d'épreuve à degré de saturation variable.....	129
6.2.3.1. Description des corps d'épreuve.....	129
6.2.3.2. Résultats des mesures électriques.....	130
6.2.4. Discussion.....	131
6.2.5. Conclusion.....	132
6.2.6. Résultats des mesures capacitives.....	132
6.2.7. Conclusion.....	133
6.3 ÉTUDE DE L'INFLUENCE DES VARIATIONS HYDRIQUES EN LABORATOIRE	134
6.3.1. Caractéristiques de la dalle	134
6.3.2. Programme expérimental.....	134
6.3.3. Méthodes d'investigation.....	135
6.3.4. Résultats et analyse des mesures de résistivité	137
6.3.4.1. Traitement des données.....	137
6.3.4.2. Estimation instantanée des conditions hydriques du matériau.....	139
6.3.4.3. Étude de la cinétique de séchage.....	142
6.3.5. Résultats et analyse des mesures par thermographie infrarouge passive.....	147
6.3.5.1. Protocole de mesure	147
6.3.5.2. Étude de la cinétique de séchage.....	147
6.3.6. Conclusion.....	149
6.4 ÉVALUATION DU PROFIL HYDRIQUE DANS UN OUVRAGE RÉEL	149
6.4.1. Introduction	149
6.4.2. Présentation de l'ouvrage	150
6.4.2.1. Descriptif du conduit.....	150
6.4.2.2. Réalisation des mesures.....	151
6.4.2.3. Cahier des charges proposé par le maître d'ouvrage.....	152
6.4.3. Auscultation par thermographie infrarouge passive	153
6.4.3.1. Mise en place	153
6.4.3.2. Résultats.....	154
6.4.4. Auscultation par mesures de résistivité électrique.....	155
6.4.4.1. Mise en place	155
6.4.4.2. Résultats.....	155
6.4.5. Auscultation par méthode capacitive.....	156
6.4.5.1. Mise en place	156
6.4.5.2. Résultats.....	156
6.4.6. Couplage des méthodes	157
6.4.6.1. Variables comparées deux à deux.....	157
6.4.6.2. Analyses en Composantes Principales (ACP).....	159
6.4.6.3. Corrélation des variables.....	161
6.4.7. Estimation du profil de degré de saturation	161
6.4.7.1. A partir des mesures électriques.....	163
6.4.7.2. A partir des mesures capacitives.....	163
6.4.7.3. Conclusion	164

6.4.8.	Corrélation des résultats avec le profil de fissuration	164
6.4.9.	Conclusion de l'étude	165
6.5	SYNTHÈSE	165
CHAPITRE 7 : AIDE AU DIAGNOSTIC DE L'ENDOMMAGEMENT CREE PAR LA REACTION ALCALIS-GRANULATS		169
7.1	INTRODUCTION	169
7.1.1.	Définition	169
7.1.2.	Conséquences de l'endommagement	170
7.1.3.	Facteurs d'influence	170
7.2	LA RAG ET LE CND	171
7.2.1.	La RAG et la mesure électrique	172
7.2.2.	La RAG et la mesure thermique	173
7.2.3.	Bilan	173
7.3	ÉTUDE EN CONDITIONS ENVIRONNEMENTALES CONTRÔLÉES	173
7.3.1.	Présentation de l'étude	173
7.3.1.1.	<i>Description des corps d'épreuve</i>	173
7.3.1.2.	<i>Formulations et propriétés</i>	174
7.3.1.3.	<i>Conditionnement</i>	175
7.3.1.4.	<i>Mesure d'allongement</i>	175
7.3.1.5.	<i>Bilan</i>	176
7.3.2.	Mesures de résistivité électrique	176
7.3.2.1.	<i>Présentation des mesures</i>	176
7.3.2.2.	<i>Variations de résistivité électrique</i>	177
7.3.2.3.	<i>Variations de l'anisotropie électrique</i>	179
7.3.3.	Bilan	180
7.4	ÉTUDE EN CONDITIONS ENVIRONNEMENTALES NON CONTRÔLÉES	181
7.4.1.	Présentation de l'étude	181
7.4.1.1.	<i>Description et conditionnement des corps d'épreuves</i>	181
7.4.1.2.	<i>Formulations et propriétés des corps d'épreuves</i>	182
7.4.1.3.	<i>Mesure d'allongement</i>	183
7.4.1.4.	<i>Bilan</i>	185
7.4.2.	Mesures de résistivité électrique	186
7.4.2.1.	<i>Présentation des mesures</i>	186
7.4.2.2.	<i>Variations de résistivité électrique</i>	187
7.4.2.3.	<i>Variations de l'anisotropie électrique</i>	189
7.4.2.4.	<i>Conclusion</i>	190
7.4.3.	Mesures par thermographie infrarouge passive	192
7.4.3.1.	<i>Protocole de mesure</i>	192
7.4.3.2.	<i>Conditions environnementales</i>	193
7.4.3.3.	<i>Résultats et interprétation</i>	193
7.4.3.4.	<i>Conclusion</i>	195
7.5	SYNTHÈSE	195
CHAPITRE 8 : AIDE A LA CARACTERISATION DE LA FISSURATION ET DE LA DELAMINATION.....		199
8.1	INTRODUCTION	199
8.1.1.	Définitions	199
8.1.1.1.	<i>La fissuration</i>	199
8.1.1.2.	<i>La délamination</i>	200
8.1.2.	L'END	201
8.1.2.1.	<i>La mesure électrique</i>	201
8.1.2.2.	<i>La mesure par thermographie infrarouge</i>	202
8.2	ÉTUDE SUR SITE	203
8.2.1.	Présentation de l'ouvrage	203
8.2.2.	Mesures en sous face, coté amont	204
8.2.2.1.	<i>Mesures par thermographie infrarouge</i>	204
8.2.2.2.	<i>Mesures de résistivité électrique</i>	206

8.2.2.3. Conclusion	207
8.2.3. Mesures en sous face, coté aval	208
8.2.3.1. Mesures par thermographie infrarouge.....	208
8.2.3.2. Mesures de résistivité.....	211
8.2.3.3. Conclusion	216
8.3 SYNTHÈSE	216
CONCLUSIONS GENERALES ET PERSPECTIVES DE TRAVAIL.....	221
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	227
NOMENCLATURE	I
ANNEXES.....	III
ANNEXE 1 : LE DISPOSITIF ELECTRIQUE	IV
ANNEXE 2 : LE DISPOSITIF INFRAROUGE.....	VI
ANNEXE 3 : LES OUTILS STATISTIQUES UTILISES	VII
ANNEXE 4 : LEXIQUE	X

Table des illustrations

Chapitre 1 : L'auscultation des structures en béton

Figure 1. 1	Articulation des phases dans une démarche de diagnostic (d'après Breysse <i>et al.</i> 2005).....	8
-------------	---	---

Chapitre 2 : La résistivité électrique du béton

Figure 2. 1	Illustration du principe de la mesure de résistivité.....	22
Figure 2. 2	Circulation du courant électrique dans le béton (Whittington <i>et al.</i> 1981)	24
Figure 2. 3	Résistivité électrique des matériaux (d'après Whiting <i>et al.</i> 2003).....	25
Figure 2. 4	Photographie du principe de la mesure par transparence en laboratoire	29
Figure 2. 5	Densité de courant en fonction de la profondeur z et de l'espacement L des électrodes (j_0 est j_x à $z = 0$) pour un dispositif d'injection à deux électrodes (d'après Telford <i>et al.</i> 1990)	33
Figure 2. 6	Fraction du courant circulant sous une épaisseur z pour un écartement L (d'après Telford <i>et al.</i> 1990).....	33
Figure 2. 7	Schéma de principe de la mesure de la résistivité apparente par dispositif quadripolaire (d'après Chouteau <i>et al.</i> 2005).....	34
Figure 2. 8	Principe du dispositif de mesure avec une électrode.....	35
Figure 2. 9	Dispositif Wenner pour la mesure de la résistivité électrique du béton (d'après Broomfield <i>et al.</i> 2002).....	36
Figure 2. 10	Configurations possibles pour un dispositif quadripolaire carré.....	36
Figure 2. 11	Photographie du dispositif quadripolaire carré de 5 et 10 cm de coté (d'après Lataste 2002)..	37

Chapitre 3 : Les propriétés thermiques du béton

Figure 3. 1	le spectre des radiations électromagnétiques	46
Figure 3. 2	Pourcentage de transmission d'un rayonnement infrarouge à travers 1 km d'atmosphère (d'après Gaussorgues 1999).....	49
Figure 3. 3	Composition du rayonnement reçu par la caméra infrarouge (d'après Hamrelius 1991).....	54
Figure 3. 4	Comportement thermique d'un béton sain et d'un béton délaminé (d'après Holf <i>et al.</i> 1987) .	55
Figure 3. 5	Caméra infrarouge ThermoCAM TM SC 2000 (©FLIR Systems).....	57
Figure 3. 6	Caméra infrarouge embarquée sur un véhicule (d'après GIE Technologies Inc.)	58
Figure 3. 7	Image visible et image thermique du parement amont de la digue sud de l'aménagement hydroélectrique de la Toulmustouc (Québec, Canada)	58

Chapitre 4 : Les facteurs influençant les propriétés électriques et thermiques du béton

Figure 4. 1	Gamme des résistivités de matériaux naturels (d'après Chapelier 2000).....	66
Figure 4. 2	Relation entre la conductivité thermique des granulats et celle du béton, dans le cas (a) d'un béton sec et (b) d'un béton saturé (d'après Kahn 2002).....	67
Figure 4. 3	Influence mesurée du rapport E/C sur la résistivité apparente du béton (d'après Lataste 2002).....	68
Figure 4. 4	Influence du rapport E/C sur la conductivité thermique du béton (d'après Kim <i>et al.</i> 2003) ...	69
Figure 4. 5	Pénétration d'agents agressifs extérieurs (d'après Basheer <i>et al.</i> 2001 ^b).....	70
Figure 4. 6	Conductivité thermique en fonction de la porosité totale (d'après Nunes dos Santos 2003)	70
Figure 4. 7	Effet des ions chlorures sur la résistivité électrique (d'après Guissi 2004).....	73
Figure 4. 8	Influence de la teneur en chlorures sur la température de surface	74
Figure 4. 9	Effet de la présence de fumée de silice sur la résistivité électrique (d'après Berke <i>et al.</i> 1992).....	76
Figure 4. 10	Influence de la fumée de silice sur la température de surface	78
Figure 4. 11	Pont Cosmos (Montréal)	79
Figure 4. 12	Fibres en acier du béton BO-Éclipse (à gauche) et fibres synthétiques du béton BRC-2 (à droite).....	80
Figure 4. 13	Résultats de l'anisotropie électrique	82
Figure 4. 14	Théorie d'un modèle à deux couches.....	86

Figure 4. 15	Résultats de l'étude de l'influence de la profondeur du front de saturation (E_{r1})	89
Figure 4. 16	Résultats de l'étude de l'influence de la profondeur du front de saturation (E_{r2})	89
Figure 4. 17	Détermination de l'épaisseur du front humide	90
Figure 4. 18	Facteur de correction de la résistivité électrique à une température de 21°C (d'après Woelfl <i>et al.</i> 1980).....	91
Figure 4. 19	Effet de la température sur la résistivité électrique du béton pour plusieurs rapports E/C (d'après Hope <i>et al.</i> 1985).....	92
Figure 4. 20	Influence de la température sur la diffusivité thermique (d'après Vodak <i>et al.</i> 1997).....	94
Figure 4. 21	Effets de bord sur la résistivité électrique dans le cas d'une injection du courant électrique parallèle au bord (d'après Lataste <i>et al.</i> 2003 ^b).....	95
Figure 4. 22	Effets de bord sur la résistivité électrique dans le cas d'une injection du courant électrique perpendiculaire au bord (d'après Lataste <i>et al.</i> 2003 ^b)	95
Figure 4. 23	Résultats de l'étude de l'influence de l'épaisseur de la dalle	96
Figure 4. 24	Facteur de correction de l'effet de fond	97
Figure 4. 25	Principe de la carbonatation.....	100
Figure 4. 26	Résultats de l'étude de l'influence de l'épaisseur d'une couche carbonatée.....	102
Figure 4. 27	Facteur de correction de l'effet d'une couche carbonatée pour $\rho_2 / \rho_1 = 1/12$	103

Chapitre 5 : Le couplage de méthodes d'END

Figure 5. 1	Schéma de l'architecture du système de fusion de données et des sorties possibles (d'après Gros <i>et al.</i> 1999)	110
-------------	---	-----

Chapitre 6 : Evaluation des conditions hydriques dans le béton

Figure 6. 1	Gradients d'humidité relative (HR) dans le béton (adapté de Basheer <i>et al.</i> 2001 ^a)	122
Figure 6. 2	Conductivité thermique en fonction de la teneur en eau (d'après Kahn 2002)	124
Figure 6. 3	Schéma d'un condensateur plan.....	125
Figure 6. 4	Principe du dispositif de mesure en surface	125
Figure 6. 5	Site de stockage dans le port de La Rochelle à marée basse (photographie de gauche) et à marée montante (photographie de droite)	127
Figure 6. 6	Caractéristiques géométriques des corps d'épreuve.....	128
Figure 6. 7	Résistivité électrique en fonction de la porosité.....	129
Figure 6. 8	Conditionnement des dalles	130
Figure 6. 9	Résistivité électrique en fonction du degré de saturation	131
Figure 6. 10	Évolution de la différence de fréquence en fonction du degré de saturation	133
Figure 6. 11	Dimensions de la dalle 5	134
Figure 6. 12	Photographie du dispositif expérimental.....	135
Figure 6. 13	Schématisation de la procédure d'expérimentation	136
Figure 6. 14	Corrélation entre les deux sens d'injection pour le profil armé	137
Figure 6. 15	Corrélation entre les deux profils.....	138
Figure 6. 16	Résultats des mesures électriques à t_0	139
Figure 6. 17	Résultats des mesures électriques réalisées à t_1	140
Figure 6. 18	Résultats des mesures électriques réalisées à t_2	141
Figure 6. 19	Résultats des mesures électriques réalisées à t_3	141
Figure 6. 20	Évolution du front d'humidification (f_h) et du front de séchage (f_c)	143
Figure 6. 21	Cinétique de séchage sur la zone « 2j »	143
Figure 6. 22	Notion de profondeur d'investigation	144
Figure 6. 23	Cinétique de séchage sur la zone « 6j »	144
Figure 6. 24	Cinétique de séchage sur la zone « 21j »	145
Figure 6. 25	Schéma de propagation du front d'humidification et du front de séchage dans le matériau, selon l'hypothèse proposée	146
Figure 6. 26	Image thermique prise au temps t_2 d'une partie de la dalle.....	147
Figure 6. 27	Évolution de la température de surface des différentes zones humidifiées	148
Figure 6. 28	Relation entre la pente de la droite de régression de la température et le temps d'humidification	149
Figure 6. 29	Photographie de l'entrée Nord-Ouest du conduit (à gauche) et de la surface de l'ouvrage présentant de nombreuses fissures remplies de calcite (à droite).....	150
Figure 6. 30	Schéma de l'ouvrage (coupe transversale).....	151

Figure 6. 31	Cartographie des pathologies recensées par la Société GETEC lors de l'inspection visuelle en mai 2002	152
Figure 6. 32	Profil de la longueur totale de fissure visible en clé de voûte	153
Figure 6. 33	Photographie du dispositif infrarouge	154
Figure 6. 34	Profil de la température moyenne	154
Figure 6. 35	Profil électrique moyen	156
Figure 6. 36	Résultats de l'auscultation par méthode capacitive	157
Figure 6. 37	Relation entre les mesures capacitives (C) et électriques (R)	158
Figure 6. 38	Relation entre les mesures de température (T) et électriques (R)	158
Figure 6. 39	Relation entre les mesures de température (T) et capacitives (C)	159
Figure 6. 40	Cercle des corrélations (plan F1-F2)	160
Figure 6. 41	Représentation des points de mesure dans l'espace des individus	160
Figure 6. 42	Modèle issu des mesures électriques	162
Figure 6. 43	Modèle issu des mesures capacitives	162
Figure 6. 44	Estimation du profil de degré de saturation le long du conduit	163

Chapitre 7 : Aide au diagnostic de l'endommagement créé par la RAG

Figure 7. 1	Taux d'expansion et résistivité électrique de mortiers atteints par la RAG (d'après Tashiro <i>et al.</i> 1989)	172
Figure 7. 2	Photographie de la surface de la dalle B2	175
Figure 7. 3	Évolution de l'expansion moyenne des dalles B2 et B4	176
Figure 7. 4	Schématisation des points de mesure	177
Figure 7. 5	Résistivités apparentes mesurées selon le sens d'injection du courant pour la dalle B2	178
Figure 7. 6	Résistivités apparentes mesurées selon le sens d'injection du courant pour la dalle B4	178
Figure 7. 7	Site expérimental de Bells Corner	182
Figure 7. 8	Photographie d'un bloc très endommagé par la RAG	183
Figure 7. 9	Évolution de l'expansion moyenne des blocs depuis leur fabrication	184
Figure 7. 10	Photographie de la surface des blocs auscultés	185
Figure 7. 11	Schématisation du protocole de mesure	186
Figure 7. 12	Profil aller-retour effectué sur l'un des deux blocs M115 avec le dispositif Q5	187
Figure 7. 13	Mesures électriques sur les blocs	187
Figure 7. 14	Ensemble des mesures réalisées avec le dispositif Q5	188
Figure 7. 15	Ensemble des mesures réalisées avec le dispositif Q10	189
Figure 7. 16	Moyenne de la résistivité électrique mesurée avec le dispositif Q5 en fonction de l'expansion latérale des blocs	191
Figure 7. 17	Moyenne de la valeur absolue de l'anisotropie électrique mesurée avec le dispositif Q5 en fonction de l'expansion latérale des blocs	191
Figure 7. 18	Mesures par thermographie infrarouge passive	192
Figure 7. 19	Image thermique de la surface du bloc M111, le plus fissuré	193
Figure 7. 20	Évolution de la température de l'air et de l'humidité relative	193
Figure 7. 21	Évolution de la température moyenne de la surface des blocs	194

Chapitre 8 : Caractérisation de la fissuration et de la délamination

Figure 8. 1	Photographie d'une délamination due à la corrosion de l'armature	201
Figure 8. 2	Représentation schématique des désordres provoqués par la corrosion des barres d'armature (d'après Neville 2000)	201
Figure 8. 3	Effet d'un vide sur la propagation de la chaleur d'une dalle en béton (d'après Carino 2003)	202
Figure 8. 4	Vue de la rive gauche, côté amont, du pont de la Poudrerie à Empalot	203
Figure 8. 5	Photographie de l'intrados du Pont d'Empalot	204
Figure 8. 6	Mise en place du dispositif	205
Figure 8. 7	Images visible et thermique de l'intrados des dalles 6, côté amont	206
Figure 8. 8	Repérage des armatures à l'intrados des dalles 5 et 6, côté amont	206
Figure 8. 9	Résultats du zonage par mesures de résistivité électrique à l'intrados des dalles 5 et 6, du côté amont	207
Figure 8. 10	Photographie de l'intrados de la dalle 6	208
Figure 8. 11	Image visible de la scène thermique étudiée	208
Figure 8. 12	Fissuration et délamination au droit d'une armature	209

Table des figures

Figure 8. 13	Résultats des mesures du matin	210
Figure 8. 14	Résultats des mesures de l'après-midi	210
Figure 8. 15	Localisation des profils électriques	212
Figure 8. 16	Variations de la résistivité électrique et de la température de surface sur le profil longitudinal	213
Figure 8. 17	Variations de l'anisotropie le long du profil longitudinal	214
Figure 8. 18	Variations de la résistivité électrique et de la température de surface sur le profil transversal	215
Figure 8. 19	Variations de l'anisotropie le long du profil transversal	216

Table des tableaux

Chapitre 1 : L'auscultation des structures en béton

Tableau 1. 1	Évaluation de la pertinence de l'utilisation d'une méthode d'END pour les caractéristiques géométriques, pour la caractérisation physique et le diagnostic d'état du matériau, pour la détection d'objets et de défauts, et pour la caractérisation mécanique du matériau ou de l'ouvrage (d'après Breyse <i>et al.</i> 2005)	16
--------------	---	----

Chapitre 2 : La résistivité électrique du béton

Tableau 2. 1	Synthèse des méthodes de mesure de la résistivité électrique du béton en laboratoire (d'après Elkey <i>et al.</i> 1995).....	28
Tableau 2. 2	Gamme de résistivité pour la détermination de la corrosion des armatures (d'après Lataste 2002).....	30
Tableau 2. 3	La résistivité comme indicateur de durabilité (d'après Baroghel-Bouny 2004)	30
Tableau 2. 4	Grandeurs mesurées propres au dispositif quadripolaire carré.....	38

Chapitre 3 : Les propriétés thermiques du béton

Tableau 3. 1	Table des émissivités de certains matériaux	48
Tableau 3. 2	Paramètres thermiques du béton	52

Chapitre 4 : Les facteurs influençant les propriétés électriques et thermiques du béton

Tableau 4. 1	Conductivités thermiques de certains ciments, à différentes températures (adapté de Missenard 1965).....	64
Tableau 4. 2	Conductivités thermiques pour différents dosages en ciment (d'après Uysal <i>et al.</i> 2004).....	65
Tableau 4. 3	Conductivité thermique du béton selon le type de granulats (d'après Neville 2000).....	67
Tableau 4. 4	Formulation et propriétés des mélanges A, B, C et D (d'après Rivard 2003 ^a).....	72
Tableau 4. 5	Influence mesurée de la teneur en chlorures sur la résistivité électrique	73
Tableau 4. 6	Influence de la présence de cendres volantes sur la conductivité thermique (adapté de Kim <i>et al.</i> 2003).....	75
Tableau 4. 7	Formulation et propriétés des mélanges B1, B3 et B5 (d'après Rivard 2003 ^b).....	77
Tableau 4. 8	Influence mesurée de la présence de fumée de silice sur la résistivité électrique (dispositif Q5)	77
Tableau 4. 9	Propriétés des bétons de resurfaçage (d'après Gagné <i>et al.</i> 2003)	79
Tableau 4. 10	Résistivité électrique moyenne (Q5).....	80
Tableau 4. 11	Température moyenne de la surface du béton.....	83
Tableau 4. 12	Sources des dégradations du béton (d'après REHABCON 2001).....	99
Tableau 4. 13	Influence des facteurs intrinsèques au béton sur la résistivité électrique et sur la conductivité thermique	104

Chapitre 5 : Le couplage de méthodes d'END

Tableau 5. 1	Objectifs du couplage des différentes méthodes d'END.....	111
Tableau 5. 2	Synthèse bibliographique sur le couplage de méthodes d'END appliquées au génie civil	113
Tableau 5. 3	Sensibilité attendue des techniques aux propriétés et/ou défauts	115

Chapitre 6 : Evaluation des conditions hydriques dans le béton

Tableau 6. 1	Formulations des corps d'épreuve auscultés	128
Tableau 6. 2	Résultats des mesures effectuées sur les carottages	136

Tableau 6. 3	Résultats des mesures électriques à t_0	139
Tableau 6. 4	Résultats des mesures électriques à t_1	141
Tableau 6. 5	Résultats des mesures électriques à t_2	142
Tableau 6. 6	Résultats des mesures électriques à t_3	142
Tableau 6. 7	Coordonnées des éléments auscultés	151
Tableau 6. 8	Indépendance statistique et corrélation des couples de variable	161
Tableau 6. 9	Résultats des tests statistiques sur les variables prises deux par deux	164

Chapitre 7 : Aide au diagnostic de l'endommagement créé par la RAG

Tableau 7. 1	Formulations et propriétés des dalles B2 et B4 (d'après Rivard 2003).....	174
Tableau 7. 2	Résistivités électriques mesurées sur les dalles B2 et B4	178
Tableau 7. 3	Anisotropies électriques calculées sur les dalles B2 et B4.....	180
Tableau 7. 4	Synthèse des résultats obtenus en laboratoire sur l'influence de l'endommagement créé par la RAG sur la mesure de résistivité électrique	181
Tableau 7. 5	Formulations des bétons	183
Tableau 7. 6	Résistivités électriques mesurées avec le dispositif Q5	188
Tableau 7. 7	Résistivités électriques mesurées avec le dispositif Q10	188
Tableau 7. 8	Anisotropie électrique pour le dispositif Q5	190
Tableau 7. 9	Anisotropie électrique pour le dispositif Q10	190
Tableau 7. 10	Résultats des mesures par thermographie infrarouge.....	194

Chapitre 8 : Caractérisation de la fissuration et de la délamination

Tableau 8. 1	Principales techniques non destructives d'étude de la fissuration et de la délamination (adapté de OECD-NEA 1998).....	200
Tableau 8. 2	Résultats de l'étude instantanée	211
Tableau 8. 3	Résultats de l'étude multi-temporelle	211

Introduction générale

Dans le domaine de la construction, le **béton** est le matériau le plus utilisé. En plus de son très faible coût, il se distingue par ses propriétés mécaniques et sa facilité de mise en œuvre. Cependant, le béton est un matériau qui réagit avec son environnement et qui vieillit au cours du temps. Aujourd'hui, le nombre d'infrastructures dégradées a atteint un seuil alarmant, et les enjeux de la gestion des ouvrages sont clairement identifiés.

Le Ministère des Transports du Québec a investi entre 2002 et 2003 près de 162,8 millions de dollars canadiens pour des travaux de **conservation** des structures (Vérificateur général du Québec 2003). Cusson *et al.* (2001) rapportent que la seule **réparation** des ponts québécois nécessite près de 10 milliards de dollars. Aux Etats-Unis, le gouvernement dépense chaque année près de 90 milliards de dollars américains pour la **réhabilitation** et la conservation des infrastructures routières construites au cours des années 1940 (Loulizi *et al.* 2002). En France, les moyens demandés au titre de l'**entretien** du réseau routier sont passés de 349 millions d'euros en 1992 à 429 millions d'euros en 2002. Concernant les ouvrages d'art, les budgets ont été augmenté d'environ 200% entre 1992 et 2005, afin d'atteindre 93,3 millions d'euros (<http://www.senat.fr>).

Dans une problématique de **gestion du patrimoine**, les travaux d'entretien et de réhabilitation des structures endommagées ne peuvent être envisagés que si les altérations sont, d'une part, détectées et localisées (extension), et d'autre part, caractérisées (type, intensité, évolution). Les contrôles classiques sur prélèvements, présentent de nombreuses limites. C'est pourquoi, en terme de diagnostic des ouvrages, les méthodes d'**Evaluation Non Destructive (END)** apparaissent comme un outil adapté aux besoins des maîtres d'ouvrages.

Les travaux de recherche présentés dans cette thèse visent à mettre en œuvre, à moyen terme, une méthodologie de diagnostic des risques pathologiques basée sur la caractérisation physique de l'état du béton par **mesures de résistivité électrique** d'une part et par **thermographie infrarouge passive** d'autre part. Le couplage des résultats issus de ces deux techniques d'END tente d'apporter une plus-value à ce diagnostic.

La méthodologie choisie passe tout d'abord par l'évaluation de la **sensibilité** des deux méthodes à un paramètre recherché, puis une **quantification relative** afin de pouvoir zoner un ouvrage, et enfin une **quantification absolue** par la définition de valeurs seuils ou d'indicateurs de durabilité. Des mesures expérimentales en laboratoire, sur corps d'épreuve, et in situ, sur des ouvrages réels, visent à mettre en évidence certains facteurs de sensibilité des méthodes. Des modélisations numériques (en électrique) permettent ensuite de quantifier certains phénomènes mis en jeu afin de pouvoir relier la mesure à un paramètre physique.

La thèse est présentée et développée selon deux parties et huit chapitres. Dans une Première Partie, un **état des connaissances** est réalisé avec pour objectif de comparer les sensibilités des deux méthodes choisies à un paramètre commun. La seconde partie présente les **résultats expérimentaux** de différentes études plus spécifiques sur l'évaluation de l'état à l'échelle du matériau et des ouvrages.

L'objectif de la première partie est donc de faire le bilan de l'état des connaissances. Le chapitre 1 présente la problématique actuelle de l'auscultation des ouvrages en béton. Une brève revue des notions de base et des théories concernant la mesure de résistivité électrique et l'utilisation d'un dispositif quadripolaire carré (chapitre 2), et la mesure par thermographie infrarouge à l'aide d'une caméra infrarouge (chapitre 3) sont ensuite abordés. Puis nous étudions les facteurs influençant les propriétés électriques et thermiques du béton (chapitre 4) dans le but de maîtriser leurs effets in situ et lors de l'exploitation des résultats ; l'objectif étant de pouvoir distinguer l'information recherchée des perturbations de la mesure (biais). Ce travail préalable d'évaluation de la représentativité de la mesure est indispensable à la bonne interprétation des résultats. Enfin, la notion de couplage de méthodes d'END est abordée dans le chapitre 5 ; cette notion constituant l'un des objectifs visés par ce travail.

Dans la deuxième partie, l'étude de la capacité des deux techniques à caractériser l'état du béton est réalisée. Le chapitre 6 s'intéresse à l'évaluation des conditions hydriques dans le béton, par une première approche originale et une adaptation de la formule d'Archie au domaine du génie civil. Les deux paramètres mesurés, la résistivité électrique et la température de surface du béton sont sensibles à la teneur en eau volumique du matériau. Le chapitre 7 concerne l'aide au diagnostic de l'endommagement créé par la réaction alcalis-granulats. Cette pathologie est très peu étudiée au moyen de méthodes d'END. Par le traitement des données qui utilise l'outil statistique, le travail réalisé permet de définir des indicateurs d'endommagement. Enfin, le chapitre 8 discute de l'aide à la caractérisation de la fissuration et de la délamination. Dans cette étude, l'utilisation stratégique des deux méthodes est évaluée. A la fin de ces différents travaux, l'accent est mis sur les différents modes de couplage tentés ou effectués au cours de la thèse.

Enfin, le lecteur trouvera à la fin du document les conclusions générales et perspectives de travail. Les principaux résultats démontrés au cours de la thèse en terme de protocole de mesures, de traitement des données et d'interprétations des résultats sont présentés et permettent de définir de nouvelles pistes de travail.

**PREMIERE PARTIE : REVUE
DES CONNAISSANCES**

CHAPITRE 1 : L'AUSCULTATION DES STRUCTURES EN BÉTON

1.1 AUSCULTATION, ÉVALUATION ET DIAGNOSTIC

1.1.1. DÉFINITION DES TERMES

L'auscultation (étymologiquement : *action d'écouter, examen*) regroupe l'ensemble des examens et des mesures spécifiques qui vise à mieux connaître l'état réel d'un ouvrage. L'évaluation (*détermination de la valeur*) est l'estimation des fonctions de cet ouvrage. Elle permet d'aboutir à un diagnostic (*aptitude à reconnaître*) après le recensement des différents symptômes : identification des fonctions altérées, des zones atteintes, des mécanismes mis en jeu...

L'inspection visuelle (*examen attentif*) est la première des techniques d'auscultation mise en œuvre. Mais le plus souvent, pour pouvoir réaliser un diagnostic, il faut faire appel à des techniques plus élaborées telles que des prélèvements, des mesures sur l'ouvrage... (Calgaro *et al.* 1997).

En général, c'est seulement après la mise en œuvre de modèles de calcul que l'on peut passer à une évaluation quantitative de l'état ou de la durée de vie de l'ouvrage.

Il ne faut donc pas confondre l'auscultation avec l'évaluation qui en découle ou avec le diagnostic qui ne peut être établi que par l'enchaînement logique de l'ensemble de ces étapes (Ryall *et al.* 2000).

De façon théorique, toutes ces étapes s'articulent entre elles afin de conduire au pronostic (*connaître à l'avance*) final qui va répondre aux attentes du maître d'ouvrage (Figure 1. 1).

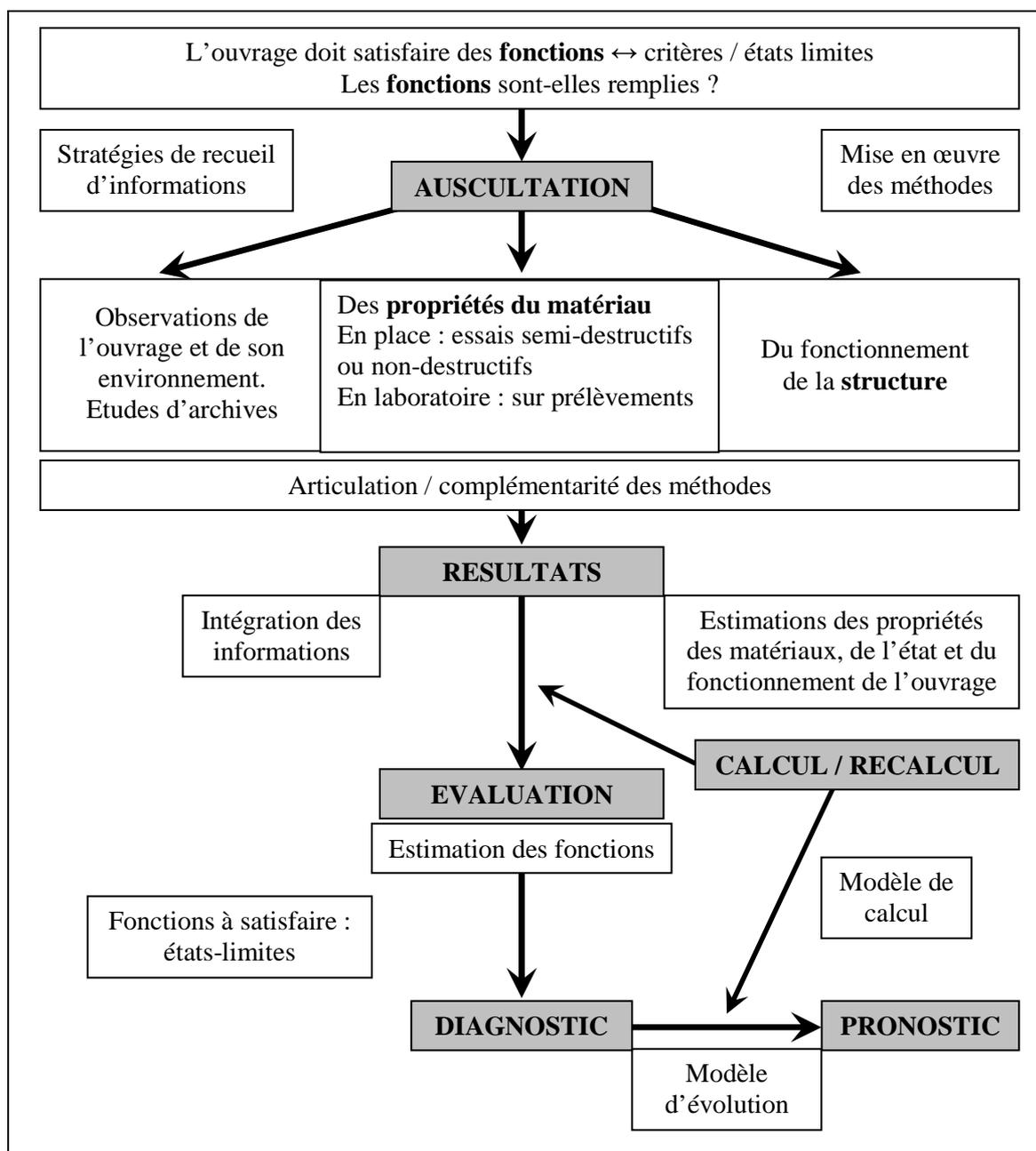


Figure 1.1 Articulation des phases dans une démarche de diagnostic (d'après Breysse *et al.* 2005)

1.1.2. POURQUOI AUSCULTER, ÉVALUER OU POSER UN DIAGNOSTIC ?

Le gestionnaire d'ouvrage peut trouver plusieurs raisons susceptibles de motiver l'auscultation d'un ouvrage (Direction des routes 1998) :

- sur un ouvrage a priori sain : il peut vouloir estimer, vérifier ou contrôler les caractéristiques de la construction. C'est notamment le cas des ouvrages à « caractère exceptionnel » (grand barrage...) ou des structures innovantes dont il souhaite connaître le comportement en service ;
- sur un ouvrage supposé endommagé : l'inspection visuelle ou l'auscultation peut alors être utilisée pour détecter l'endommagement ;

- sur un ouvrage visiblement endommagé dont les désordres sont susceptibles ou non de s'aggraver ou de mettre en cause la sécurité : il peut faire appel à l'auscultation pour caractériser l'endommagement (gravité de l'endommagement, étendue spatiale...).

Les données permettant l'évaluation de l'endommagement d'un ouvrage en béton sont nombreuses. On peut alors classer les informations recherchées en quatre catégories selon leur nature ou leur origine :

- caractéristiques de l'ouvrage : mesure de l'épaisseur de béton, mesure de l'enrobage des barres d'armatures dans un béton armé, positionnement et dimensionnement du ferrailage passif/actif, localisation des joints de coulées... ;
- caractéristiques du matériau : caractérisation de la composition, évaluation de la résistance mécanique, détermination de la porosité, détermination des conditions hydriques (degré de saturation)... ;
- caractéristiques pathologiques : détection et localisation des parties d'un ouvrage atteintes d'alcali-réaction, détection et quantification des zones d'un ouvrage contaminées par des chlorures, détection, localisation et dimensionnement de vides ou d'hétérogénéités (fissures, microfissures, délaminations, nids d'abeille)... ;
- caractéristiques issues du vieillissement : détection et quantification d'une corrosion de barres d'armature (acier passif) ou de câbles de précontraintes (acier actif), détection et quantification de dépôts en surface du béton (mousses...), évolution de la solution interstitielle, évolution microstructurale du béton (carbonatation...).

1.1.3. LES EXIGENCES DES MAÎTRES D'OUVRAGES

Dans le cadre du colloque « Recherche & Innovation en Génie Civil » qui s'est tenu à Paris, en avril 1998, et définissant les enjeux majeurs de la recherche nationale en génie civil, Touret a traité des questions relatives à la surveillance et à la réhabilitation du bâti : « le plus important est de fournir au maître d'ouvrage un outil d'aide à la décision dans le cadre d'une stratégie de maintenance préventive. Cela oblige à élaborer de nouveaux outils de diagnostic et des outils de surveillance du vieillissement de l'ouvrage. Pour atteindre cet objectif, il est également nécessaire d'assurer une collaboration très étroite entre les ingénieurs calculateurs, les modélisateurs et les spécialistes de l'auscultation, afin de répondre aux questions : Que faut-il ausculter ? Comment ? Et comment valider ? » (Touret 1998).

Chaque ouvrage est unique (géométrie, histoire, environnement, fonction...). La réponse aux questions posées n'est pas immédiate et il est très difficile de proposer une règle générale dans le domaine de l'auscultation des ouvrages.

Le programme d'auscultation doit alors s'intégrer dans une démarche logique qui consiste à trouver un compromis entre le niveau d'exigence demandé par le maître d'œuvre et le coût économique acceptable pour l'application (Aubagnac *et al.* 2002).

1.1.4. LE CONTRÔLE DESTRUCTIF ET SES LIMITES

Si la recherche documentaire est la première source d'informations techniques permettant de juger de la conformité géométrique ou matérielle d'un ouvrage (plans d'origine, notes de calculs...), dans de nombreux cas, ces documents ne sont malheureusement pas ou plus disponibles. En outre, on peut souvent émettre des réserves quand à la bonne conformité de l'ouvrage au regard des plans eux-mêmes. Enfin, si des anomalies sont présumées, elles peuvent se trouver cachées dans le pire des cas, ou difficilement accessibles aux investigations extérieures directes. L'observation visuelle ne peut alors se suffire à elle-même.

Une solution naturelle consiste à privilégier l'acquisition de données (caractéristiques mécaniques) durant la vie de l'ouvrage en multipliant les prélèvements d'échantillons. Des analyses fines des processus de détérioration et des essais en laboratoire (caractérisations mécaniques, physiques ou chimiques) sont ensuite effectuées sur ces prélèvements. Cette solution présente de sérieuses limites que nous allons développer dans les quatre paragraphes suivants.

1.1.4.1. REPRÉSENTATIVITÉ DE L'INFORMATION RECUEILLIE

Même si le laboratoire est un lieu idéal pour la caractérisation fine de l'interface pâte/granulat par exemple, il n'est, en général, pas forcément adapté à l'analyse d'objets ou de phénomènes couvrant des échelles plus larges.

De plus, l'intégrité de l'ouvrage mais également à celle du prélèvement est atteinte lors de l'extraction d'un échantillon. Par exemple, dans le cas de la caractérisation de fissures, il est quasiment impossible de prélever un échantillon fissuré en maintenant jusqu'au laboratoire la fissure « en l'état », soit parce que la fissure empêche la bonne tenue de l'échantillon (fissure traversant la carotte prélevé), soit parce que la technique de prélèvement provoque elle-même de la fissuration, ou encore soit parce que l'absence de contrainte favorise le gonflement de l'échantillon (cas de la réaction alcali-silice).

1.1.4.2. ÉTENDUE SPATIALE DE L'INFORMATION RECUEILLIE

Les analyses mécaniques, physiques ou chimiques sur des échantillons prélevés ont l'avantage de fournir des informations qui sont souvent directement exploitables dans la stratégie d'évaluation. Mais l'information recueillie n'est pertinente qu'à l'échelle de l'échantillon et de sa périphérie. Dans ce sens, les grandeurs mesurées sur les carottes ne représentent qu'une information spatiale très localisée d'une infime partie de la structure. Par conséquent, les résultats obtenus à cette petite échelle sont difficilement généralisables sans hypothèse supplémentaire.

De plus, sans information préalable (campagne de pré-auscultation, par exemple), l'échantillon est prélevé au hasard. En particulier, il peut être extrait d'une zone qui n'est pas forcément représentative des phénomènes que l'on cherche à analyser.

1.1.4.3. ACCESSIBILITÉ ET SENSIBILITÉ DE L'OUVRAGE

Il n'est pas toujours possible de réaliser des prélèvements, soit pour des raisons d'accessibilité de l'ouvrage, soit pour des raisons de sensibilité de la structure. Par exemple, nous comprenons aisément que certains éléments d'une centrale nucléaire ne puissent subir de

dégradations liées à une campagne de carottage. C'est souvent le cas pour des structures en béton armé.

1.1.4.4. ASPECT ÉCONOMIQUE

Dans le cadre d'un projet de diagnostic à l'échelle d'un ouvrage entier, chaque prélèvement représente un coût. Or, pour évaluer cet ouvrage avec une précision et une pertinence suffisante, il faut souvent multiplier les prélèvements. En plus de porter atteinte à l'ouvrage, cela représente une dépense supplémentaire importante non négligeable. Ces frais sont souvent supérieurs à ceux engendrés par une campagne d'auscultation.

1.2 L'ÉVALUATION NON DESTRUCTIVE (END)

1.2.1. INTÉRÊT DES TECHNIQUES D'END

Les nombreuses limites, à la fois pratiques et économiques, liées aux prélèvements et à leurs analyses justifient amplement le recours aux techniques d'END.

Les méthodes d'END, adaptées aux conditions de mesures sur site, sont généralement rapides à mettre en œuvre et d'un coût raisonnable. Cependant, reposant sur la mesure de propriétés physiques, elles ne permettent le plus souvent qu'une appréciation indirecte des propriétés recherchées (mécaniques ou chimiques). Dans certains cas, elles peuvent être utilisées en continu (dans le temps) sur des ouvrages de grandes dimensions. On utilise alors le terme anglo-saxon de « monitoring ».

L'utilisation pratique de ces techniques permet :

- une reconnaissance à grande échelle, fournissant un vaste panorama de l'ouvrage ;
- une localisation d'éventuelles zones à problème, dans lesquelles on pourra, si besoin, effectuer d'autres analyses plus fines, par exemple en prélevant des échantillons (avec les inconvénients exposés ci-dessus) ;
- de traiter des ouvrages ou des parties d'ouvrage sensibles.

1.2.2. UTILISATION POSSIBLE DE L'END

Etant donné les possibilités de chacune des méthodes d'END, et dans le but d'obtenir l'information la plus pertinente et la plus complète possible, l'exploitation des résultats peut se faire de différentes manières :

- variations relatives : le travail en relatif permet de suivre l'évolution des caractéristiques du matériau à partir de la surface auscultée. Cela justifie ensuite le positionnement des prélèvements possibles de façon à les rendre le plus pertinent, tout en limitant leur nombre. Ce travail permet également le suivi temporel d'un désordre ;
- travail en couplage avec des méthodes destructives ou semi-destructives : les méthodes d'END permettent d'obtenir des mesures relatives. La quantification passe

alors par le recalage des valeurs par rapport à une donnée absolue (déterminée généralement par un essai destructif). En ce sens, les méthodes d'END sont souvent intégrées dans une stratégie générale d'auscultation réfléchiée qui combine les résultats des mesures à plusieurs sources d'information ;

- couplage de plusieurs méthodes d'END : l'exploitation combinée des données issues des différentes méthodes permet d'affiner l'interprétation des résultats.

1.2.3. LES MÉTHODES D'END À DISPOSITION

Comparée au développement des méthodes d'END dans le domaine des structures en acier, l'évolution de ces techniques pour les ouvrages en béton se fait plus lentement. Cela peut s'expliquer par la complexité du matériau béton, et notamment son hétérogénéité à l'échelle macroscopique, par rapport à l'acier (Carino 2003). De ce fait, il est difficile de transférer les technologies développées pour l'acier au domaine de l'auscultation du béton.

En 2000, une revue faite par le Comité Technique « Non Destructive Evaluation » de la RILEM recensait plus de 115 méthodes d'évaluation des propriétés du béton ! (Burghardt 2000). Actuellement, ces méthodes d'auscultation non destructives sont utilisées mais elles ne sont pas encore totalement reconnues par la communauté de l'END (physiciens, électriciens, mécaniciens...), et par conséquent, elles ne sont pas encore systématiquement utilisées (et réciproquement !) (Carino 2003). L'OECD-NEA (1998) précise qu'il y a un manque général de confiance dans les techniques END car il y a très peu d'avis indépendants sur leur applicabilité, leur capacité, leur précision et leur fiabilité. De plus, il n'existe souvent pas de consensus possible, ni de norme appropriée.

Les méthodes d'END sont souvent utilisées pour mesurer un phénomène précis, comme par exemple évaluer la résistance en compression du matériau, alors qu'elles pourraient s'inscrire dans le cadre d'un vaste programme de surveillance de l'ensemble d'une structure (McCann *et al.* 2001).

Les méthodes non destructives utilisées aujourd'hui pour l'auscultation des structures en béton peuvent être classées en sept catégories qui sont décrites succinctement dans les paragraphes suivants.

1.2.3.1. LES INSPECTIONS VISUELLES

L'inspection visuelle (Graybeal *et al.* 2002) est la plus simple et la plus immédiate des techniques d'auscultation non destructive d'une surface. Les pathologies les plus courantes sont décrites afin d'aider à la détection, à la reconnaissance et au diagnostic. Les progrès technologiques récents permettent de soutenir cette méthode, en offrant des capteurs complémentaires de l'œil (appareils numériques), des moyens d'enregistrement (pour un suivi dans le temps) ainsi que des procédés d'analyse d'image pour l'interprétation. Cette méthode reste néanmoins très subjective puisque les résultats sont étroitement liés à l'expérience et au jugement de l'inspecteur.

Le suivi topographique des ouvrages est aussi un moyen d'inspection très important qui permet de suivre les déformations d'ouvrages dans le temps.

1.2.3.2. LES MÉTHODES ACOUSTIQUES : SONIQUES ET ULTRASONIQUES

Les techniques d'auscultation reposant sur la propagation d'ondes mécaniques sont largement employées dans les domaines de la métallurgie (Garnier *et al.* 2005). Elles sont dérivées des méthodes géophysiques sismiques et reposent sur l'interprétation, soit en temps, soit en fréquence, de l'onde enregistrée en fonction de l'onde émise. Les principales techniques sont : les UltraSons (US), les Ondes de Surface (OS) (Hévin 1998, Hassaim 1999, Al Wardany 2005), la Tomographie Acoustique (TO) (Côte 1988, Sahebi 1996, Kharrat 1997), l'Emission Acoustique (EA) et l'Impact-Echo (IE).

1.2.3.3. LES MÉTHODES ÉLECTROMAGNÉTIQUES

Le principe repose sur l'émission d'une onde électromagnétique et sur l'analyse du signal induit et de ses perturbations. On distingue principalement 3 types de méthodes : l'auscultation basse fréquence (pachomètre), le radar et la méthode capacitive (voir paragraphe 6.1.1.4).

Ce sont les développements des antennes à hautes et très hautes fréquences (1,5 GHz) qui ont permis la transposition de ces méthodes géophysiques au génie civil. La méthode RADAR, utilisée notamment à la surface des tabliers de ponts (Rhazi *et al.* 2003) permet, par un balayage très rapide d'avoir une image en trois dimensions de la structure. Ainsi, on peut déterminer la profondeur des armatures (Dérobert *et al.* 2001), l'épaisseur de différentes couches présentes dans le béton, une estimation de la teneur en eau (Laurens 2001, Sbartai 2005) et de la contamination par les chlorures (Klysz 2004). Généralement couplée avec des mesures du potentiel et de vitesse de corrosion, elle renseigne sur l'état d'avancement de la corrosion des armatures (Balayssac *et al.* 2002).

1.2.3.4. LES MÉTHODES ÉLECTRIQUES : RÉSISTIVITÉ, POTENTIEL ET VITESSE DE CORROSION

Elles reposent sur la mesure des intensités des courants, et/ou des différences de potentiel au sein du matériau, dues soit à des réactions électrochimiques naturelles dans le matériau (cas de la corrosion), soit à des sollicitations artificielles. Cette famille regroupe les mesures de la résistivité électrique (Lataste 2002), du potentiel de corrosion, et de la vitesse de corrosion (Andrade *et al.* 1996).

La mesure de résistivité électrique sera présentée en détails dans le Chapitre 3, puisque c'est l'une des méthodes d'auscultation étudiée dans le cadre de cette thèse.

1.2.3.5. LES MÉTHODES THERMIQUES

Dans le domaine du contrôle non destructif d'ouvrages, les méthodes thermiques sont émergentes. L'apparition récente de la thermographie infrarouge (TIR) a permis aux méthodes thermiques de s'immiscer dans le domaine de l'auscultation des ouvrages (Sirieix *et al.* 2005). Il s'agit alors de mesurer la réponse d'un ouvrage aux variations de températures naturelles ou artificielles (respectivement pour les méthodes dites passives ou actives). Les mesures sont effectuées dans le domaine spectral de l'infrarouge dit moyen, entre 2 et 15 μm (Gaussorgues 1999).

Ces méthodes, telles qu'elles sont utilisées classiquement aujourd'hui et plus particulièrement la thermographie infrarouge passive, sont présentées de manière plus complète dans le Chapitre 4.

1.2.3.6. LES MÉTHODES RADIOGRAPHIQUES

Il s'agit des techniques classiques de radiographie : la surface à ausculter est exposée à un rayonnement (γ ou X selon la méthode), qui après avoir traversé le matériau impressionne un film photographique. On distingue parmi ces méthodes la gammagraphie, la radiographie et la radioscopie (Roellenne *et al.* 2005).

1.2.3.7. LES MÉTHODES OPTIQUES

Les méthodes optiques de mesure de champs ont l'avantage de ne pas interagir avec l'objet ausculté. Certaines méthodes, comme la photoélasticimétrie, le moiré et l'holographie ont été employées par le passé (il y a environ une vingtaine d'années) mais se sont confrontées à des difficultés de mise en œuvre sur le terrain.

Avec le développement de l'informatique et de la vidéo, ces techniques sont aujourd'hui des méthodes dont l'utilisation est de plus en plus simple. Mais il ne faut pas perdre de vue la difficulté d'interprétation qui demande encore aujourd'hui une très bonne connaissance de la mesure et de la physique des phénomènes mis en jeu.

Parmi cette grande famille, nous pouvons citer trois techniques de mesure optiques : la photogrammétrie, la projection de franges et l'interférométrie. Ces méthodes sont, de manière générale, de plus en plus courantes dans le monde industriel et notamment en génie civil (Taillade 2005).

1.2.3.8. BILAN

Chacune des sept familles de méthodes présentées ici a ses spécificités propres selon le principe physique auquel elle obéit. Elles présentent donc toutes des avantages et des limites tant au niveau de leur sensibilité aux différents facteurs que de leur utilisation sur site (vitesse de mise en œuvre, encombrement du matériel...).

Le couplage des méthodes peut permettre d'augmenter le nombre ou la qualité des informations sur un ouvrage et d'améliorer le mode d'utilisation de chacune d'elles.

1.2.4. CHOIX D'UNE MÉTHODE

Lors d'une campagne d'auscultation d'un ouvrage en béton, on cherche à caractériser une pathologie la plupart du temps déjà suspectée. Or toutes les méthodes n'offrent pas la possibilité de détecter l'ensemble des altérations. Ainsi, le choix se fait dans un premier temps selon la nature présumée de l'altération (Lataste 2002).

McCann *et al.* (2001) recensent cinq facteurs importants dans le choix d'une méthode : la profondeur de pénétration, la résolution verticale et horizontale recherchée a priori, le contraste de propriétés physiques entre l'anomalie et son environnement, le rapport signal/bruit et la possibilité d'acquérir des informations préalables sur l'ouvrage. Lataste (2002) ajoute également l'échelle de l'investigation et la vitesse d'avancement.

Si deux ou plusieurs méthodes d'END sont possibles, il devient nécessaire d'utiliser des critères de comparaison afin de choisir la plus pertinente. Le résultat synthétique du groupe de travail de l'AFGC sur l'END des ouvrages en béton armé (Breysse *et al.* 2005) en retient cinq : la facilité du mode opératoire, le caractère non destructif, la répétabilité, la sensibilité, la validité conceptuelle ou encore le degré de pertinence.

L'ensemble de ces contraintes, de différentes natures (économique, pratique, scientifique...), motive le choix de l'utilisation d'une ou plusieurs méthodes d'END à mettre en œuvre afin de qualifier au mieux l'état d'un ouvrage lors de la mise en place d'une stratégie d'auscultation.

1.3 CONCLUSION

L'intérêt de l'utilisation des méthodes d'END est croissant en génie civil, tant sur le plan économique que technique. Or, les différentes techniques utilisées aujourd'hui sont pour la plupart encore en phase de développement/validation, et ne font pas encore l'unanimité. Cela provient essentiellement de leur sensibilité aux paramètres extérieurs, et de la difficulté à exprimer les résultats de manière utilisable directement par les bureaux d'études.

Considérées individuellement, la plupart de ces méthodes s'utilisent dans le cas de pathologies bien précises. En aucun cas, une seule méthode ne suffit pas à caractériser complètement le dommage étudié. De plus, il ne faut pas perdre de vue que, sur site, de nombreux facteurs sont non contrôlables (température, humidité, géométrie de l'élément, bruit ambiant...). A cela, on peut ajouter que les résultats diffèrent d'un lieu à l'autre, d'un jour à l'autre ou encore d'un expérimentateur à l'autre. On comprend alors la difficulté à quantifier les résultats expérimentaux et à définir des seuils de sensibilité des techniques.

Selon Gros *et al.* (1999), le système de fusion des données provenant de plusieurs méthodes d'END, et utilisé dans le processus de couplage, peut aboutir soit à une perte (cumul des incertitudes) soit à un gain d'information. Ce deuxième cas motive l'utilisation combinée de plusieurs techniques afin de permettre de réduire les erreurs d'interprétation et de s'approcher le plus possible de l'évaluation exacte de l'état du béton.

Dans tous les cas, l'interprétation des données nécessite des prélèvements pour lever les hypothèses formulées sur l'état d'endommagement de l'ouvrage.

Le Tableau 1. 1 (Breysse *et al.* 2005) répertorie la pertinence de l'utilisation d'une méthode d'END en fonction du paramètre recherché. Pour chacune des techniques et en fonction de la pertinence de l'utilisation de la méthode, une évaluation est fournie sur la base d'un simple indice A, B ou C. Ainsi, l'indice A indique une notion de « bonne pertinence » au regard du critère étudié, alors que l'indice C révèle un niveau de difficulté rencontré important, voire une incompatibilité ou une impossibilité théorique ou pratique.

Tableau 1.1 Évaluation de la pertinence de l'utilisation d'une méthode d'END pour les caractéristiques géométriques, pour la caractérisation physique et le diagnostic d'état du matériau, pour la détection d'objets et de défauts, et pour la caractérisation mécanique du matériau ou de l'ouvrage (d'après Breyse et al. 2005)

		Technique utilisée																
		US	IE	EA	OS	TO	RAD	CAP	BF	IR	RHO	PC	VC	γ X	PHG	FRA	HOL	SHE
Géométrie	Épaisseur	C ¹ B ²	A				A							A ²				
	Repérage d'armatures						B A ³		A ³		A ³			A				
	Diamètre d'armatures								A					A				
État du matériau	Teneur en chlorures						C				C							
	Profondeur de carbonatation	C			C													
	Taux d'humidité	C			C		B	A		B	B	C						
	Porosité	C			C	C					C	C						
Objets/défauts	Corrosion d'armatures			B								B	A					
	Profondeur et étendue du délaminage avec accès par une seule face	C	A	B ⁴	C		B			A ⁵ B	B						C	C
	Microfissuration	C		B ⁴	C	C				C	B							
Mécanique	Macro fissure visible	B		A ⁴	C					C	B				C		C	C
	Résistance en compression	C	C		C	C												
	Module d'élasticité en petites déformations (module d'Young)	A	A		A ⁶	A												

¹si accès par une seule face, ²si accès par les deux faces, ³si l'enrobage est faible, ⁴si le défaut est évolutif, ⁵étendue du délaminage, ⁶module de cisaillement G.
 US = ultrasons, IE = impact écho, EA = émission acoustique, OS = onde de surface, TO = tomographie acoustique, RAD = radar, CAP = capacitif, BF = méthodes basse fréquence, IR = thermographie infrarouge, RHO = résistivité, PC = potentiel de corrosion, VC = vitesse de corrosion, γ X = radiographie, PHG = photogrammétrie, FRA = projection de franges, HOL = holographie, SHE = shearographie.

1.4 **JUSTIFICATION DE LA DÉMARCHE**

L'âge moyen des constructions en béton ne cesse d'augmenter, induisant l'apparition de plus en plus fréquente d'altérations du matériau et donc des structures. Ce phénomène mondial pousse les différents maîtres d'ouvrages à mener des politiques de **gestion du patrimoine** bâti dans une perspective économique mais aussi de sécurité des biens et des personnes.

Les méthodes d'auscultation dites « classiques » (par prélèvements destructifs ou semi-destructifs) présentent trop de limites. C'est pourquoi les **techniques de Contrôle Non Destructif** (CND) apparaissent mieux adaptées aux attentes des maîtres d'ouvrages. Ces méthodes voient des applications nouvelles en Génie Civil. De ce fait, elles sont encore en cours de développement-validation, et même si leur sensibilité à de nombreux paramètres est de mieux en mieux maîtrisée, il est toujours très difficile de quantifier les résultats de manière utilisable par les bureaux d'étude.

Au stade de développement actuel, aucune méthode ne permet de répondre à elle seule de façon satisfaisante aux exigences des gestionnaires d'ouvrages. Dans cette optique, l'utilisation croisée de deux, voire plusieurs, méthodes de CND est une perspective intéressante. L'expérience acquise ces dernières années par le CDGA et par le GRAI, à travers de nombreux travaux de recherche et d'expertise sur les mesures de résistivité électrique et sur l'utilisation de la thermographie infrarouge passive, nous assure de la capacité de ces deux techniques à être appliquées avec succès aux ouvrages en béton.

L'objectif de ce travail est de montrer comment l'utilisation croisée de la mesure de résistivité électrique et de la thermographie infrarouge passive permet d'apporter une plus-value significative dans l'auscultation des ouvrages en béton.

Pour cela, il est tout d'abord nécessaire de bien connaître les paramètres mesurés afin de parvenir à maîtriser l'exploitation des mesures. Ce travail a débuté par l'étude de certains phénomènes à l'origine de biais et/ou de bruits, à travers une étude bibliographique, mais aussi par des apports plus personnels sur des points non encore élucidés (effet de l'épaisseur d'une dalle, influence de fibres...). Le but est de minimiser ces effets voire de les corriger.

L'étude de différentes altérations ou endommagements peut alors être envisagée. Le problème est abordé selon deux points de vue :

- l'aptitude des deux méthodes à **distinguer le matériau sain du matériau endommagé**. Cela mène au **zonage** de l'ouvrage. Ce travail passe à la fois par une étude en laboratoire afin d'estimer la sensibilité des méthodes vis-à-vis d'un paramètre recherché, mais aussi par l'application sur site ;

- l'aptitude des méthodes à **quantifier un degré d'endommagement**. Cela aboutit à la **hiérarchisation** de l'endommagement. Ce travail est également réalisé sur des éléments de laboratoire et sur des ouvrages réels.

Cette démarche est appliquée à trois études plus spécifiques qui sont :

- l'évaluation des **conditions hydriques** dans le béton : dans des conditions parfaitement maîtrisées, des mesures sur des éprouvettes de laboratoire ont permis d'obtenir des relations entre le paramètre mesuré par méthode non destructive et le degré de saturation en eau. Ces résultats sont ensuite utilisés sur site afin d'estimer le profil hydrique le long d'un ouvrage en béton ;
- l'aide au diagnostic de l'endommagement créé par la **réaction alcalis-granulats** (RAG) : peu d'études décrivent l'utilisation des méthodes d'END pour caractériser cette pathologie. Les mesures électriques et par thermographie infrarouge obtenues sur des corps d'épreuve et sur site sont nouvelles et les résultats obtenus sont satisfaisants ;
- l'aide à la caractérisation de la **fissuration** et de la **délamination** : cette pathologie est étudiée sur un ouvrage réel. L'utilisation stratégique de deux méthodes d'END y trouve un intérêt particulier.

Lorsque cela est possible, une exploitation combinée des différentes séries de mesures est présentée à la fin de chaque étude.

CHAPITRE 2 : LA RÉSISTIVITÉ ÉLECTRIQUE DU BÉTON

Les méthodes électriques utilisées en génie civil sont la mesure de la résistivité électrique, la mesure du potentiel de corrosion (ou potentiel d'armature) et la mesure de la résistance de polarisation (ou vitesse de corrosion). Ces deux dernières méthodes sont essentiellement orientées vers la caractérisation de l'état de corrosion des armatures et sont quasiment non destructives (la mesure du potentiel de corrosion nécessite néanmoins de percer le béton d'enrobage en un point afin de connecter une électrode au réseau d'armatures).

Aujourd'hui, la méthode des résistivités est utilisée pour localiser les zones de corrosion probable des armatures, pour cartographier les gradients d'humidité ou de pollution (ionique), et pour décrire des variations de porosité ou de fissuration.

Dans ce chapitre, nous aborderons la mesure de résistivité électrique en présentant tout d'abord les propriétés électriques du béton, puis les différentes méthodes de mesure de la résistivité utilisées en génie civil. Enfin, nous décrirons le dispositif spécifique développé pour la mesure sur site (voir également annexe 1).

2.1 LE MATÉRIAU BÉTON ET LA MESURE DE RÉSISTIVITÉ

2.1.1. DÉFINITION DE LA RÉSISTIVITÉ ÉLECTRIQUE D'UN MATÉRIAU

La résistivité électrique est la caractéristique spécifique d'un matériau à s'opposer à la conduction du courant électrique à travers elle. La résistivité (ρ) s'exprime en ohm.mètre ($\Omega.m$) dans les unités du système international, mais on trouve également dans la littérature des valeurs en $\Omega.cm$ ou $k\Omega.cm$ (Whiting *et al.* 2003).

Son inverse, la conductivité électrique (σ), caractérise la capacité de la substance à faciliter la conduction du courant électrique à travers elle. Elle est donnée en siemens par mètre ($S.m^{-1}$), mais on trouve également dans la littérature des valeurs en $mho.m^{-1}$ (le « mho » étant l'inverse de l'« ohm »).

La résistivité d'un matériau peut être définie (Esbach *et al.* 1975) comme la résistance électrique R d'un conducteur de volume unitaire et de section constante à travers lequel circule un courant continu et uniformément réparti. Plus simplement, on peut la mesurer entre les deux faces opposées d'un cube unitaire. Contrairement à la résistance électrique, c'est donc une grandeur constante du matériau. Si la résistance électrique d'un cylindre de section A et de

longueur L (Figure 2. 1) est $R = \Delta V/I$, alors la résistivité électrique ρ est calculée par la relation suivante :

$$\rho = \frac{A}{L} \cdot R = \frac{A}{L} \times \frac{\Delta V}{I}$$

- ρ = résistivité électrique (en $\Omega.m$),
- A = section plane de l'échantillon (en m^2),
- L = longueur de l'échantillon (en m),
- R = résistance électrique (en Ω),
- ΔV = différence de potentiel électrique (en V),
- I = intensité du courant (en A).

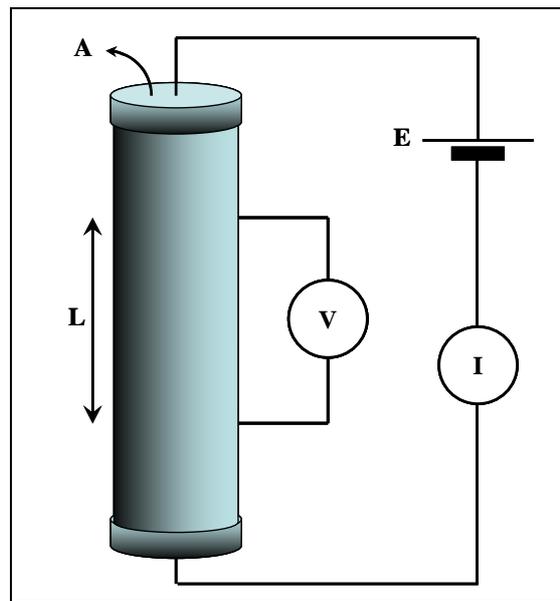


Figure 2. 1 Illustration du principe de la mesure de résistivité

2.1.2. MÉCANISMES DE CONDUCTION DU COURANT ÉLECTRIQUE DANS LES MATÉRIAUX

Selon Whittington *et al.* (1981), la conduction électrique dans un matériau peut se manifester sous trois formes.

2.1.2.1. LA CONDUCTION ÉLECTRONIQUE

La conduction électronique dans les matériaux contenant des électrons libres (comme les métaux) est décrite par la loi d'Ohm : $\Delta V = R.I$, avec ΔV la différence de potentiel (en V), R la résistance électrique (en Ω) et I l'intensité du courant (en A).

2.1.2.2. LA CONDUCTION ÉLECTROLYTIQUE

La conduction électrolytique est due à la circulation des charges électriques portées par les ions qui se déplacent dans un électrolyte sous l'effet d'un potentiel. Le squelette granulaire du béton est généralement un très mauvais conducteur. Comme pour les roches, la conduction du courant électrique se fait essentiellement à travers la porosité ouverte par l'intermédiaire des

fluides interstitiels, généralement l'eau (Telford *et al.* 1990). La résistivité électrolytique du matériau est donnée par la loi empirique d'Archie (1942) :

$$\rho = a \cdot \rho_w \cdot \phi^m \cdot S_r^{-n}$$

Avec ρ est la résistivité électrolytique du matériau (en $\Omega \cdot m$), ρ_w la résistivité du fluide interstitiel (en $\Omega \cdot m$), ϕ la porosité du matériau, S_r le degré de saturation, et « a », « m » et « n » sont des constantes telles que : $0,5 \leq a \leq 2,5$; $1,3 \leq m \leq 2,5$ et $n \approx 2$.

Dans le cas du béton, ce phénomène est dominant : la conduction se fait par l'intermédiaire de la solution présente dans les pores (Monfore 1968).

2.1.2.3. LA CONDUCTION DIÉLECTRIQUE

La conduction diélectrique est liée aux déplacements de charges soumises à un champ électrique externe alternatif. Ce troisième mode de conduction est prépondérant au sein des matériaux très peu conducteurs. Le paramètre le plus important est la permittivité absolue (ϵ). Le principe de la mesure repose sur l'équation suivante :

$$D = \epsilon_0 \cdot E + P = \epsilon_0 \cdot E + \eta \cdot E = E \cdot (\epsilon_0 + \eta) = \epsilon \cdot E$$

Avec D le déplacement électrique (en $C \cdot m^{-2}$), E l'intensité du champ électrique (en $V \cdot m^{-1}$), P la polarisation électrique (en $C \cdot m^{-2}$), η la susceptibilité électrique (en $F \cdot m^{-1}$), ϵ et ϵ_0 respectivement la permittivité (ou constante diélectrique) et la permittivité du vide (en $F \cdot m^{-1}$).

La constante diélectrique varie significativement en fonction de la quantité de liquide. Pour l'eau, elle prend une valeur élevée (81 pour l'eau douce), alors que dans la plupart des matériaux géologiques, elle varie entre 5 et 40. La constante diélectrique du béton varie quant à elle de 5 à 15 (Dérobert 2003).

L'influence de ce type de conduction dans le béton est mineure si on travaille avec des signaux électriques à basse fréquence (< 400 Hz) voire continus, ce qui est le cas pour les techniques de résistivité. Ce mode de conduction est, par contre, exploité par les méthodes électromagnétiques telles que le radar.

2.1.3. MÉCANISMES DE CONDUCTION DU COURANT ÉLECTRIQUE DANS LE BÉTON

Le béton est un matériau hétérogène. Du point de vue électrique, il peut être considéré simplement comme un matériau tri-phasique constitué d'éléments solides peu conducteurs (les granulats) qui baignent dans un milieu conducteur (la pâte de ciment) et dont la porosité est partiellement composée d'air (non conducteur).

Whittington *et al.* (1981) ont montré que la conduction électrique dans le béton est due essentiellement à la pâte de ciment. Les ions libres se déplacent dans les pores, conduisant ainsi un courant électrique. La circulation du courant peut alors suivre trois chemins (Figure 2. 2) :

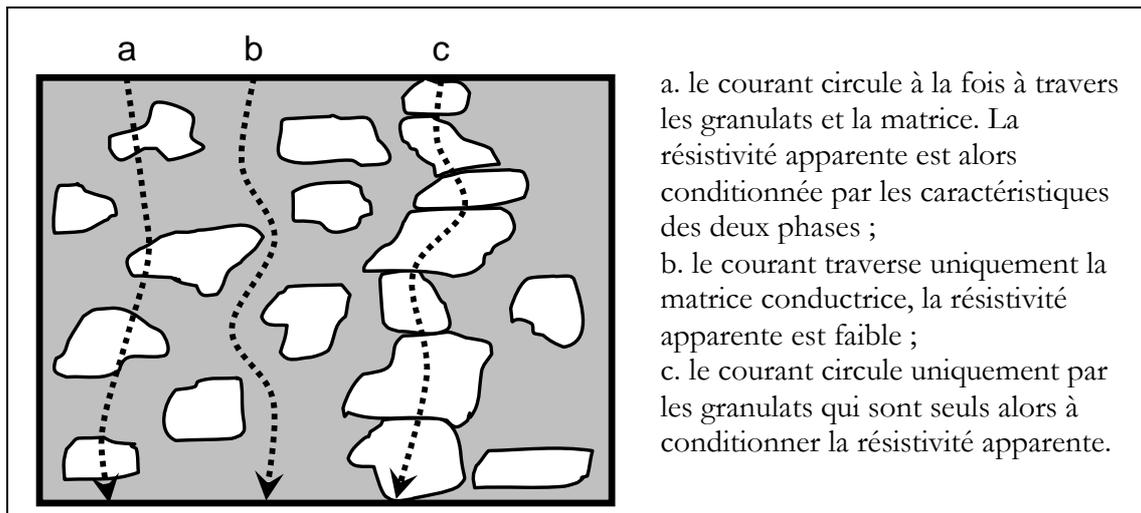


Figure 2. 2 Circulation du courant électrique dans le béton (Whittington *et al.* 1981)

On note que la porosité est un paramètre essentiel qui conditionne les possibilités de circulation des fluides (donc des électrolytes) dans la matrice. Feliu *et al.* (1996) avancent que la résistivité électrique est influencée par les paramètres de connectivité et de tortuosité de la porosité. D'ailleurs, l'évaluation de la résistance à la diffusion de liquides agressifs peut être réalisée à partir de mesures de résistivité électrique, grâce à des relations reliant diffusivité et conductivité électrique (Andrade *et al.* 1996).

L'influence d'autres paramètres tels que la nature des granulats, leur état d'humidité et leur géométrie est aussi à prendre en compte (voir Chapitre 4). Toutefois, c'est la capacité des électrolytes à circuler dans la matrice qui conditionne le plus la valeur de la résistivité.

2.1.4. GAMME DE RÉSISTIVITÉ ÉLECTRIQUE

La résistivité électrique d'un matériau dépend de nombreux paramètres tels que sa porosité, sa teneur en eau, sa composition... Classiquement, on admet que la gamme de variation de la résistivité d'un béton varie de $1 \Omega.m$, pour un béton poreux saturé en eau, à $100\,000 \Omega.m$, pour un béton sec (McNeill 1980). La gamme des résistivités du béton fait évoluer ce matériau de la classe des semi-conducteurs, à celle des isolants. La Figure 2. 3 illustre les gammes de résistivité électrique de différents matériaux.

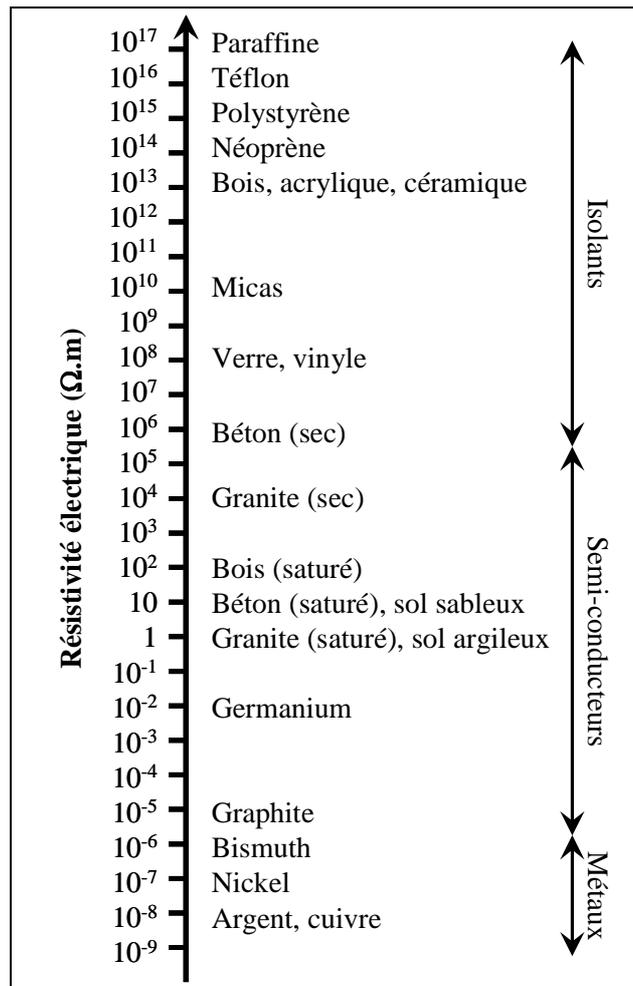


Figure 2.3 Résistivité électrique des matériaux (d'après Whiting *et al.* 2003)

2.1.5. THÉORIES DE LA RÉSISTIVITÉ

Plusieurs théories ont été développées afin de modéliser la résistivité électrique (où la conductivité) du béton non armé et comment le courant électrique circule à travers lui. Ces théories peuvent être divisées en deux catégories : la théorie des matériaux multiphasés (Maxwell 1873) et la théorie du facteur de formation (Archie 1942).

2.1.5.1. THÉORIE DES MATÉRIAUX MULTIPHASÉS

La première utilise la théorie des matériaux multiphasés⁽¹⁾, théorie indépendante des caractéristiques physiques du béton telle que sa porosité. Elle vise à prévoir la résistivité électrique du béton en fonction de la résistivité électrique de chaque constituant du mélange, de leurs fractions volumiques et, dans certains cas, de leurs formes et des facteurs de taille. Dans la plupart de ces approches, le béton est considéré comme un matériau composé de granulats isolants (inclusions) et d'une pâte conductrice (matrice).

⁽¹⁾ Sous l'expression « théorie des matériaux multiphasés », on exprime ici la théorie selon laquelle les propriétés du matériau résultent de la combinaison des propriétés de chaque fraction qui le compose.

Une des premières modélisations des propriétés électriques des matériaux multiphasés a été tentée au 19^e siècle par Maxwell (1873). Selon lui, la conductivité électrique du composite peut s'exprimer en terme de résistivité des différentes phases (matrice et granulats) :

$$\frac{\frac{\rho_m - 1}{\rho} = V_a \frac{\rho_a - 1}{\rho_m + 2}}$$

- ρ = résistivité électrique du composite (en $\Omega.m$),
- ρ_m = résistivité électrique de la matrice (en $\Omega.m$),
- ρ_a = résistivité électrique des granulats (en $\Omega.m$),
- V_a = fraction volumique de granulats.

La résistivité électrique des granulats varie de façon très significative (Monfore 1968) : de 180 $\Omega.m$ pour un grès à 8800 $\Omega.m$ pour un granite. Pour Whittington *et al.* (1981) ou Xie *et al.* (1995), elle peut prendre des valeurs supérieures à $10^3 \Omega.m$. Ces différentes valeurs peuvent s'expliquer par des variations importantes de la porosité des roches : de 5% (voire moins) à 30%, valeurs moyennes pour les roches sédimentaires (Gueguen *et al.* 1992). La résistivité électrique de la matrice (pâte de ciment ou de mortier) est considérablement inférieure (inférieure à 10 $\Omega.m$) (McCarter *et al.* 1981).

Pratiquement, la résistivité électrique des granulats peut souvent être considérée comme infinie par rapport à celle de la matrice. La fraction volumique des granulats est alors exprimée comme $V_a = 1 - V_m$, avec V_m le volume de la matrice. L'équation de Maxwell se réduit alors à :

$$\rho = \rho_m \frac{3 - V_m}{2V_m}$$

Des équations ont également été développées par Fricke (1924) dans le cas de sphères non-conductrices aplaties ou allongées noyées dans une matrice conductrice. Slawinski (1926) propose une équation dans le cas de sphères en contact les une aux autres alors que Maxwell considère des sphères non jointives. D'autres formules, recensées par Keller (1982), existent pour des géométries et des interactions de particules différentes.

Whittington *et al.* (1981) démontrent que l'équation de Maxwell (utilisant des sphères parfaites) est trop simpliste dans le cas des matériaux cimentaires. Les formules développées par Fricke (1924) et Slawinski (1926) semblent être plus en accord avec des mesures expérimentales réalisées sur un mortier. Cependant, il est important de remarquer que toutes ces formules utilisant la théorie des matériaux composites ne sont pas capables de décrire avec précision les propriétés électriques de systèmes plus complexes tels que le béton. Pour ces matériaux, une approche différente est nécessaire.

2.1.5.2. THÉORIE DU FACTEUR DE FORMATION

La deuxième théorie utilise des relations empiriques établies entre la résistivité du matériau et la résistivité de la phase conductrice. En appliquant des valeurs expérimentales aux équations suivant la loi d'Archie (1942), on peut déterminer les coefficients pour des matériaux particuliers.

De cette manière, la résistivité électrique peut être déduite si l'on connaît la résistivité du fluide interstitiel, la porosité du matériau et le degré de saturation.

Dans ses études sur les roches poreuses des réservoirs pétroliers, Archie (1942) a mis en évidence l'existence d'un rapport entre la résistivité de la roche saturée (qu'il considère souvent comme un grès) et la résistivité du fluide saturant la roche (ici, $S_r = 1$). Ce rapport est appelé facteur de formation F :

$$F = \frac{\rho}{\rho_w} = a \cdot \phi^{-m}$$

- ρ = résistivité électrique de la roche saturée (en $\Omega.m$),
 ρ_w = résistivité électrique du fluide contenu dans la roche (en $\Omega.m$),
 a = paramètre de lithologie,
 ϕ = porosité de la roche,
 m = paramètre de cimentation.

Même si cette équation, simple et purement empirique, a fait ses preuves aujourd'hui, elle n'a été validée par aucun modèle physique (Keller 1982).

2.2 LA MESURE DE RÉSISTIVITÉ EN GÉNIE CIVIL

2.2.1. LES DIFFÉRENTES TECHNIQUES DE MESURE

2.2.1.1. MESURES EN LABORATOIRE

Pour la mesure de résistivité électrique du béton en condition de laboratoire, il est important de considérer :

- l'appareillage de mesure utilisé (intensité et fréquence du courant injecté...);
- la configuration de l'échantillon (géométrie, taille, rugosité de la surface...);
- la nature et la qualité du contact entre les électrodes et le béton.

Classiquement, avec le béton, il est rare d'employer un courant continu, même si certains travaux existent (Monfore 1968, Lataste 1998). En effet, l'application d'une différence de potentiel à travers un échantillon de béton induit la conduction par l'intermédiaire des ions contenus dans l'eau des pores. Or des interactions existent au niveau des électrodes en contact avec le matériau dû à un phénomène de polarisation et à la création d'une force électromotrice à la surface (Hansson *et al.* 1983). De ce fait, la mesure est perturbée par cette résistance de contact. C'est pourquoi aujourd'hui, la plupart des chercheurs emploient des techniques utilisant le courant alternatif afin de s'affranchir des effets de polarisation.

Une grande variété de type d'échantillons (prismes, cubes, cylindres...) et d'électrodes (électrodes en métal, patch médicaux, électrodes noyées dans le béton au moment du coulage...) est utilisée en laboratoire pour mesurer la résistivité électrique du béton. Une synthèse est présentée dans le Tableau 2. 1.

On remarque que le laiton est l'alliage le plus utilisé avec l'acier en ce qui concerne la nature des électrodes (matériau inoxydable). Dans le cas d'électrodes encastrées directement dans le

béton, le fil et la tige fine (en laiton ou en acier) sont les plus employés. Dans cette configuration, les électrodes restent en place, ce qui rend la mesure très rapide et surtout reproductible. De plus, elle n'est pas perturbée par le contact électrode/béton, et un suivi temporel est facilement réalisable durant une longue période. Enfin il est à noter que la résistivité électrique dépend de la fréquence du courant injecté (Lataste 2002, Guissi 2004).

Tableau 2.1 Synthèse des méthodes de mesure de la résistivité électrique du béton en laboratoire (d'après Elkey *et al.* 1995)

Référence bibliographique	Courant injecté (fréquence)	Géométrie des échantillons	Type d'électrode	Méthode de contact
Hammond <i>et al.</i> 1955	DC ⁽²⁾ (55 - 3 kV) AC ⁽³⁾ (0,002 - 25 kHz)	Cubes et prismes	Plaque en laiton (externe)	Gel de graphite
Monfore 1968	DC (4 - 10 V) AC (2 - 8 V) (0,1 - 10 kHz)	Cubes	Plaque en laiton (externe)	Gel de graphite
Bracs <i>et al.</i> 1970	NR ⁽⁴⁾	Cubes	Fil en acier	Encastré
Bhargava <i>et al.</i> 1978	AC (0,5 à 1,5 V - 0,1 à 50 kHz)	Prismes (4 x 4 x 16 cm)	Pâte de ciment durcie	Encastré
Woelf <i>et al.</i> 1980	AC (6 V - 60 Hz)	Prismes	Tige mince (matériau NR)	Encastré
Hansson <i>et al.</i> 1983	DC (3 à 9 V)	Prismes (9 x 7 x 5 cm)	Plaque d'acier percée (3x3cm)	Encastré
Hope <i>et al.</i> 1985	AC (1 kHz)	Prismes (2,5 x 2,5 x 10cm)	Tige en laiton ou acier	Encastré
Hughes <i>et al.</i> 1985	DC (4 à 8 V) AC (10 V)	Cubes (15 cm)	Plaque en laiton (externe)	Pate de ciment liquide
Hauck 1993	AC	Cylindres	Maille en fer (externe)	Solution électrolytique
Cabrera <i>et al.</i> 1994	AC (10 V)	Cubes (10 cm)	Plaque en laiton (externe)	Pate de ciment liquide

La technique la plus utilisée reste néanmoins la mesure par transparence car généralement on travaille en laboratoire avec une éprouvette cylindrique (voire un carottage), sur lequel on impose un courant électrique entre les deux faces opposées (Figure 2. 4).

⁽²⁾ DC = courant continu.

⁽³⁾ AC = courant alternatif.

⁽⁴⁾ NR = non renseigné.

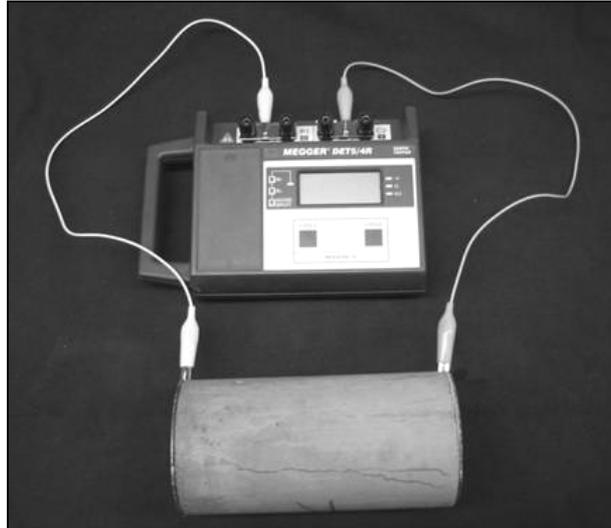


Figure 2. 4 Photographie du principe de la mesure par transparence en laboratoire

Les conditions de travail en laboratoire permettent généralement de diminuer l'influence de certains paramètres pouvant perturber les mesures et de maîtriser les influences externes (température, humidité...). Par exemple, il est possible selon ce procédé d'utiliser une interface (éponge humide, mercure...) pour assurer un bon contact électrique avec l'éprouvette. Cette configuration n'est pas envisageable in situ sans induire de nombreuses contraintes techniques (accessibilité des deux faces) et réglementaires (dans le cas de l'utilisation de mercure !).

2.2.1.2. MESURES SUR SITE

Les mesures de résistivité sur site sont notamment utilisées pour évaluer la probabilité de corrosion des armatures dans le béton armé (Andrade *et al.* 1996). Humidité et concentration ionique élevées sont deux paramètres qui font diminuer la résistivité du béton. Ce sont également des facteurs qui favorisent la corrosion des armatures. La mesure de résistivité peut être utilisée pour cartographier les zones de corrosion probable, de la même manière que la technique du potentiel de corrosion. La différence de principe repose sur le fait que le potentiel de corrosion sert à mesurer les effets d'une corrosion active, alors que la résistivité est un indicateur des facteurs favorisant la corrosion. On peut noter que le potentiel de corrosion est généralement préféré puisque cette technique fait l'objet d'une norme (ASTM C876-91). La mesure de la résistivité présente de nombreuses limites : même si elle est totalement maîtrisée en laboratoire, le passage à l'ouvrage reste encore problématique dans certains cas (Alonso *et al.* 1988). Plusieurs auteurs ont essayé de définir des seuils de résistivité représentatifs de la probabilité de corrosion. Parmi eux, on retrouve Langford *et al.* (1987), Feliu *et al.* (1996) et Polder (2000) : pour des dispositifs de mesure identiques, les seuils sont significativement différents (Tableau 2. 2). Nous verrons tout au long du document qu'il est très difficile de définir des seuils en se basant seulement sur l'exploitation des résultats issus d'une seule technique. Dans le cas présent, la résistivité électrique est notamment sensible à l'humidité du matériau, à sa température, à la qualité du contact et à l'âge du béton. Il est alors illusoire de vouloir définir des seuils de façon universelle afin d'exploiter les résultats de façon complètement quantitative sans évaluer simultanément les conditions du matériau et leurs effets sur la mesure. Il est préférable de

privilégier une interprétation semi quantitative des résultats, en terme de variations relatives d'une propriété.

Tableau 2.2 Gamme de résistivité pour la détermination de la corrosion des armatures (d'après Lataste 2002)

Probabilité de corrosion	Seuils de résistivité électrique ($\Omega.m$)	
	Langford <i>et al.</i> (1987)	Feliu <i>et al.</i> (1996), Polder (2000)
très faible	> 200	> 1000 - 2000
faible à modérée	100 - 200	500 - 1000
élevée	50 - 100	100 - 500
très haute	< 50	< 100

Selon Baroghel-Bouny (2004), la mesure de résistivité peut également servir d'indicateur de durabilité potentielle du béton (Tableau 2. 3).

Tableau 2.3 La résistivité comme indicateur de durabilité (d'après Baroghel-Bouny 2004)

Durabilité potentielle	très faible	faible	moyenne	élevée	très élevée
ρ ($\Omega.m$)	< 50	50 à 100	100 à 250	250 à 1000	> 1000

La mise en place de la mesure de résistivité électrique sur site est relativement simple (voir paragraphe suivant). Cependant, la qualité des mesures reste un problème majeur et plusieurs sources d'erreur sont possibles, dont certaines modifient de façon très significative les résultats obtenus. Nous verrons par la suite l'utilité de l'application d'un protocole de mesure précis avant toute expérience (voir paragraphe 2.2.3.2).

2.2.2. MESURES DE RÉSISTIVITÉ ÉLECTRIQUE SUR SITE

2.2.2.1. EN GÉOPHYSIQUE

Les bases de la prospection électrique dans le domaine de la Géophysique ont été posées par Gray et Wheeler en 1720. Ce sont les premiers à mesurer la conductivité de certaines roches. Plus tard, en 1746, Watson fait état du transport par le sous-sol d'un courant artificiel suivant la composition du terrain. Le problème de la détermination de la résistivité électrique d'un milieu non homogène a été évoqué par Maxwell en 1891. Il a notamment souligné l'importance de l'utilisation de quatre électrodes, plutôt que deux, pour mesurer la résistance générée par un courant dans un milieu conducteur.

Puis, il faudra attendre le début du 20^e siècle pour voir se développer les méthodes électriques sur site. Deux principales écoles sont alors en concurrence. L'école française, la plus active, a connu son origine en 1912 avec Schlumberger qui initie une série d'expériences afin de trouver des ressources minérales. Il met au point la méthode de polarisation spontanée, puis en 1914 celle des cartes de potentiel (mise à la masse) qui s'apparente à la mesure de potentiel de corrosion. En 1920, il effectue le premier relevé de résistivité électrique appliqué à la recherche minière et pétrolière. En 1926, il fonde une société qui donnera naissance un peu plus tard à deux grandes organisations, la Compagnie Générale de Géophysique de France (C.G.G.) et la Schlumberger Well Surveying Corporation aux Etats-Unis. En concurrence, l'école américaine

instituée par Wells, Daft et Williams en 1906, puis par Wenner en 1912, développe une étude théorique du système de mesure de résistivité électrique au moyen de quatre électrodes et définit le théorème de réciprocité appliqué à ce système.

A partir de cette époque, la prospection électrique par courant continu s'est principalement concentrée sur la mise en œuvre et l'interprétation des sondages électriques et des profils (ou cartes) de résistivité (Kunetz 1966). Dans les années 1970 apparaît une nouvelle représentation des données sous la forme de tomographies de résistivité électrique (Edwards 1977). Ce n'est qu'au début des années 1990, avec l'essor des moyens informatiques, des méthodes d'imagerie et des algorithmes d'inversion, que cette dernière se développe (Loke *et al.* 1996, Marescot 2004).

La prospection électrique est actuellement couramment utilisée en géophysique dans des domaines aussi diversifiés que l'hydrogéologie (Marescot *et al.* 2003, Rey *et al.* 2004), la caractérisation des fractures rocheuses, la détection de cavités souterraines (Rahmani 1998), l'imagerie des sites contaminés par mesures de résistivité électrique et de potentiel spontané (Naudet 2004), la détection de la présence de vestiges archéologiques (Dabas *et al.* 1994, Martinaud *et al.* 1999)... Ces techniques d'imagerie électrique suscitent également un grand intérêt pour l'auscultation des ouvrages de génie civil (Lataste 2002, Chouteau *et al.* 2004).

2.2.2.2. PRINCIPE GÉNÉRAL

Les méthodes de prospection électrique par courant continu permettent de déterminer la répartition des matériaux dans le sol par l'intermédiaire de leur résistivité. Pour cela on injecte un courant continu I (source artificielle) par deux électrodes métalliques notées A et B plantées dans le matériau et reliées aux deux bornes d'un générateur de courant continu. On mesure ensuite au moyen de deux autres électrodes notées M et N la différence de potentiel U résultant de la circulation du courant. La résistivité apparente nous renseigne alors sur les propriétés électriques du sol :

$$\rho_a = k \frac{\Delta V}{I}$$

ρ_a = résistivité apparente (en $\Omega.m$),
 k = facteur géométrique (en m),
 ΔV = différence de potentiel (en V),
 I = intensité du courant injecté (en A).

Le facteur géométrique « k » a la dimension d'une longueur et dépend de la dimension et de la géométrie du dispositif ABMN. Il y a quatre manières principales de mettre en œuvre ces méthodes (Lagabrielle 1998) :

- le sondage électrique consiste à mesurer la résistivité apparente du sol pour des longueurs croissantes du dispositif ABMN. Il sert à déterminer la variation de la résistivité du terrain en fonction de la profondeur. Il ne s'applique strictement que si le site a une structure tabulaire (pas de variations de la résistivité dans les directions horizontales) ;
- le traîné de résistivité ou profilage consiste à mesurer les variations latérales de la résistivité apparente le long d'un profil (généralement rectiligne) où l'on déplace le dispositif ABMN en maintenant constantes ses dimensions. Il sert à mettre en

évidence les variations latérales des propriétés des terrains pour une profondeur d'investigation dont l'ordre de grandeur reste constant et dépend de la longueur du dispositif. Si plusieurs traînés sont réalisés le long de profils, on obtient des cartes de résistivité apparente ;

- les panneaux électriques : la combinaison des sondages et du traîné permet de réaliser des tomographies électriques. On construit ainsi des coupes verticales des résistivités électriques apparentes du terrain ;
- les diagraphies : le dispositif est placé sur une sonde descendue dans un forage. En remontant la sonde, on mesure la variation de la résistivité des terrains traversés par le forage, en fonction de la profondeur. Les diagraphies électriques servent (comme les autres diagraphies) à identifier les matériaux, à préciser la position des interfaces, à étudier la fracturation, à calculer la porosité et à fournir des données qui permettent d'interpréter de manière plus sûre les mesures de surface (Lagabrielle 1999).

On mesure ainsi des gradients de potentiel et leurs variations dues à des hétérogénéités électriques présentes dans la zone d'étude.

2.2.2.3. NOTION DE RÉSISTIVITÉ APPARENTE

La résistivité électrique apparente (ρ_a) est la valeur de résistivité mesurée à partir d'une surface. Résultant de la contribution volumique de tous les éléments du milieu traversé par le courant émis en fonction de la distance à la source, elle ne peut être considérée comme la résistivité réelle du matériau. Elle dépend des caractéristiques de chaque élément présent dans la zone d'étude (forme, résistivité électrique...), et de la dimension et de la géométrie du dispositif de mesure. Dans le cas d'un matériau homogène, la résistivité apparente est égale à la résistivité intrinsèque.

2.2.2.4. NOTION DE PROFONDEUR D'INVESTIGATION

La Figure 2. 5 illustre l'évolution de la densité de courant J_x (en $A.m^{-2}$) sur un plan vertical situé à x en fonction de la profondeur « z » et de l'écartement « L » des électrodes d'injection pour un dispositif à deux électrodes (C1 et C2). Nous sommes ici dans un milieu isotrope et homogène.

On remarque alors que la densité de courant diminue très rapidement avec la profondeur (courbe en trait plein). De plus, à une profondeur donnée, elle est maximale pour un écartement précis (courbe en traits pointillés). On constate que 70% de la densité de courant injecté se répartit sur une épaisseur z équivalente à l'écartement L des électrodes. Ces chiffres permettent d'apprécier dans quelle mesure le courant émis en surface par deux électrodes ponctuelles pénètre dans le matériau.

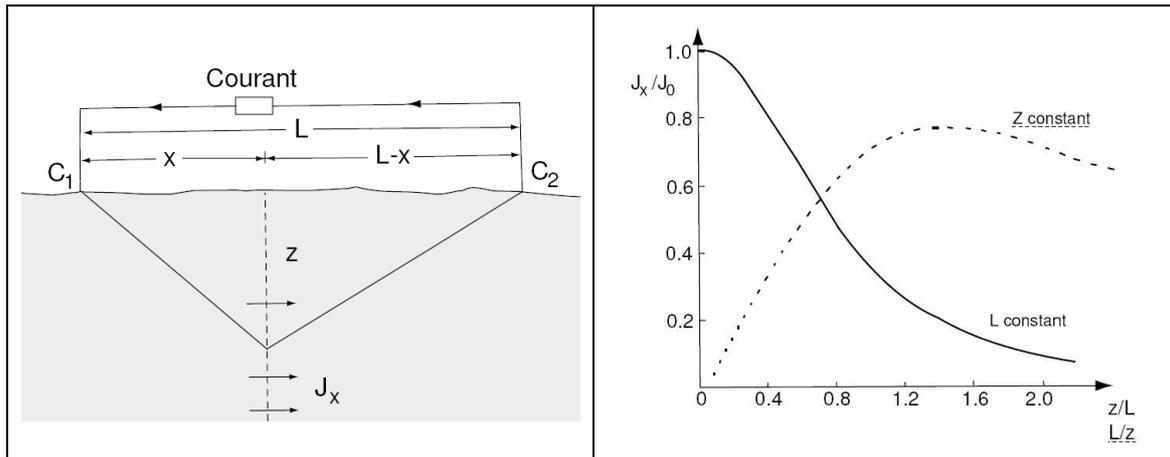


Figure 2. 5 Densité de courant en fonction de la profondeur z et de l'écartement L des électrodes (j_0 est j_x à $z = 0$) pour un dispositif d'injection à deux électrodes (d'après Telford *et al.* 1990)

La Figure 2. 6 illustre le fait que la moitié du courant injecté se propageant dans la direction x ($I_x/I \approx 0,5$) se situe dans une épaisseur égale à la moitié de l'écartement des électrodes ($L/z = 2$). Il ne reste que 30% du courant à circuler sous une épaisseur équivalente à l'écartement des électrodes ($L/z = 1$). La profondeur d'investigation étant directement liée à l'écartement des électrodes, on comprend alors la grande difficulté d'aller chercher des informations à grande profondeur lorsque les points d'injection du courant demeurent en surface.

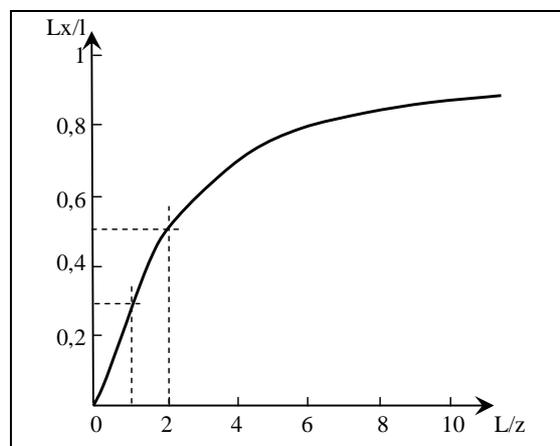


Figure 2. 6 Fraction du courant circulant sous une épaisseur z pour un écartement L (d'après Telford *et al.* 1990)

Les deux figures présentées ci-dessus (Figure 2. 5 et Figure 2. 6) illustrent la notion de profondeur d'investigation dans le cas d'un terrain homogène et pour un dispositif d'injection à deux électrodes. Les relations existantes entre les différents paramètres influençant la profondeur d'investigation sont trop complexes pour être utilisées couramment (Antoine *et al.* 1980). Ainsi, il est trop simpliste d'affecter une valeur de résistivité à une profondeur donnée puisque c'est tout un volume qui est investigué. La valeur de résistivité mesurée correspond à une résistivité apparente (ρ_a).

2.2.2.5. PRINCIPE DE SUPERPOSITION

Généralement, le courant est injecté par deux électrodes d'injection notées A et B. Un courant d'intensité +I envoyé par A sera recueilli par B (-I). D'après le principe de superposition, le potentiel en un point M, distinct de A et B, sera le même si l'on envoie indépendamment un courant +I par A ou un courant -I par B.

2.2.2.6. PRINCIPE DE RÉCIPROCITÉ

Dans un milieu quelconque, homogène ou hétérogène, isotrope ou anisotrope, le potentiel créé en un point M par un courant envoyé en A est égal à celui que l'on mesurerait en A si M devenait source d'émission. En pratique, le courant est envoyé entre deux pôles A et B et l'on mesure la différence de potentiel ΔV entre les deux points M et N, les principes de superposition et de réciprocité apprennent alors que cette différence de potentiel est la même que celle que l'on observerait entre A et B si le courant était envoyé entre M et N.

2.2.2.7. DISPOSITIFS UTILISÉS SUR SITE

Tout dispositif de mesure comporte en général quatre électrodes (ABMN) : respectivement deux pour l'injection du courant et deux pour la mesure du potentiel ΔV . Elles permettent toutes de trouver la résistivité électrique apparente du sous-sol à partir de mesures de ΔV et I. Toutes les configurations ne sont qu'une variation sur le thème du quadripôle AMNB, en terme de géométrie et de dimension (Figure 2. 7).

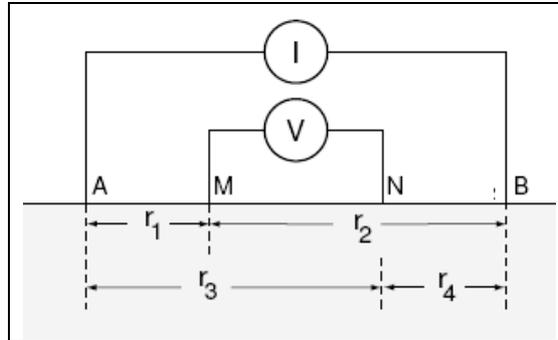


Figure 2. 7 Schéma de principe de la mesure de la résistivité apparente par dispositif quadripolaire (d'après Chouteau *et al.* 2005)

L'expression de ρ_a pour chacune des configurations dérive de l'équation de base avec « k » le facteur géométrique calculé comme suit :

$$k = \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_3}\right) - \left(\frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_4}\right)}$$

Avec r_1 , r_2 , r_3 et r_4 respectivement les distances AM, BM, AN et BN.

a. Configuration à une électrode

Cette méthode est basée sur la mesure de la résistivité électrique du béton d'enrobage, c'est-à-dire entre la surface du béton et la barre d'armature métallique (Feliu *et al.* 1996). La mesure se

fait alors par l'injection d'un courant électrique entre l'électrode de surface et le réseau d'armatures (Figure 2. 8).

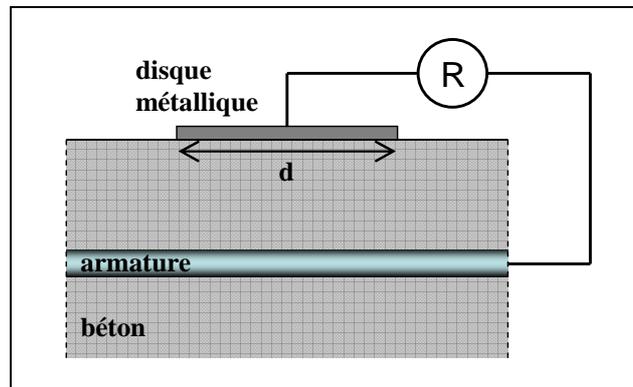


Figure 2. 8 Principe du dispositif de mesure avec une électrode

La résistivité du béton est calculée en utilisant l'équation suivante :

$$\rho = 2.R.d$$

ρ = résistivité électrique (en $\Omega.m$),

d = diamètre de l'électrode de surface (en m),

R = résistance électrique donnée par la chute ohmique à partir d'une impulsion électrique entre le disque métallique et l'armature (en Ω).

L'inconvénient principal de cette technique est sa sensibilité à la résistance du contact entre le béton et l'électrode (Broomfield 1997), mais aussi la nécessité de se connecter au réseau d'armatures.

b. Configuration à deux électrodes

La méthode est basée sur l'injection d'un courant alternatif entre deux électrodes placées à la surface du béton et la mesure de la différence de potentiel entre les deux mêmes électrodes. C'est une technique simple mais peu fiable compte tenu de nombreux inconvénients et des sources d'erreur potentielles.

L'inconvénient majeur de cette configuration est que la mesure est très influencée par la zone de béton située à proximité de l'électrode. Millard (1991) a indiqué que 90% de la résistivité électrique mesurée est représentative d'une zone d'environ dix fois le rayon de l'électrode. Le rayon de contact a donc un effet significatif sur la mesure : un rayon de contact réduit donnera une valeur plus élevée que pour une électrode de grand rayon, pour la même zone d'investigation.

Afin de réduire ce problème de contact, les électrodes peuvent être placées dans des trous remplis d'un milieu conducteur (Millard 1991). On note cependant que la réalisation de ces trous demande du temps et est semi-destructive.

c. Configuration à quatre électrodes

Cette méthode, empruntée à la géophysique, est actuellement la technique la plus répandue pour la mesure de la résistivité électrique du béton sur le terrain. Elle a été développée par Wenner (1915) pour mesurer la résistivité des sols. Les quatre électrodes sont espacées de la

même distance « a ». Un courant alternatif I est injecté entre les deux électrodes externes tandis que la différence de potentiel ΔV est mesurée entre les électrodes intérieures (Figure 2. 9).

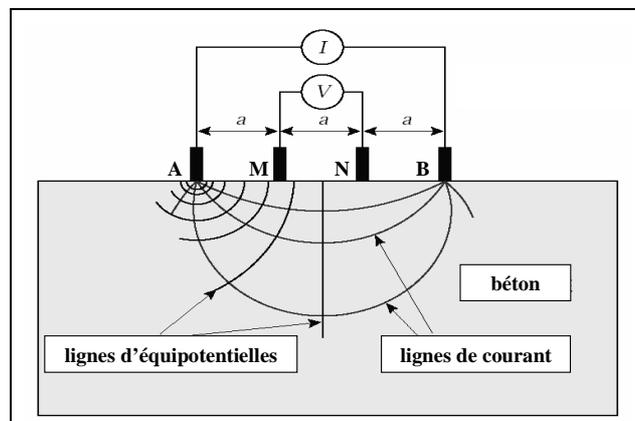


Figure 2. 9 Dispositif Wenner pour la mesure de la résistivité électrique du béton (d'après Broomfield *et al.* 2002)

Un avantage immédiat de cette configuration par rapport à la technique avec deux électrodes est qu'elle donne la résistivité électrique d'une zone située entre les électrodes intérieures : on a une plus grande zone d'investigation, supérieure au rayon des électrodes. De plus, l'influence des granulats est plus faible que dans la configuration à deux électrodes. Le diamètre des granulats s'excède pas 2,5 cm pour des bétons ordinaires. En pratique, pour la plupart des structures en béton, un espacement de 5 cm entre les électrodes est utilisé (Millard 1991).

La résistivité électrique obtenue à partir de la mesure utilisant ce dispositif à quatre électrodes est influencée par (Gowers *et al.* 1993) : les contraintes géométriques du matériau (effet de bords, effet de fond...), le contact entre la surface du béton et les électrodes, l'hétérogénéité du matériau, la présence d'armatures métalliques et la résistivité électrique de la couche superficielle de béton. L'influence de ces facteurs sera détaillée dans le Chapitre 4.

2.2.3. LE DISPOSITIF UTILISÉ : LE QUADRIPOLE CARRÉ

Cette configuration est destinée à mettre en évidence des phénomènes d'anisotropie. Les électrodes sont alors arrangées selon un carré et les mesures se font de la façon suivante (Figure 2. 10) :

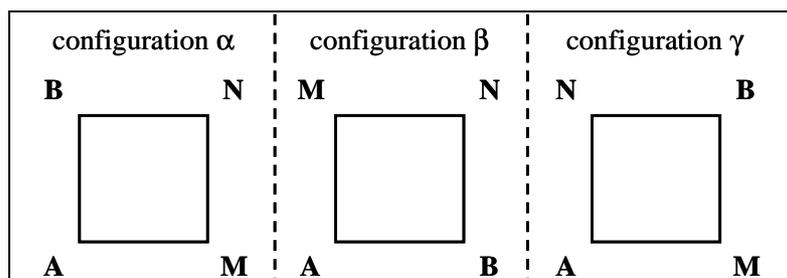


Figure 2. 10 Configurations possibles pour un dispositif quadripolaire carré

Certains auteurs définissent le sens d'injection du courant par rapport à la géométrie de la structure auscultée. Ils parlent ainsi de résistivité longitudinale et transversale au lieu de configurations α et β . La résistivité électrique est alors calculée en utilisant l'équation suivante :

$$\rho_a = \frac{2\pi a}{2 - \sqrt{2}} \frac{\Delta V}{I}$$

- ρ_a = résistivité électrique apparente (en $\Omega.m$),
 a = espacement entre les électrodes de mesure (en m),
 ΔV = différence de potentiel (en V),
 I = intensité du courant (en A).

2.2.3.1. AVANTAGES

a. Géométrie

Dans leurs travaux, Habberjam *et al.* (1967) ont montré que la configuration « quadripôle carré » est moins sensible à l'orientation des électrodes et plus sensible à la position du dispositif.

Hesse *et al.* (1986) ajoutent que certaines configurations utilisées en prospection électrique induisent un biais de mesure. Ce biais, l'anisotropie apparente, est différent de l'anisotropie réelle du matériau que l'on cherche à estimer. Ils montrent que le dispositif quadripolaire carré est celui qui présente la plus faible anisotropie apparente. Darboux-Afouda *et al.* (1989) exploitent cet avantage lors de l'étude des milieux fissurés et pour la recherche d'aquifères en déterminant l'anisotropie du milieu suite aux mesures pour différentes orientations de l'injection. Habberjam (1972) utilise également cet aspect pour l'étude des pendages des couches.

Un autre avantage de cette géométrie est la possibilité d'effectuer plusieurs mesures pour une seule mise en place du dispositif, en faisant varier seulement le sens d'injection du courant. Pour cela, notre dispositif est équipé d'un commutateur (Figure 2. 11).

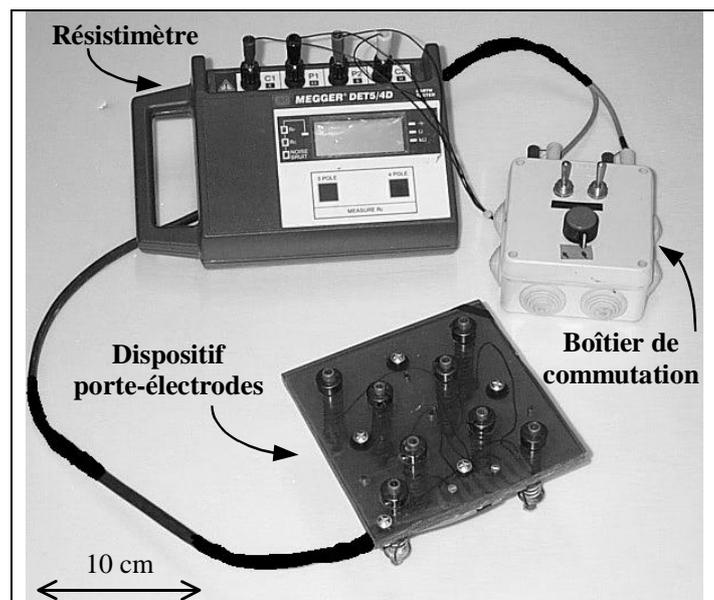


Figure 2. 11 Photographie du dispositif quadripolaire carré de 5 et 10 cm de côté (d'après Lataste 2002)

Ces différentes équipes définissent des grandeurs propres aux mesures effectuées par dispositif quadripolaire carré (Tableau 2. 4).

Tableau 2. 4 Grandeurs mesurées propres au dispositif quadripolaire carré

résistivité apparente moyenne	$\rho_{am} = \sqrt{\rho_{\alpha} \cdot \rho_{\beta}}$
résistivité médiane	$\bar{\rho}_a = \frac{\rho_{\alpha} + \rho_{\beta}}{2}$
coefficient d'allongement	$L = \frac{\rho_{\alpha}}{\rho_{\beta}}$
coefficient d'anisotropie apparente	$\lambda = \sqrt{L} = \sqrt{\frac{\rho_{\alpha}}{\rho_{\beta}}}$
logarithme de l'anisotropie	$\log_{10} An = \log_{10} \left(\frac{\rho_{\alpha}}{\rho_{\beta}} \right)$
anisotropie directionnelle (AIR)	$AIR = \frac{2R_{\gamma}}{R_{\alpha} + R_{\beta}}$

ρ_{α} = résistivité apparente mesurée en configuration α (en $\Omega.m$),

ρ_{β} = résistivité apparente mesurée en configuration β (en $\Omega.m$),

R_{α} = résistance mesurée en configuration α (en Ω),

R_{β} = résistance mesurée en configuration β (en Ω),

R_{γ} = résistance diagonale (en Ω).

Le rapport d'anisotropie directionnelle (AIR) permet d'appréhender l'anisotropie électrique du matériau. Dans le cas d'un matériau homogène isotrope, l'AIR est nulle puisque la résistance diagonale est nulle. En effet, l'axe défini par les deux électrodes de mesure M et N est confondu avec la ligne d'équipotentiel nulle. La différence de potentiel mesurée entre ces deux électrodes est alors égale à zéro.

b. Dimensions

En prospection géoélectrique, Darboux-Afouda *et al.* (1989) travaillent avec cette configuration en utilisant un quadripôle carré de 100 m de coté. Hesse *et al.* (1986) emploient des dispositifs dont les dimensions n'excèdent pas le mètre.

Dans notre cas, nous avons besoin d'un dispositif peu encombrant et facilement manipulable, donc de petite taille. De plus, nous souhaitons ausculter la zone d'enrobage des aciers, lieu de la plupart des pathologies dans le béton armé : la profondeur d'investigation n'excède alors pas quelques centimètres. Par ailleurs, l'épaisseur des différentes parties d'ouvrages auscultés varie de quelques centimètres à quelques décimètres.

Pour l'auscultation du béton, deux critères importants permettent de choisir les dimensions du dispositif : l'influence des granulats et les profondeurs d'investigation souhaitées.

Lors de l'utilisation d'un dispositif quadripolaire de type Wenner, Millard (1991) montre que les granulats perturbent la mesure de résistivité électrique. Avec un écartement de 5 cm entre électrodes, c'est à dire 2,5 fois le diamètre du plus gros granulats, il indique que l'erreur de mesure

engendrée est inférieure à 5%. Les volumes investigués par ce type de dispositif sont du même ordre de grandeur que ceux étudiés avec notre configuration : l'écartement de 5 cm conditionne le volume ausculté. On peut donc considérer ces résultats comme représentatifs.

La profondeur d'investigation de la mesure étant de l'ordre de l'écartement entre électrodes, deux tailles de dispositif sont choisies : un quadripôle carré de 5 et 10 cm de côté (noté par la suite Q5 et Q10).

2.2.3.2. PROTOCOLE DE MESURE

Une méthodologie générale et relativement simple pour la mesure de la résistivité électrique du béton de surface sur site peut être définie sur la base de recommandations classiques (Broomfield *et al.* 2002) et de l'expérience acquise par des campagnes de mesure sur le terrain. Ainsi, le mode opératoire de la mesure peut se décomposer de la façon suivante (Lataste 2002) :

- considérations préalables sur l'état général de la surface de béton à ausculter (géométrie, rugosité...), nettoyage de la surface (salissures, mousses...);
- repérage : choix et identification de la zone de mesure (généralement, on choisit en plus une zone saine comme témoin) ; repérage précis de la zone d'étude sur l'ouvrage par un système de coordonnées ; repérage et positionnement des barres d'armatures dans le béton armé au moyen d'un pachomètre, des plans de construction de l'ouvrage ou autres données ;
- définition du protocole de travail. On peut choisir de réaliser des mesures pour différentes orientations du dispositif sur la surface (configuration α et β). Dans certains cas, il faut humidifier le parement préalablement à la mesure afin d'abaisser la résistance de contact (les mesures sont quasiment impossibles sur une surface sèche) ;
- choix d'un point de référence afin d'étudier la répétabilité des mesures ;
- mesures selon un pas régulier. Il est à définir en fonction de la problématique : détection d'une hétérogénéité, étude d'un gradient, caractérisation d'une fissuration déjà visible... Pratiquement, il est intéressant de réaliser des mesures le long d'un profil en effectuant un aller-retour, même si cela double le temps de mesure. Cela permet de multiplier les mesures et ainsi d'augmenter le rapport signal/bruit. Ainsi, lors du traitement des données, cela permet d'éliminer des valeurs suspectes dues à une mauvaise manipulation et de s'assurer de l'absence de dérive (ou le cas échéant de la corriger) ;

Sur site, plusieurs facteurs perturbent la mesure (voir Chapitre 4). Le manipulateur doit alors prendre le plus grand soin lors de la réalisation des mesures afin de minimiser les sources d'erreur (bruits de mesure, dérive...) et d'évaluer les conditions de mesures. Ainsi, cela permet de garantir la bonne interprétation des résultats.

2.2.3.3. EXPLOITATION DES MESURES

a. Résistivité électrique

Le dispositif choisi est spécifiquement développé pour l'auscultation des ouvrages in situ. Lataste *et al.* (1999) ont montré sur des éprouvettes de laboratoire (les paramètres extérieurs étant totalement maîtrisés) que la corrélation entre les résistivités mesurées par le quadripôle carré relativement à celles obtenues par transparence est de 98,8%.

Sur site, la profondeur d'investigation ou la structure interne du matériau ne sont qu'estimées lors de la mesure de la résistivité électrique. De plus, de nombreux paramètres influencent la résistivité, tel que la nature du matériau, la température et l'humidité. En l'absence d'une maîtrise totale de l'ensemble de ces paramètres sur site, il apparaît encore difficile d'utiliser la mesure de résistivité électrique en terme de valeurs absolues.

On s'attachera plus aux variations de résistivité électrique, qu'à la valeur exacte de la mesure. L'exploitation en relatif peut alors être menée de plusieurs façons selon la problématique considérée : exploitation des variations relatives sur une surface (pour effectuer un zonage d'ouvrage), sur une population d'ouvrages présentant des caractéristiques similaires (afin de distinguer les différences entre ouvrages), ou sur le temps (mesures répétées sur un même ouvrage à différentes dates pour suivre son évolution dans le temps).

b. Anisotropie

La résistivité électrique d'un matériau dépend de la direction du courant qui le traverse, on dit qu'il est anisotrope. C'est pourquoi, il apparaît intéressant de pouvoir réaliser des mesures de résistivité apparente pour différentes orientations d'injection du courant électrique dans le matériau (configurations α et β). Le rapport des résistivités apparentes mesurées pour ces deux orientations perpendiculaires du dispositif nous permet d'obtenir une information sur l'anisotropie électrique réelle du matériau (Lataste 2002).

La présence d'armatures dans le béton armé, de stratification du matériau, ou encore de fissuration rend le béton anisotrope. Une façon d'évaluer ces paramètres est l'étude des variations de l'anisotropie. Ces informations ne sont pas forcément accessibles si l'on s'intéresse seulement aux variations de la résistivité électrique apparente.

Pratiquement, nous représenterons les variations du logarithme décimal de l'anisotropie ($\text{Log}_{10}An$), afin d'éviter tout biais lié au sens choisi pour le rapport des résistivités. De cette manière, la valeur du logarithme décimal de l'anisotropie sera la même, au signe près, quel que soit le sens du rapport. On note que, pour un matériau isotrope, le logarithme décimal sera nul.

2.3 CONCLUSION

Parmi les méthodes d'END à disposition, la famille des **méthodes électriques** regroupe la résistivité, le potentiel de corrosion et la vitesse de corrosion. Ces méthodes exploitent la capacité de circulation du courant électrique dans le béton (conduction essentiellement de type électrolytique). Aujourd'hui en génie civil, ces techniques sont surtout utilisées pour la caractérisation de la corrosion des armatures du béton armé.

Plus spécifiquement à la méthode des résistivités, les notions de **résistivité apparente ρ_a** (résistivité d'un certain volume investigué) et de **profondeur d'investigation** illustrent la difficulté de l'interprétation des mesures. La sensibilité de la méthode à de nombreux paramètres (formulation du béton, humidité, armatures, bords...) et sources de biais peut dissimuler l'information recherchée. Un **protocole de mesure** (protocole d'humidification et de séchage) a été développé afin de minimiser les différentes sources d'erreurs et ainsi d'interpréter correctement les résultats. De plus, un dispositif spécifiquement adapté à la mesure sur des ouvrages de génie civil est utilisé. Sa géométrie en **quadripôle carré**, avec deux sens d'injection du courant électrique, et son échelle d'investigation (5 et 10 cm entre électrodes) permettent d'envisager la caractérisation fine du béton d'enrobage. L'exploitation des résultats en terme de **résistivité** et d'**anisotropie** électrique enrichit l'intérêt pour cette méthode.

Au cours de ces dernières années, l'expérience acquise par le CDGA et par le GRAI dans ce domaine assure la capacité de la méthode des résistivités à être appliquée avec succès. De plus, cette technique d'END permet d'offrir des **réponses originales** aux problèmes des gestionnaires dans le cadre du diagnostic des ouvrages en béton.

Nous souhaitons donc contribuer au développement de la mesure de résistivité électrique dans le domaine du génie civil et à son application plus spécifiquement sur site.

CHAPITRE 3 : LES PROPRIÉTÉS THERMIQUES DU BÉTON

« Le rayonnement infrarouge émis par un corps contient un certain nombre d'informations caractéristiques de la nature de ce corps, de son histoire récente et de son agencement. La saisie de ces informations par un système d'acquisition adapté et un traitement approprié permet d'atteindre et de contrôler certains paramètres difficilement ou non directement mesurables » (Gaussorgues 1999).

Au travers de ce chapitre, nous analyserons les propriétés thermiques du béton, en expliquant successivement les différents mécanismes de transmission de la chaleur mis en jeu, les paramètres thermiques mesurables (conductivité, diffusivité, effusivité et chaleur massique) ainsi que les différentes méthodes de mesure de ces paramètres. La caractérisation thermique d'un matériau conducteur implique classiquement la détermination de deux paramètres. Il peut s'agir soit de la conductivité et de la chaleur massique, soit de la diffusivité et de l'effusivité.

Enfin, nous nous attarderons plus spécifiquement sur la thermographie infrarouge passive, à ses avantages, à ses limites et à ses applications dans le cadre du diagnostic des ouvrages en béton, en utilisant une caméra infrarouge (voir également annexe 2).

3.1 LES MÉCANISMES DE TRANSMISSION DE LA CHALEUR

Un système thermodynamique naturel ou artificiel est le lieu d'écoulements thermiques des régions chaudes vers les régions froides dès qu'il y a un déséquilibre thermique entre deux de ces points (Carslaw *et al.* 1959). On distingue alors trois modes d'écoulement de la chaleur : par conduction, par convection et par rayonnement. Chaque mode est régi par des lois différentes bien spécifiques.

3.1.1. NOTION DE TEMPÉRATURE ET DE FLUX THERMIQUE

La température d'un corps est une grandeur caractéristique de son niveau énergétique. Elle correspond à l'énergie d'agitation des molécules. Les transferts d'énergie sont déterminés à partir de l'évolution dans l'espace et dans le temps de la température.

Si l'on réunit tous les points de l'espace qui ont la même température, on obtient une surface dite isotherme. La variation de température par unité de longueur est maximale le long de la normale à cette surface isotherme. On caractérise cette variation par le gradient de température. Sous l'influence de ce gradient, la chaleur s'écoule des régions chaudes vers les régions froides. La quantité de chaleur alors transmise par unité de temps sur la surface est appelée le flux de chaleur.

Dans un système défini par ses limites dans l'espace, le flux de chaleur peut être stocké, généré, entrant ou sortant dans le système. Le bilan d'énergie du système est alors régi par le 1^{er} principe de la thermodynamique :

$$\text{flux}_{\text{entrant}} + \text{flux}_{\text{généré}} = \text{flux}_{\text{sortant}} + \text{flux}_{\text{stocké}}$$

L'établissement de l'expression de ces différents flux de chaleur permet d'obtenir une équation différentielle (l'équation générale de conduction de la chaleur) dont la résolution permet de connaître l'évolution de la température (T en K) en chaque point du système (x en m) :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(-k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + P = \rho_v \cdot c_m \cdot \frac{\partial T}{\partial t}$$

- k = la conductivité thermique (en W.m⁻¹.K⁻¹),
- P = l'énergie produite au sein même du matériau (en W.m⁻³),
- ρ_v = la masse volumique (en kg.m⁻³),
- c_m = la chaleur massique (en J.kg⁻¹.K⁻¹).

3.1.2. LA CONDUCTION

3.1.2.1. DÉFINITION

La conduction thermique est définie comme étant le mode de transmission de la chaleur provoquée par la différence de température (un gradient) entre deux régions d'un milieu immobile. Elle s'applique aux solides, liquides et aux gaz (tant que ceux-ci peuvent être considérés comme immobiles), ou encore entre deux milieux en contact physique. Il n'y a pas de déplacement appréciable des molécules (De Vriendt 1982).

D'après De Vriendt (1982), la liaison entre la physique interne de la matière et la théorie de la conduction n'est pas encore totalement achevée. Dans les solides amorphes, liquides et gaz, on admet que la conduction résulte du transfert direct des mouvements moléculaires, de molécule à molécule, au niveau de leur point de contact. Dans les solides plus organisés (tels que des cristaux), les mouvements des atomes seraient convertis en mouvements vibratoires de tout le réseau cristallin. Dans les métaux, on assisterait à un déplacement d'électrons libres.

3.1.2.2. ÉQUATION DE FOURIER

La loi fondamentale de la conduction thermique a été énoncée par Fourier en 1822. Dans un corps homogène, la quantité de chaleur qui traverse l'unité de surface par unité de temps (ou densité de flux) est proportionnelle au gradient de température :

$$q = -k.A \cdot \frac{dT}{dx}$$

- q = le flux de chaleur traversant le plan d'abscisse x (en W),
- k = la conductivité thermique du matériau (en W.m⁻¹.K⁻¹),
- A = la surface normale au flux thermique (en m²),
- $\frac{dT}{dx}$ = le gradient de température au point x considéré, c'est-à-dire la variation de température par unité de longueur dans la direction x.

Dans l'équation précédente, 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.

3.1.3. LA CONVECTION

3.1.3.1. DÉFINITION

La convection thermique représente le phénomène de transfert de la chaleur d'un point à un autre par mouvement d'ensemble de ses molécules. Ce mode de transmission, contrairement à la conduction, implique le déplacement d'un fluide (liquide ou gazeux). Elle intervient notamment dans le cas des échanges thermiques au voisinage d'une surface.

On distingue la convection libre de la convection forcée. Dans les fluides, l'existence d'un champ de température non uniforme modifie localement la masse volumique de ces fluides et entraîne, dans un champ de forces volumiques (pesanteur), des mouvements de convection libres (le fluide chaud tend à monter). Si le fluide caloporteur est entraîné artificiellement par une source extérieure (pompe, ventilateur, cheminée...), le flux de chaleur dit de convection forcée augmente avec la vitesse de ce fluide.

Des courants de convection naturelle naissent. Ainsi, il est pratiquement impossible d'assister à de la conduction pure dans un fluide dès que la moindre différence de température existe.

3.1.3.2. LOI DE NEWTON

La convection thermique fait appel à de nombreuses lois dynamiques, dont la loi de Newton. C'est une relation simple qui permet d'exprimer le phénomène global de la convection (De Vriendt 1982) :

$$q = h.A.(T_s - T_\infty)$$

q = le flux de chaleur traversant le plan d'abscisse x (en W),

h = le coefficient de surface ou conductance spécifique du film ou coefficient de convection ou (en $W.m^{-2}.K^{-1}$),

A = la surface normale à la direction du flux thermique (en m^2),

T_s = la température de la surface considérée (en K),

T_∞ = la température du fluide loin de la surface (en K).

Le coefficient de surface « h » varie de point en point de la surface. Il dépend des caractéristiques géométriques de la surface, de la géométrie du système, de la vitesse vectorielle du flux, de ses propriétés physiques et dans certains cas de la différence de température entre la surface et la température loin de celle-ci.

3.1.4. LE RAYONNEMENT

3.1.4.1. DÉFINITION

Tout corps (même dans le vide) dont la température est supérieure au zéro absolu (soit $-273,15^\circ C$) émet en permanence un rayonnement électromagnétique et gagne de l'énergie par absorption du rayonnement ambiant. Le processus d'émission est lié à l'agitation moléculaire interne de la matière. Ce mode de transmission de la chaleur a été mis en évidence par William Herschel en 1800.

Le rayonnement thermique est le processus d'écoulement de la chaleur par lequel de l'énergie calorifique se transmet entre deux objets de température différente, et séparés dans l'espace par un milieu transparent (air ou vide).

3.1.4.2. LE SPECTRE ÉLECTROMAGNÉTIQUE

Le spectre des radiations électromagnétiques est divisé arbitrairement en régions déterminées en fonction des générateurs et récepteurs appropriés (Figure 3. 1).

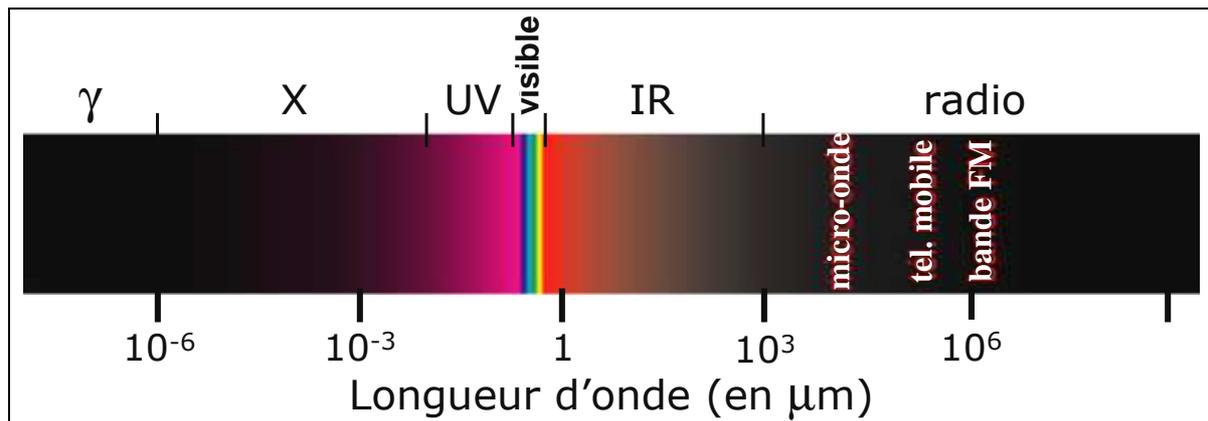


Figure 3. 1 le spectre des radiations électromagnétiques

Le spectre infrarouge est divisé en trois grandes régions selon le capteur utilisable pour les détecter (Gaussorgues 1999) :

- 0,75 à 1,5 μm : l'infrarouge proche décelé par les émulsions photographiques,
- 1,5 à 20 μm : l'infrarouge moyen décelé par des détecteurs thermiques photoconducteurs ou photovoltaïques,
- 20 à 1000 μm : l'infrarouge lointain décelé par des détecteurs thermiques.

Ce rayonnement infrarouge est invisible par l'œil humain. Il est compris entre le spectre visible (0,31 à 0,79 μm) et les radiations micro-ondes.

3.1.4.3. PROPRIÉTÉS FONDAMENTALES DU CORPS NOIR

Le corps noir est un milieu idéal qui absorbe toutes les radiations qu'il reçoit indépendamment de son épaisseur, de sa température, de l'angle d'incidence et de la longueur d'onde du rayonnement incident. Il est important de noter que tous les corps noirs rayonnent de la même manière et qu'un corps noir rayonne plus qu'un corps non noir à la même température.

3.1.4.4. LA LOI FONDAMENTALE DE STEFAN-BOLTZMANN

Le mode de transfert par rayonnement thermique est par nature très différent des deux précédents : la propagation se fait sans support matériel et dans toutes les directions à la vitesse de la lumière dans le vide. Il est régi par la loi fondamentale de Stefan-Boltzmann (établie en 1879), qui s'écrit, dans le cas d'un corps noir :

$$q = \sigma \cdot A \cdot T^4$$

- q = le flux de chaleur radiante émis par une surface idéale, dite noire (en W),
 σ = la constante universelle de Boltzmann (= $5,666977 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$),
 A = l'aire de la surface (en m^2),
 T = la température absolue de la surface (en K).

3.1.4.5. LES CORPS COMMUNS

Les objets communs n'absorbent pas toute l'énergie incidente, on ne parle plus de corps noirs. On parle de corps gris dont le pouvoir absorbant est indépendant de la longueur d'onde du rayonnement qu'il reçoit. L'énergie incidente d'un corps commun peut alors être :

- une partie absorbée A, transformée en énergie calorifique ;
- une partie réfléchie R : une fraction de l'énergie incidente est renvoyée dans une direction bien déterminée (énergie spéculaire) ou dans toutes les directions (énergie diffuse) ;
- une partie transmise T : cette fraction de l'énergie pénètre dans le matériau en gardant sa forme d'énergie radiative et en suivant les lois de la réfraction. Après avoir traversé le milieu, ce flux subit à nouveau des réflexions à l'interface.

Chacune de ces fractions d'énergie est fonction de la longueur d'onde, de l'état de surface, de la température de l'objet étudié et de l'angle d'incidence. D'après les lois de la conservation de l'énergie, on a :

$$A + R + T = 1$$

Or, l'énergie restituée au milieu extérieur doit être égale à l'énergie reçue par le corps (loi de Kirchoff). On introduit alors le terme d'émissivité spectrale ϵ qui représente cette énergie restituée et qui est égale à l'énergie absorbée. On a donc en remplaçant A par ϵ :

$$\epsilon + R + T = 1$$

Des valeurs particulières sont remarquables pour certains objets :

- pour un corps gris, l'émissivité est constante quelle que soit la longueur d'onde ;
- pour un corps noir, l'émissivité est maximale ($\epsilon = 1$) quelle que soit la longueur d'onde et la direction (on parle de corps lambertien) ;
- pour un corps opaque, la partie transmise T est nulle lorsque son environnement émet une luminance⁽⁵⁾ isotrope, c'est-à-dire que la température d'environnement est uniforme. On obtient donc : $\epsilon + R = 1$;
- pour un corps brillant, la partie réfléchie est voisine de 1 et l'émissivité est proche de zéro ($\epsilon \approx 0$).

On assimilera le béton à un corps gris dans la bande spectrale utilisée. Dans ce cas, la loi fondamentale de Stefan-Boltzmann s'écrit :

⁵ Quotient de l'existance (quotient du flux quittant une surface par l'aire de cette surface, exprimée en $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$) quittant une surface par un angle solide autour d'une direction donnée (en $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{stéradian}^{-1}$). La luminance est une grandeur directionnelle, qui dépend de l'état de surface de la source, de sa nature chimique, de l'angle que fait la direction envisagée avec la normale et de la température de la source (De Vriendt 1984).

$$\phi = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4$$

- ϕ = la densité de flux émise par la surface (en $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$),
 ε = l'émissivité du matériau,
 σ = la constante universelle de Boltzmann ($5,666977 \cdot 10^{-8} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}$),
 T = la température absolue de la surface (en K).

3.1.4.6. ÉMISSIVITÉ

Pour évaluer la température d'un objet, il est indispensable de connaître son émissivité. Elle est définie comme étant le rapport de la luminance émise par un corps et de la luminance émise par le corps noir, à la même température. On la note « ε » et elle s'exprime sans unité.

Ses valeurs varient d'un matériau à l'autre (Tableau 3. 1) :

Tableau 3. 1 Table des émissivités de certains matériaux

Matériau	Émissivité	Source
Or	0,02	FLIR 2001
Gravier	0,28	FLIR 2001
Neige	0,80	FLIR 2001
Bois	0,80 - 0,90	De Vriendt 1984
Brique	0,81 - 0,86	FLIR 2001
Plâtre	0,86 - 0,90	FLIR 2001
Sable	0,90	FLIR 2001
Béton	0,94	Maldague <i>et al.</i> 2001
Quartz	0,93	FLIR 2001
Peau	0,98	Maldague <i>et al.</i> 2001
Eau	0,993	Sabins 1987

L'émissivité dépend de :

- l'angle d'incidence, c'est-à-dire l'angle entre le rayon incident et la normale à la surface. L'eau se comporte comme un corps noir pour une incidence normale et devient un miroir pour une incidence rasante. Pour la plupart des objets, on estime que la luminance n'est pas fonction de l'angle d'incidence pour un angle d'observation inférieur à 60° (De Vriendt 1984) ;
- la rugosité de la surface : dans le cas du béton, la rugosité a une longueur d'onde bien supérieure à celle de la bande spectrale utilisée (2 à 12 μm). Pour une incidence normale, cela lui confère une forte valeur d'émissivité et donc une faible réflectivité. Par ailleurs, un matériau lisse a une émissivité plus faible que le même matériau rugueux (Maldague *et al.* 2001). Une valeur incorrecte de l'émissivité peut fausser le résultat et ainsi biaiser l'interprétation ;
- la longueur d'onde : dans le cas des matériaux non-conducteurs tels que le béton, l'influence de la longueur d'onde est en général très faible (De Vriendt 1984). Dans la bande spectrale utilisée (2 à 12 μm), elle est considérée comme indépendante de la longueur d'onde.

3.1.4.7. LE RÔLE DE L'ATMOSPHÈRE

Située entre le capteur infrarouge et la source de rayonnement (objet étudié), l'atmosphère est à l'origine de perturbations sur la mesure. Elle influence le signal thermique en absorbant une partie du rayonnement infrarouge et en émettant des rayonnements parasites.

Le constituant atmosphérique qui détermine l'absorption la plus importante dans l'infrarouge est l'eau (ou la vapeur d'eau). On trouve ensuite, dans une moindre mesure, le gaz carbonique et les autres gaz de l'atmosphère (ozone, oxyde d'azote, oxygène...). L'absorption due à l'eau est difficile à évaluer du fait des variations de sa concentration dans le temps selon l'humidité relative de l'air, la température, la pression ou l'altitude.

Les principales fenêtres de transmission (bandes spectrales à l'intérieur desquelles l'absorption due à l'eau est très faible) pour le rayonnement infrarouge sont (Figure 3. 2). Le graphique représente le pourcentage de transmission du rayonnement infrarouge (transmittance) à travers 1 km d'atmosphère. Cette transmittance dépend de la longueur d'onde.

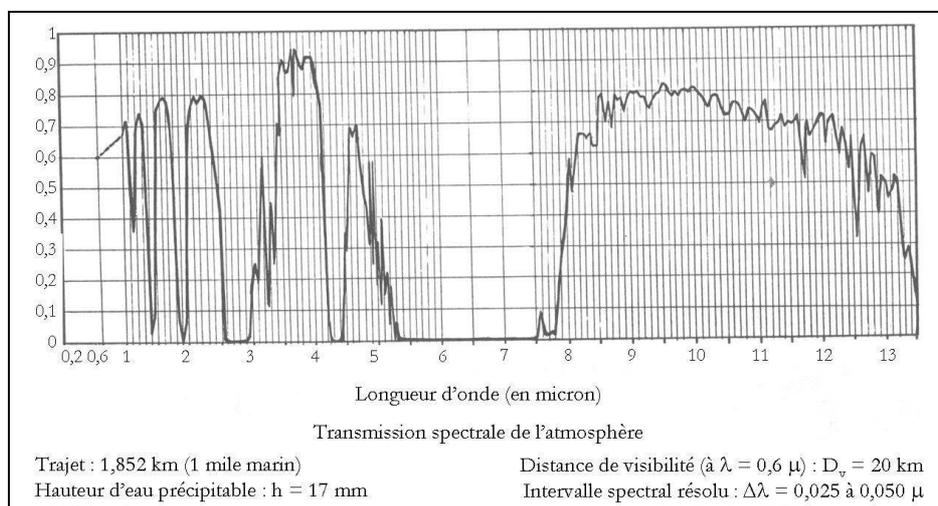


Figure 3. 2 Pourcentage de transmission d'un rayonnement infrarouge à travers 1 km d'atmosphère (d'après Gaussorgues 1999)

La dernière fenêtre (8 à 13 μm) correspond aux longueurs d'onde du maximum d'émission thermique des corps à température ambiante (transmittance d'environ 80%). C'est donc à travers elle que devront fonctionner les systèmes destinés à détecter les objets par leur propre émission. C'est le cas des caméras infrarouges utilisées (©FLIR Systems, modèle ThermaCAMTM PM575 et ThermaCAMTM SC 2000).

D'autre part, la diffusion due aux particules en suspension dans l'air a pour effet de diminuer le contraste thermique des objets étudiés. Ce phénomène est d'autant plus préjudiciable que l'on s'éloigne de la source de rayonnement. Dans le cas de l'auscultation en génie civil, la distance séparant le capteur thermique et l'objet est relativement faible (quelques mètres à quelques décimètres).

Enfin, les fluctuations de l'indice de réfraction atmosphérique dépendent, entre autres, des vents, des courants de convection thermique, du champ de pesanteur et de l'humidité (Gaussorgues 1999). Lorsqu'une radiation traverse un milieu comme l'atmosphère, sa

propagation n'est plus rectiligne. La lumière est partiellement ou totalement déviée ou diffractée selon les dimensions des hétérogénéités rencontrées. Selon le rapport du diamètre du faisceau sur la dimension des zones, on peut alors avoir courbures des rayons lumineux, fluctuations d'images, modification de la focalisation du faisceau, scintillation ou encore dégradation de la cohérence spatiale (Gaussorgues 1999).

3.1.5. BILAN

Il existe donc trois modes de transmission de la chaleur : conduction thermique, convection thermique et rayonnement thermique. Ces trois modes d'écoulement interviennent dans l'interprétation des résultats de thermographie infrarouge.

3.2 LES PROPRIÉTÉS THERMIQUES DU BÉTON

3.2.1. LA CONDUCTIVITÉ THERMIQUE

La conductivité thermique, notée « k », mesure la capacité d'un matériau à **conduire** la chaleur. Elle est définie comme étant le flux de chaleur qui traverse une surface unitaire quand le gradient de température est égal à l'unité. Elle s'exprime en $W.m^{-1}.K^{-1}$ (Neville 2000).

Elle dépend de la nature, de la teneur et de la conductivité du ciment, de la nature, de la dimension et de la conductivité des granulats (Kahn 2002), de la porosité (Numes dos Santos 2003), de la température (De Vriendt 1984), de l'humidité (Khan 2002)...

De façon générale, la conductivité thermique varie de $10^{-2} W.m^{-1}.K^{-1}$ pour les gaz et les très bons isolants, à $10^2 W.m^{-1}.K^{-1}$ pour les métaux (De Vriendt 1984). L'eau et l'air se situent parmi les isolants thermiques avec les valeurs respectives de 0,6 et $0,025 W.m^{-1}.K^{-1}$. Pour un béton ordinaire, elle varie de 1,5 à $3 W.m^{-1}.K^{-1}$ (Neville 2000).

3.2.2. LA CHALEUR SPÉCIFIQUE

La chaleur spécifique, notée « c », représente la capacité d'un matériau à **stocker** de la chaleur. En d'autres termes, elle représente la quantité de chaleur qu'il faut fournir à l'unité de masse pour élever sa température de $1^{\circ}C$ à une température donnée et dans des conditions spécifiées.

Elle dépend de la nature minéralogique des granulats, de la teneur en eau du béton, de la température, de la masse volumique... (Neville 2000). Elle s'exprime en $J.kg^{-1}.K^{-1}$.

Pour un béton ordinaire, la chaleur spécifique varie de 840 à $1170 J.kg^{-1}.K^{-1}$ (Neville 2000).

3.2.3. LA DIFFUSIVITÉ THERMIQUE

La diffusivité thermique, notée « δ », traduit l'aptitude d'un matériau à **diffuser** la chaleur. Elle caractérise la vitesse de propagation d'une sollicitation thermique dans un milieu donné (Neville 2000).

La diffusivité thermique est étroitement liée à l'amortissement d'une sollicitation dans le matériau. Certains parlent de « viscosité thermique » du matériau (Delacre 2000). Elle traduit le retard thermique de pénétration relatif au volume de l'objet. Elle s'exprime en $\text{m}^2.\text{s}^{-1}$. La diffusivité est liée à la conductivité thermique par la relation suivante :

$$\delta = \frac{k}{\rho_v \cdot c}$$

δ = diffusivité thermique (en $\text{m}^2.\text{s}^{-1}$),
 k = conductivité thermique ($\text{W}.\text{m}^{-1}.\text{K}^{-1}$),
 ρ_v = masse volumique (en $\text{kg}.\text{m}^{-3}$),
 c = chaleur spécifique ($\text{J}.\text{kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$).

Pour un béton ordinaire, la diffusivité thermique varie de $1,67.10^{-6}$ à $5,56.10^{-7} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$ (Neville 2000).

On peut enfin noter que plus la température d'un béton évolue rapidement, plus il est sujet aux chocs thermiques (gel/dégel, incendies...). Ceci a une incidence sur sa durabilité.

3.2.4. L'EFFUSIVITÉ

L'effusivité traduit l'aptitude d'un matériau à **absorber** la chaleur. Elle est notée « b » et s'exprime en $\text{J}.\text{m}^{-2}.\text{s}^{-1/2}.\text{K}^{-1}$. L'effusivité est liée à la conductivité thermique par la relation :

$$b = \sqrt{k \cdot \rho_v \cdot c}$$

b = l'effusivité (en $\text{J}.\text{m}^{-2}.\text{s}^{-1/2}.\text{K}^{-1}$),
 k = la conductivité thermique (en $\text{W}.\text{m}^{-1}.\text{K}^{-1}$),
 ρ_v = la masse volumique (en $\text{kg}.\text{m}^{-3}$),
 c = chaleur spécifique (en $\text{J}.\text{kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$).

Pour le béton, la valeur de l'effusivité est d'environ $2800 \text{ J}.\text{m}^{-2}.\text{s}^{-1/2}.\text{K}^{-1}$ (Neville 2000).

3.2.5. L'INERTIE THERMIQUE

L'inertie thermique est la mesure de la réponse thermique d'un matériau à un changement de température. Elle est notée « I_t » et s'exprime en $\text{J}.\text{m}^{-2}.\text{s}^{-1/2}.\text{K}^{-1}$. Elle peut s'exprimer par la relation :

$$I_t = \sqrt{k \cdot \rho_v \cdot c_m}$$

I_t = l'inertie thermique (en $\text{J}.\text{m}^{-2}.\text{s}^{-1/2}.\text{K}^{-1}$),
 k = la conductivité thermique (en $\text{W}.\text{m}^{-1}.\text{K}^{-1}$),
 ρ_v = la masse volumique (en $\text{kg}.\text{m}^{-3}$),
 c_m = la chaleur massique (en $\text{J}.\text{kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$).

L'inertie thermique peut être interprétée comme la capacité d'un matériau à résister à un changement de température. Cette « résistance » peut également être appréhendée par la diffusivité thermique. En effet, pour un corps homogène et isotrope, l'inertie thermique et la diffusivité sont liées par la relation :

$$I_t = \frac{k}{\sqrt{\delta}}$$

- I_t = inertie thermique ($\text{J.m}^{-2}.\text{s}^{-1/2}.\text{K}^{-1}$),
 k = conductivité thermique (en $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$),
 δ = diffusivité thermique (en $\text{m}^2.\text{s}^{-1}$).

Ainsi, un corps présentant une forte inertie thermique aura une faible diffusivité, et inversement.

3.2.6. BILAN

Les quatre paramètres thermiques (conductivité thermique, chaleur spécifique, diffusivité thermique et effusivité thermique) sont liés entre eux (Tableau 3. 2) :

Tableau 3. 2 Paramètres thermiques du béton

Nom	Symbole	Sens physique	Relation	Valeurs (Neville 2002)	Unité
conductivité	k	Capacité à <i>conduire</i> la chaleur	$k = b\sqrt{\delta}$	1,5 à 3	$\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$
chaleur spécifique	c	Capacité à <i>stocker</i> de la chaleur	$c = \frac{b}{\rho_v \sqrt{\delta}}$	840 à 1170	$\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$
diffusivité	δ	Capacité à <i>diffuser</i> la chaleur	$\delta = \frac{k}{\rho_v.c}$	$1,67.10^{-6}$ à $5,56.10^{-7}$	$\text{m}^2.\text{s}^{-1}$
effusivité	b	Capacité à <i>absorber</i> de la chaleur	$b = \sqrt{k.\rho_v.c}$	2 800	$\text{J.m}^{-2}.\text{s}^{-1/2}.\text{K}^{-1}$

3.3 LA THERMOGRAPHIE INFRAROUGE

Par définition, la thermographie infrarouge est une technique de cartographie spatiale et temporelle des températures, dans le spectre du rayonnement infrarouge (AFNOR A 09-400 1991). De façon plus imagée, c'est une méthode qui permet de voir l' « invisible », de le qualifier et de le quantifier (Gaussorgues 1999).

Parmi les trois types de capteurs disponibles (radiomètres, scanners et caméras), nous avons choisi de travailler avec une caméra infrarouge (©FLIR Systems, modèle ThermaCAMTM PM575 et ThermaCAMTM SC 2000). Par la suite, nous verrons les principaux avantages de ce type d'appareil. Le lecteur trouvera en annexe 2 du document les caractéristiques des deux caméras utilisées.

Selon le type de sollicitation, on distingue la thermographie infrarouge active (sollicitation artificielle contrôlée) et la thermographie infrarouge passive (sollicitation naturelle non contrôlée).

3.3.1. LA THERMOGRAPHIE INFRAROUGE ACTIVE

Dans le cas des méthodes par thermographie infrarouge active, une excitation thermique artificielle est nécessaire afin d'observer d'éventuelles discontinuités au sein du matériau. Quatre

modes d'utilisation de ce type de méthode sont possibles. Ils dépendent du type et de la nature de la sollicitation appliquée :

- la thermographie pulsée ou « pulsed thermography » : c'est l'une des techniques de stimulation thermique (de quelques millisecondes à quelques secondes) la plus utilisée du fait de sa rapidité (Vavilov *et al.* 1994). Elle sert, entre autre, à la détection de fissures dans une dalle en béton (Starnes *et al.* 2003, Weritz *et al.* 2003) ou à l'auscultation de pièces archéologiques (Scudieri *et al.* 2001)... ;
- la thermographie par chauffage par palier ou « step heating thermography » : l'augmentation de la température de surface est contrôlée pendant la stimulation thermique par paliers de température. Cette méthode trouve des applications dans l'évaluation de structures composites (Osiander *et al.* 1996, Osiander *et al.* 1998)... ;
- la thermographie par chauffage contrôlé au laser ou « lock-in thermography » : cette méthode est basée sur l'étude de la réponse (en atténuation et déphasage) à la génération d'ondes thermiques (caractérisées par leur module et la phase) à l'intérieur du matériau à l'aide d'un chauffage périodique sinusoïdal de sa surface. Elle est souvent utilisée pour l'inspection de matériaux multicouches (Wu *et al.* 1996, Wu *et al.* 1997, Sakagami *et al.* 2002, Wiggenhauser 2002) ou pour la détection de fissures dans les céramiques ou les métaux (Salerno *et al.* 1997)... ;
- la vibrothermographie ou « vibrothermography » : cette technique utilise le phénomène de conversion directe des ondes mécaniques (vibrations) en énergie thermique. La signature thermique au niveau d'une discontinuité (comme une fissure ou une délamination) dépend de la fréquence de l'excitation mécanique (Tenek *et al.* 1991, Henneke *et al.* 1994).

Ces méthodes s'appliquent essentiellement en laboratoire (appareillage encombrant, maîtrise de la sollicitation, taille réduite des échantillons...) et sont très difficilement utilisables sur site.

3.3.2. LA THERMOGRAPHIE INFRAROUGE PASSIVE

3.3.2.1. LA MÉTHODE

Des contrastes thermiques (contrastés anormaux de température, notés « ΔT ») ou des gradients en surface peuvent indiquer la présence d'un défaut éventuel dans le matériau. La thermographie infrarouge passive (aucun chauffage, ni refroidissement ne sont imposés) est une méthode qui permet de mettre en évidence ces différences de température entre l'environnement et l'objet étudié.

L'utilisation d'une caméra infrarouge présente l'avantage de proposer une image thermique instantanée du site. Pour l'analyse des résultats, cette image est associée à une inspection visuelle et/ou à une prise de vue dans le visible. Cela facilite le repérage, permet un contrôle des anomalies thermiques et ainsi une élimination des artefacts de surface.

3.3.2.2. GRANDEURS MESURÉES

Tous les matériaux absorbent et émettent de l'énergie appelée rayonnement thermique dans la gamme spectrale des infrarouges. Cette énergie est proportionnelle à la température de surface (loi fondamentale de Stefan-Boltzmann). La caméra infrarouge mesure ce rayonnement lié à la luminance de la surface de la scène observée.

L'équation radiométrique (Hamrelius 1991) permet ensuite le passage de la luminance à la température de surface de la zone d'étude :

$$I' = \tau_{atm} [\underbrace{\varepsilon_0 I_0}_{\text{Flux émis par l'objet}} + \underbrace{(1 - \varepsilon_0) I_e}_{\text{Flux réfléchi par l'objet}}] + \underbrace{(1 - \tau_{atm}) I_{atm}}_{\text{Flux émis par l'atmosphère}}$$

Flux transmis au travers de l'atmosphère

- I' = rayonnement perçu par la caméra
- I_0 = rayonnement propre de l'objet
- I_e = rayonnement de l'environnement
- I_{atm} = rayonnement de l'atmosphère
- ε_0 = coefficient d'émissivité de l'objet
- τ_{atm} = coefficient de transmission de l'atmosphère

La caméra infrarouge, qui reçoit le rayonnement composé de trois parties (émis par l'objet, réfléchi par l'objet et émis par l'atmosphère entre l'objet et le détecteur), calcule et affiche cette température, sous forme de thermogramme (Figure 3. 3).

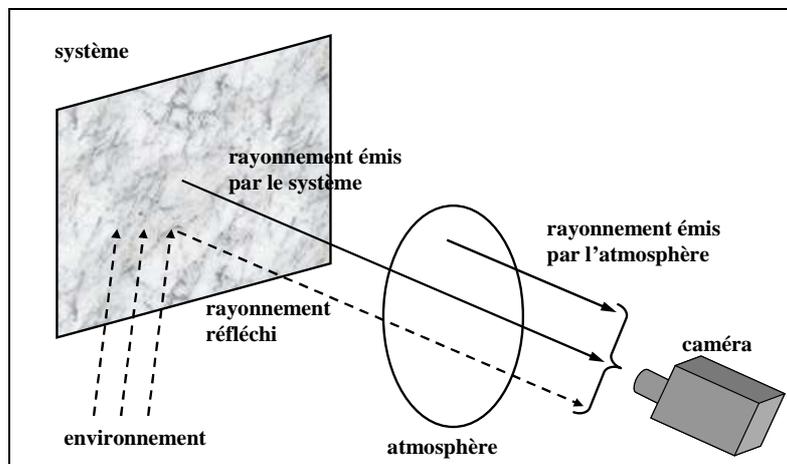


Figure 3. 3 Composition du rayonnement reçu par la caméra infrarouge (d'après Hamrelius 1991)

L'influence de la température de l'environnement et les hypothèses faites sur l'homogénéité de l'objet (température et émissivité considérées constantes dans l'espace et dans le temps) rendent l'exploitation des valeurs numériques de température très délicate. Toutefois, dans le but d'une démarche quantitative, l'analyse de comportements différentiels ou de contrastes de températures est possible.

3.3.2.3. DÉTECTION D'UNE ANOMALIE

Le champ de température en surface peut traduire la présence d'une anomalie sub-surfacique dans le matériau. Si celui-ci est sollicité thermiquement (réchauffement naturel), la chaleur diffuse dans le matériau par conduction. La présence d'une hétérogénéité (comme une délamination ou une fissure), agissant comme isolant thermique, ralentit cette diffusion. Il s'en suit l'apparition d'une zone plus chaude en surface par rapport au matériau voisin dépourvu d'anomalie (Figure 3. 4). Inversement, lors du refroidissement, il apparaît une zone plus froide au niveau du défaut par rapport au matériau voisin sain.

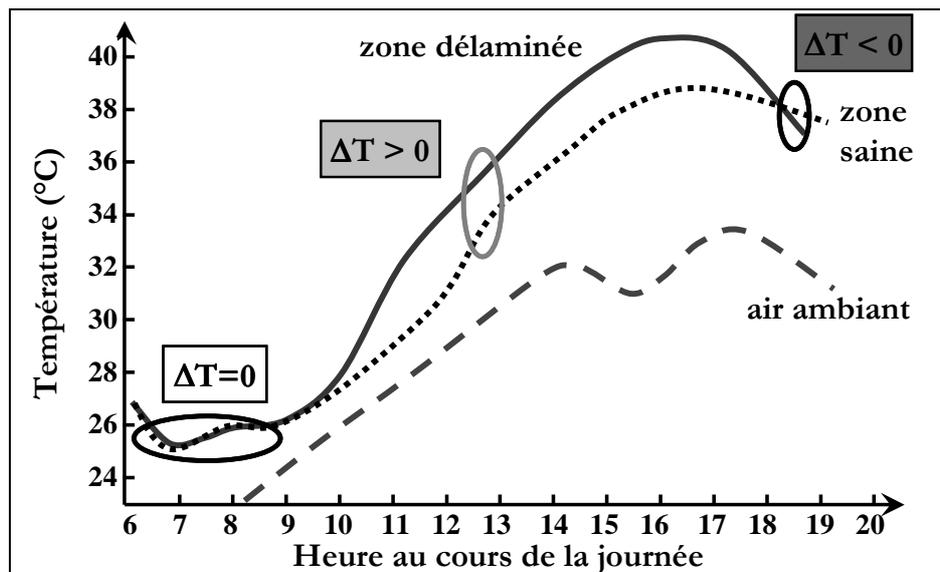


Figure 3. 4 Comportement thermique d'un béton sain et d'un béton délaminé (d'après Holf *et al.* 1987)

Sur la Figure 3. 4, il est important de remarquer qu'à certains moments de la journée, il n'y a pas de contraste thermique entre une zone saine et une zone endommagée. On comprend alors la nécessité de réaliser plusieurs séances de mesure au cours d'une journée afin de ne pas interpréter les résultats de façon erronée. S'il n'y a pas de contraste thermique ou de gradient de température en surface, cela ne signifie pas qu'il n'y a pas de défaut dans le matériau.

Pour pouvoir détecter une anomalie thermique, il faut impérativement que (Sirieix *et al.* 2005) :

- la sollicitation thermique naturelle soit d'amplitude suffisante pour que l'effet produit en surface par l'anomalie soit détectable ;
- le contraste des propriétés thermophysiques entre deux zones étudiées soit suffisant ;
- en terme de géométrie du défaut recherché, le rapport entre sa taille et sa profondeur doit être élevé : si la taille du défaut est réduite et sa profondeur élevée, la chaleur diffuse autour de l'anomalie, en la « contournant », et le contraste n'est pas visible en surface ;
- la profondeur de pénétration des ondes thermiques : on estime qu'en surface, la réponse à une sollicitation thermique n'est pas sensible à la présence d'une

discontinuité si la profondeur à laquelle elle se situe n'est pas supérieure à trois fois la profondeur de pénétration ou épaisseur de peau « p » (en m) définie par :

$$p = \sqrt{\frac{\delta}{\pi \cdot f}}$$

avec « δ » la diffusivité thermique (en $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$), « f » la fréquence de la sollicitation sinusoïdale à la surface du matériau (en Hz).

3.3.3. AVANTAGES ET LIMITES

Technique employée depuis peu en génie civil (Forest 1992), la méthode d'auscultation par thermographie infrarouge passive semble constituer une des techniques de CND les plus attractives. Elle présente un certain nombre d'avantage par rapport aux autres méthodes. Dans ce paragraphe, sont exposés les principaux avantages de la technique et particulièrement ceux liés à l'utilisation d'une caméra infrarouge telle que nous l'avons mise en œuvre.

3.3.3.1. AVANTAGES

a. Méthode non destructive et sans contact

La thermographie infrarouge passive est une méthode **non destructive**. Cela permet donc de conserver l'intégrité de la structure auscultée.

C'est également une méthode **sans contact** : il n'y a pas de contact physique entre le capteur et l'objet ausculté. De ce fait, il n'est besoin d'aucun couplant entre le dispositif de mesure et la surface du matériau. Cela implique également qu'il n'y a pas d'interaction entre l'appareil et la surface. Ainsi, les propriétés du matériau ne sont pas modifiées. En réalité, quelques interférences peuvent être causées par la caméra infrarouge elle-même, en réfléchissant ou en émettant un rayonnement propre. Cependant ces effets peuvent être considérés comme négligeables.

b. Résolution spatiale

La caméra infrarouge et l'objet d'étude sont séparés de quelques mètres à quelques décimètres (voire plusieurs kilomètres dans le cas des inspections aéroportées). Il faut alors bien comprendre que plus cette distance est grande, plus l'acquisition des données est rapide mais au dépens de la résolution spatiale. Un compromis doit être trouvé entre la résolution souhaitée et la dimension de la scène auscultée et part conséquent la rapidité de l'auscultation. Sur site, on ne peut pas toujours contrôler ce paramètre de distance scène thermique/caméra.

Par exemple, si nous considérons que la caméra infrarouge est à une distance de 10 m de la scène observée et équipée d'un objectif avec un angle d'ouverture de $24^\circ \times 18^\circ$ (angle d'ouverture standard), la dimension de l'image thermique enregistrée est de 4,25 x 3,17 m.

Chaque image étant découpée en pixels (320 x 240 pixels), la taille de chaque élément est alors de 1,33 x 1,33 cm, dans notre exemple. Pour chacun de ces points est calculée la valeur de température qui représente une moyenne de la surface observée. Plus la taille du pixel est grande, plus la moyenne de la température représente une surface importante.

c. Appareil de mesure

Quand aucune source extérieure de chaleur n'est nécessaire, comme c'est le cas pour la thermographie infrarouge passive, les opérations d'auscultation sont très rapides à mettre en œuvre.

La thermographie infrarouge a une capacité large d'évaluation, c'est une méthode à grand rendement. Une caméra infrarouge est capable de contrôler simultanément la température en plusieurs points à l'intérieur d'une même scène thermique.

Pour les deux caméras utilisées, les auscultations peuvent être réalisées pour des températures de l'environnement comprises dans une plage de mesure de - 15°C à + 50°C. Dans des conditions extrêmes de température, au-delà de cette plage de mesure, des précautions sont à prendre.

L'équipement de mesure est capable de détecter et de contrôler de façon très rapide des variations de températures à la surface d'un objet avec une résolution thermique de l'ordre de 0,1°C (modèle ThermaCAM™ PM575) et 0,08°C (modèle ThermaCAM™ SC 2000). Dans les deux cas, la précision de la mesure est de $\pm 2\%$ de la température réelle de la surface étudiée (en °C).

L'équipement de thermographie infrarouge est léger et de faibles dimensions (2,43 kg avec batterie pour la caméra infrarouge ThermaCAM™ SC 2000 dont les dimensions sont de 20,9 x 12,2 x 13 cm). De ce fait, il peut être facilement transportable et manipulable (Figure 3. 5).



Figure 3. 5 Caméra infrarouge ThermaCAM™ SC 2000 (©FLIR Systems)

La caméra est un équipement qu'il est possible d'utiliser de façon mobile et en enregistrant les données de façon continue. A titre d'exemple, la compagnie nord-américaine G.I.E Technologies Inc. utilise une caméra infrarouge installée sur le toit d'un véhicule pour l'auscultation du revêtement des routes (Figure 3. 6).



Figure 3. 6 Caméra infrarouge embarquée sur un véhicule (d'après GIE Technologies Inc.)

Les données sont visibles en direct, sous forme d'images thermiques, et quelques traitements peuvent être effectués sur site. Cela permet d'une part de contrôler la qualité de la prise de données, mais également d'effectuer des analyses complémentaires aux endroits suspects lors de l'inspection. Les données enregistrées peuvent être contrôlées à partir d'un ordinateur, équipé d'un logiciel de traitement d'image spécifique (ThermCAM™ Researcher). Ce logiciel permet d'obtenir une analyse de l'image thermique en traçant des profils, des histogrammes de répartitions de températures ou des lignes isothermes, de suivre une donnée dans le temps, d'accéder aux données brutes du capteur ou encore de réaliser des soustractions d'images.

3.3.3.2. LIMITES

a. Positionnement sur site

L'une des premières contraintes de l'utilisation d'une caméra infrarouge est le repérage sur site. Dans certains cas (auscultation d'un parement de barrage par exemple, ou d'un ouvrage linéaire), il est nécessaire de disposer sur la scène observée des « marqueurs thermiques », afin d'assurer un bon positionnement spatial et une couverture optimale (Figure 3. 7).

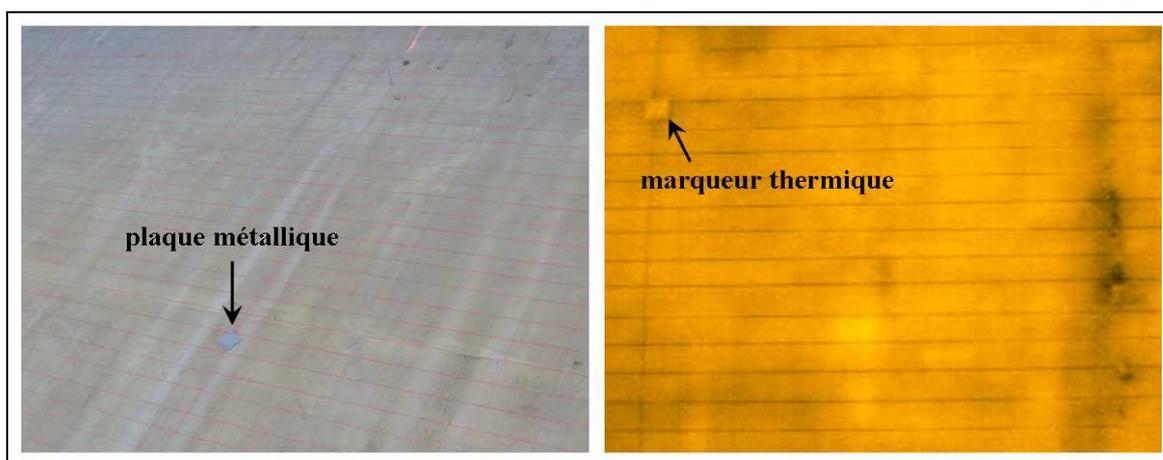


Figure 3. 7 Image visible et image thermique du parement amont de la digue sud de l'aménagement hydroélectrique de la Toulnostouc (Québec, Canada)

Pratiquement, il est souvent possible d'utiliser des objets déjà présents sur le site comme marqueurs thermiques du fait de leurs signatures directement identifiables (poutres, joints de construction...).

b. État de surface

La caméra infrarouge enregistre le rayonnement provenant d'une surface. Par conséquent, la mesure est très sensible à sa qualité. Il est donc recommandé de la nettoyer de tout élément indésirable (feuilles, mousses...).

c. Angle d'incidence

Il est important d'observer l'objet à partir de la caméra infrarouge avec un angle d'incidence très faible, proche de la normale, afin d'éviter des corrections liées aux distorsions géométriques du capteur ou à la forme de la surface auscultée. De plus, la valeur de l'émissivité est influencée par cet angle d'incidence (Balaras *et al.* 2002).

d. Dimension du champ

Le champ couvert par une caméra infrarouge est de faible dimension, de l'ordre de $24^\circ \times 18^\circ$ pour un objectif standard. Néanmoins, des objectifs « grand champ » peuvent être ajoutés pour augmenter cet angle. Au contraire, l'utilisation de téléobjectifs est possible si la distance entre la caméra et la surface auscultée est grande.

e. Atténuation dans l'air

L'atténuation du rayonnement infrarouge au cours de son passage dans l'atmosphère est causée par l'absorption des particules en suspension dans l'air et par leur réflexion dans des multiples directions. Elle peut affecter les résultats obtenus. Ses effets sont négligeables si la distance entre la caméra et l'objet est petite (Sirieix *et al.* 2005).

f. Transparence

Il ne peut y avoir d'obstacle entre la caméra infrarouge et l'objet observé. Dans certain cas, cela peut conditionner le positionnement du dispositif de mesure.

g. Répétitivité

La technique est très sensible aux facteurs environnementaux et aux conditions thermiques naturelles. Celles-ci sont rarement identiques d'une période de l'année à l'autre, voire même au cours d'une seule journée. De ce fait, un des inconvénients majeurs de la méthode est la non répétitivité des mesures en milieu naturel. Les écarts de température n'auront donc pas toujours la même valeur, en fonction des conditions de mesure. Il est donc préférable de toujours travailler en relatif sur une série de données acquises au même moment (durée de la période relative à la sollicitation thermique). De plus, par précaution, il convient d'acquérir des données sur la température ambiante du site, si possible plusieurs jours avant les mesures elles-mêmes (Sirieix *et al.* 2005).

h. Conditions environnementales

Quel que soit l'objet étudié, il faut éviter d'effectuer des mesures par temps de pluie, sous un vent fort ou encore dans un ouvrage ventilé. Un vent fort peut entraîner des mouvements de convection au dessus de la surface d'un matériau et ainsi diminuer sa température. En général,

pour une vitesse supérieure à 15 km.h⁻¹, il est recommandé de ne pas réaliser les mesures (ASTM D 4788-88).

i. Estimation de la profondeur des anomalies thermiques

La thermographie infrarouge permet d'obtenir une cartographie de la température de surface. C'est le thermogramme. Aujourd'hui, avec les outils disponibles, il est encore difficile d'extraire une information en profondeur. L'utilisation des méthodes d'inversion numérique nécessite l'acquisition de données supplémentaires : connaître les sollicitations reçues par la surface, estimer la diffusivité des matériaux, enregistrer les conditions climatiques...

3.3.3.3. APPLICATIONS

Dans le domaine du génie civil, l'utilisation de la thermographie infrarouge passive trouve diverses applications. Certains auteurs font une liste non exhaustive de certaines d'entre-elles (Pla-Rucki *et al.* 1995, Büyüköztürk *et al.* 1997, Maldague 2000, Khanna *et al.* 2002, Ballivy *et al.* 2003). La plupart de ces applications concerne des exploitations qualitatives des résultats et visent à interpréter des gradients de température de surface.

Dans le domaine de l'END, la méthode peut s'appliquer pour :

- l'inspection thermique des bâtiments (Titman 2001, Balaras *et al.* 2002, Grinzato *et al.* 2002^b, Hines 2002, Martin Ocana *et al.* 2004) ;
- le diagnostic d'ouvrages en béton (Daoust 1989, Kulkarni 1996, Grinzato *et al.* 1998, Weil *et al.* 1998, Del Grande *et al.* 1999, Li *et al.* 2000, Moroupoulo *et al.* 2000, McCann *et al.* 2001, Moropoulou *et al.* 2001, Grinzato *et al.* 2002^a, Vavilov *et al.* 2002, Bursanescu 2003, Clark *et al.* 2003^a, Clark *et al.* 2003^b, Stimolo 2003, Washer 2003, Watanabe *et al.* 2003) ;
- l'évaluation de l'état des maçonneries (McCann *et al.* 2001, Avdelidis *et al.* 2003) ;
- l'auscultation d'ouvrages souterrains (Sirieix 1990, Pallardy *et al.* 1999, Delacre *et al.* 2001, Ballivy 2002, Le Sant *et al.* 2002, Ostrowski *et al.* 2002) ;
- la cartographie de sites miniers (Ostrowski *et al.* 2002, Carpentier 2005)...

3.4 SYNTHÈSE

Parmi les techniques d'END à disposition, l'apparition récente de la **thermographie infrarouge** a permis aux méthodes thermiques de s'immiscer dans le domaine de l'auscultation des ouvrages en béton. Les capteurs utilisés sur les appareils de détection du rayonnement infrarouge tels qu'une **caméra infrarouge** sont sensibles à la luminance de la surface étudiée. Celle-ci est fonction de la température de la surface, de la température de l'air ambiant et de l'émissivité du (ou des) matériau(x) constituant cette surface. Sur site, il est nécessaire de mesurer ces différents paramètres afin d'interpréter correctement les gradients de température mis en évidence sur les **images thermiques**.

La **température de surface** est la manifestation superficielle des phénomènes thermiques présents en profondeur. Les trois modes d'écoulement de la chaleur (conduction, convection et rayonnement) sont alors mis en jeu dans ou à proximité du matériau. En arrière de la surface auscultée, l'écoulement de la chaleur se fait par conduction. Il est donc influencé par la présence d'hétérogénéités dont les **propriétés thermiques** (conductivité, diffusivité, chaleur spécifique, effusivité et inertie thermique) diffèrent de celle du matériau environnant. L'**inertie thermique** qui est la mesure de la réponse thermique d'un matériau à un changement de température, peut être interprétée comme la capacité d'un matériau à résister à un changement de température.

Sur site (où l'équilibre thermique n'est pas atteint), l'auscultation par thermographie infrarouge passive peut permettre d'évaluer les propriétés thermophysiques (inertie thermique) dans le cadre du diagnostic des ouvrages en béton. De plus, cette technique peut détecter des anomalies thermiques résultant de gradients de température dus à la présence d'hétérogénéités à l'intérieur du matériau.

CHAPITRE 4 : LES FACTEURS INFLUENÇANT LES PROPRIÉTÉS ÉLECTRIQUES ET THERMIQUES DU BÉTON

Avant d'interpréter des variations de résistivités apparentes ou de températures relatives aux endommagements, il est indispensable d'être capable de distinguer l'information, du bruit et des effets des perturbations. Par conséquent il est important de connaître et de maîtriser les différents facteurs influençant les propriétés électriques et thermiques du béton. L'objectif final est de corriger les effets des perturbations dans le meilleur des cas, ou de les minimiser.

Le travail porte donc sur l'étude des différentes sources de perturbations identifiées, à la fois sur la mesure électrique et sur la thermographie infrarouge. Pour cela, nous pouvons distinguer différentes familles de facteurs, qui sont :

- les paramètres de **formulation** du béton (nature du ciment, des granulats, rapport E/C, porosité...);
- les **ajouts** dans le béton (cendres volantes, fumées de silice et fibres);
- les **paramètres extérieurs**, c'est à dire ceux liés aux conditions de mesure sur site (humidité de surface et température);
- les **paramètres structuraux**, qui dépendent des caractéristiques géométriques de la structure (bord, fond et armatures);
- les **altérations** du béton (RAG, carbonatation, fissuration et délamination).

Dans un premier temps, nous avons travaillé sur des corps d'épreuve fabriqués en laboratoire et sur des ouvrages réels afin d'identifier les différents facteurs d'influence. Puis dans un second temps, les modélisations numériques nous ont permis de comprendre certains phénomènes.

4.1 INFLUENCE DES PARAMÈTRES PROPRES AU BÉTON

4.1.1. LE CIMENT

Le ciment est l'élément de base du liant. Il se retrouve dans la matrice après la prise. Il s'agit d'un produit de carrière transformé en usine par plusieurs réactions chimiques. Différents ciments peuvent être réalisés selon la teneur en aluminates, en silice...

4.1.1.1. EN ÉLECTRIQUE

Le ciment est à l'origine des différents ions circulant dans la matrice poreuse et assurant la conduction électrolytique dans le matériau. Les espèces chimiques représentées dans la solution interstitielle dépendent donc du type de ciment utilisé. De ce fait, le type de ciment, la teneur en alcalins ou encore la teneur en aluminates sont des éléments de la chimie des ciments dont on considère qu'ils influencent les propriétés électriques du béton.

Hammond *et al.* (1955) ont étudié l'effet de trois types de ciment, de teneur en aluminates différente, sur la résistivité électrique du béton ($E/C = 0,49$) : à 28 jours, la résistivité varie d'un facteur 20 entre un béton fabriqué avec un ciment Portland traditionnel et un ciment à haute teneur en aluminates.

Monfore (1968) a étudié l'effet sur la résistivité électrique du béton de deux types de ciment, de teneur en alcalins différente (dosage en ciment : 335 kg.m^{-3} ; $E/C = 0,41$) : les mesures réalisées 28 jours après la fabrication montrent que la résistivité électrique varie peu.

Hughes *et al.* (1985) ont étudié l'influence sur la résistivité électrique du dosage en ciment (dosage en ciment : 300, 350 et 400 kg.m^{-3}). Pour un rapport $E/C = 0,5$, ils observent une diminution linéaire de la résistivité de 20% avec l'augmentation de la proportion de ciment de 300 à 400 kg.m^{-3} . Avec un rapport $E/C = 0,55$, cette diminution est de 25%.

4.1.1.2. EN THERMIQUE

D'après des essais réalisés en 1940 aux États-Unis (Missenard 1965), la conductivité thermique du béton varie selon le type de ciment utilisé (Tableau 4. 1).

Tableau 4. 1 Conductivités thermiques de certains ciments, à différentes températures (adapté de Missenard 1965)

Dénomination	T (°C)	k ($\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$)
Superciment 355 ⁽⁶⁾ /500 kg ⁽⁷⁾	15	0,87
	40	0,95
	70	1,13
H.R.J. 315/400 kg	15	0,81
	40	0,91
	70	1,07
Ciment au Laitier au Clinker 160/250 kg	15	0,75
	40	0,82
	70	0,99
CIMDOR I 210/325 kg	15	0,87
	40	0,95
	70	1,13
Ciment Portland Artificiel 210/325 kg	15	1,05
	40	1,13
	70	1,30

⁽⁶⁾ Résistance mécanique en bar : 1bar = 0,1MPa.

⁽⁷⁾ Dosage en ciment.

De plus, la conductivité thermique du ciment à l'état pur, après prise, augmente en moyenne à peu près linéairement avec la température : augmentation d'environ 30% entre 15°C et 70°C.

D'autre part, Uysal *et al.* (2004) mentionnent que la conductivité thermique du béton augmente avec le dosage en ciment (ciment Portland) : entre 200 et 500 kg.m⁻³, l'augmentation est quasiment linéaire et de l'ordre de 25% (Tableau 4. 2).

Tableau 4. 2 Conductivités thermiques pour différents dosages en ciment (d'après Uysal *et al.* 2004)

dosage en ciment (kg.m ⁻³)	k (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)
200	1,163
250	1,203
350	1,223
400	1,272
500	1,461

4.1.2. LES GRANULATS

En plus du ciment et de l'eau, le béton est composé également de granulats (souvent des sables et graviers).

4.1.2.1. EN ÉLECTRIQUE

Monfore (1968) mentionne que la résistivité électrique de la pâte de ciment est inférieure à celle d'un béton fabriqué avec le même ciment. Ceci est confirmé par Whittington *et al.* (1981). McCarter *et al.* (1981) en déduisent que les granulats participent peu à la conduction électrique dans le béton.

Monfore (1968) a étudié l'influence de la nature du granulat sur la résistivité électrique : le marbre ou le granite sont beaucoup plus résistants que le sable ou le calcaire (Figure 4. 1). Morris *et al.* (1996) ajoutent que l'influence du type de granulat sur la variabilité des mesures est faible mais notable et que, plus le contraste de résistivité électrique entre le granulat et le ciment est important, plus la variabilité de la mesure diminue.

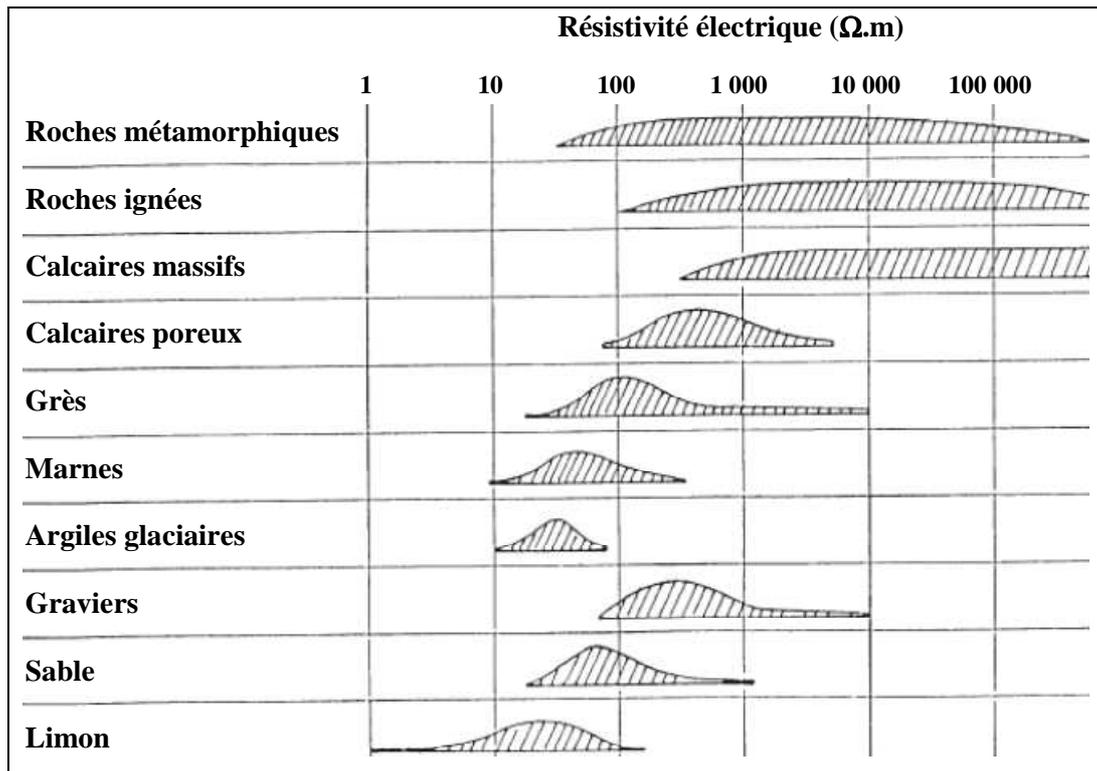


Figure 4.1 Gamme des résistivités de matériaux naturels (d'après Chapelier 2000)

En ce qui concerne la répartition granulométrique, Morris *et al.* (1996) indiquent que plus le diamètre du plus gros granulat augmente, plus la variabilité des mesures électriques est élevée. Lataste (1998) indique que la variabilité des mesures augmente avec l'hétérogénéité de la distribution granulométrique.

Woelfl *et al.* (1980) montrent que l'on peut exprimer l'évolution de la résistivité électrique en fonction du rapport Granulat/Ciment : plus la quantité de granulats dans un béton augmente, plus la résistivité électrique apparente est élevée. Ceci est confirmé par Hughes *et al.* (1985), Ping *et al.* (1988), Princigallo *et al.* (2003) ou encore Guissi (2004).

4.1.2.2. EN THERMIQUE

D'après Kahn (2002), il apparaît que la conductivité thermique d'un béton dépend fortement du type de granulat utilisé. Elle est d'autant plus élevée que le granulat est conducteur (Missenard 1965).

Le Tableau 4. 3 donne des valeurs de conductivité thermique de certains types de granulats utilisés dans la fabrication des bétons.

Tableau 4.3 Conductivité thermique du béton selon le type de granulats (d'après Neville 2000)

granulat	k (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)
basalte	2,0
baryte	2,0
calcaire	3,2
dolomite	3,3
granite	2,6
grès	2,9
quartzite	3,5
schiste	0,85

La conductivité thermique des roches dépend non seulement de leur nature minéralogique, de leur structure et de leur texture (Clauser *et al.* 1995), mais aussi de leur degré de cristallisation et de leur porosité (Maqsood *et al.* 2004).

Kahn (2002) a étudié quatre types de granulats en utilisant deux types de sables : il montre que quel que soit l'état de saturation du béton (ciment Portland ordinaire ; E/C = 0,6), il existe une relation linéaire (sur seulement quatre mesures) entre la conductivité thermique des granulats et celle du béton (Figure 4. 2).

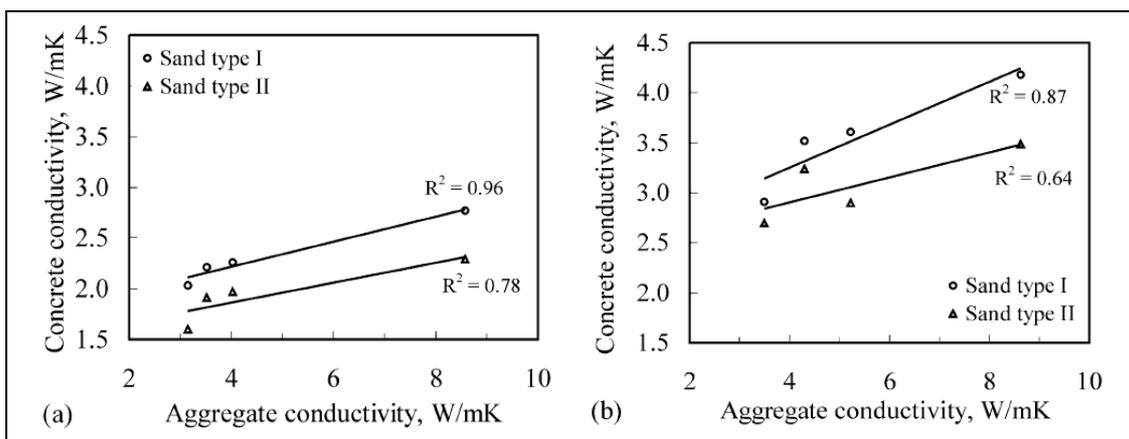


Figure 4.2 Relation entre la conductivité thermique des granulats et celle du béton, dans le cas (a) d'un béton sec et (b) d'un béton saturé (d'après Kahn 2002)

La dimension des granulats influence également les propriétés thermiques du béton : la conductivité thermique diminue avec l'augmentation du diamètre des granulats.

Enfin, la quantité de granulat joue un rôle sur les propriétés thermiques : plus la proportion de granulat est grande, plus la conductivité thermique du béton augmente (Kim *et al.* 2003).

4.1.3. LE RAPPORT E/C

Il s'agit du rapport de la masse d'eau (E) sur la masse de ciment (C), utilisées pour la fabrication d'un béton. Cette grandeur spécifique est une des caractéristiques servant à décrire le type de béton réalisé. C'est un paramètre important qui contrôle la performance du béton

(résistance mécanique et durabilité). De plus, ce rapport joue un rôle prépondérant au niveau de la microstructure du béton et dans la concentration ionique de la solution interstitielle.

4.1.3.1. EN ÉLECTRIQUE

La résistivité électrique est influencée par le rapport E/C. Monfore (1968) a étudié la relation entre la résistivité et ce rapport pour des pâtes de ciment. Il a montré que la résistivité augmente quand le rapport E/C diminue : une pâte de ciment avec un rapport E/C de 0,4 a une résistivité électrique deux fois plus élevée que pour un rapport de 0,6.

Dans le TC Rilem 154-EMC piloté par Polder (Polder 2000), il est suggéré d'utiliser la mesure de résistivité électrique afin de suivre les variations locales du rapport E/C. Plusieurs auteurs ont réalisé des études sur la relation existant entre ces deux grandeurs (Hammond *et al.* 1955, Woelfl *et al.* 1980, Whittington *et al.* 1981, Hughes *et al.* 1985, Guissi 2004).

Lataste (2002) a réalisé des mesures en laboratoire sur des éprouvettes en béton de différentes natures (allant d'un béton ordinaire de résistance en compression 20 MPa et de rapport E/C = 0,64 à un béton haute performance de résistance en compression 50 MPa et de rapport E/C = 0,36), et conservées en saturation. Ces résultats confirment ceux issus de la bibliographie (Figure 4. 3).

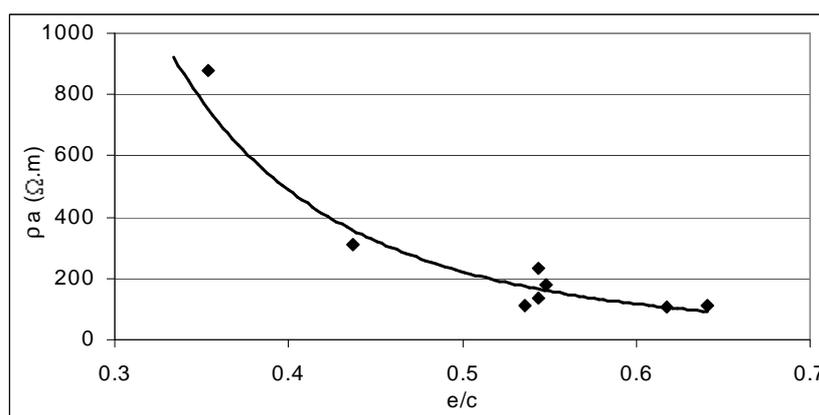


Figure 4. 3 Influence mesurée du rapport E/C sur la résistivité apparente du béton (d'après Lataste 2002)

D'après Gjorv *et al.* (1977), l'influence du rapport E/C sur la résistivité électrique du béton dépend également du degré de saturation : l'effet du rapport E/C est moins significatif pour un béton saturé en eau que pour un béton sec.

4.1.3.2. EN THERMIQUE

Il a été constaté une diminution de la conductivité thermique de 5 à 10% pour un rapport E/C variant de 0,4 à 0,8 (Missenard 1965). L'influence du rapport E/C peut être considérée faible.

Kim *et al.* (2003) proposent une relation linéaire entre le rapport E/C (dans la plage de 0,25 à 0,40) et le rapport de la conductivité thermique à l'état humide par rapport à l'état saturé (Figure 4. 4) :

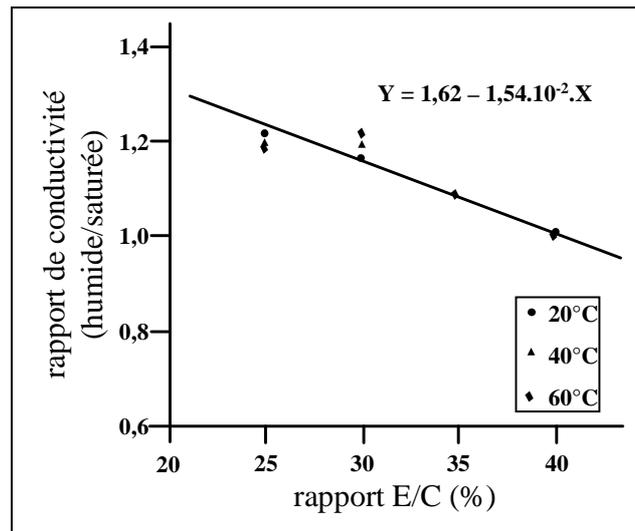


Figure 4. 4 Influence du rapport E/C sur la conductivité thermique du béton (d'après Kim *et al.* 2003)

4.1.4. LA POROSITÉ

Dans un milieu poreux granulaire, la **porosité totale** est définie comme le rapport entre le volume total des vides et le volume total du matériau. C'est un nombre sans unité ou en pourcentage.

Il convient de différencier la porosité totale de la **porosité efficace** (ou effective) qui est le rapport entre le volume total des vides communicants et le volume total du matériau. Cette porosité peut être très inférieure à la porosité totale lorsque les pores du matériau ne sont pas en communication ou que la taille des pores est telle que les fluides ne peuvent pas y circuler.

La porosité est l'une des caractéristiques essentielles du béton durci. Les différents facteurs évoqués précédemment (ciment et rapport E/C) conditionnent la porosité finale du béton.

4.1.4.1. EN ÉLECTRIQUE

La conduction du courant électrique dans le béton est essentiellement un phénomène électrolytique. Elle dépend donc fortement de la porosité efficace et de ses caractéristiques (quantité, taille, connectivité, tortuosité). D'après plusieurs études, pour un béton saturé, plus la porosité efficace est élevée, plus la résistivité électrique est basse (Gu *et al.* 1993, Lataste 1998).

Pour certains auteurs, la mesure électrique est utilisée comme outil de laboratoire pour évaluer les caractéristiques de la porosité des bétons. Lakshminarayanan *et al.* (1992) montrent que la résistivité électrique est un bon indicateur de la distribution des pores dans le béton. Rengaswamy *et al.* (1994) définissent des classes de porosité en fonction du rapport des résistivités du béton sec sur le béton humide. Andrade *et al.* (2000) affirment que la mesure électrique est un paramètre permettant de caractériser la connectivité des pores.

La porosité est le chemin d'accès privilégié des agents extérieurs vers le cœur du béton (Figure 4. 5).

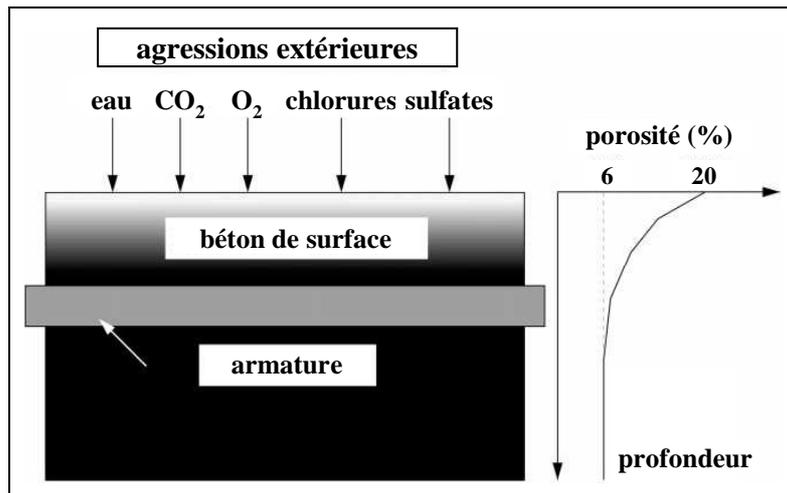


Figure 4. 5 Pénétration d'agents agressifs extérieurs (d'après Basheer *et al.* 2001^b)

Plusieurs auteurs (Lakshminarayanan *et al.* 1992, Cabassut *et al.* 1997, Andrade *et al.* 2000) proposent alors d'utiliser la mesure électrique comme un outil permettant de qualifier la sensibilité d'un béton aux agressions extérieures. Baroghel-Bouny (2004) utilise la mesure de résistivité comme indicateur de durabilité potentielle du béton.

4.1.4.2. EN THERMIQUE

Dans le cas du béton, la conductivité thermique diminue lorsque la porosité augmente (Neville 2000).

Nunes dos Santos (2003) a étudié le cas de béton réfractaire. Expérimentalement et numériquement, il montre que la conductivité thermique diminue de façon linéaire d'un facteur 3 lorsque la porosité varie de 0 à 35%, quelle que soit la température de l'échantillon (Figure 4. 6).

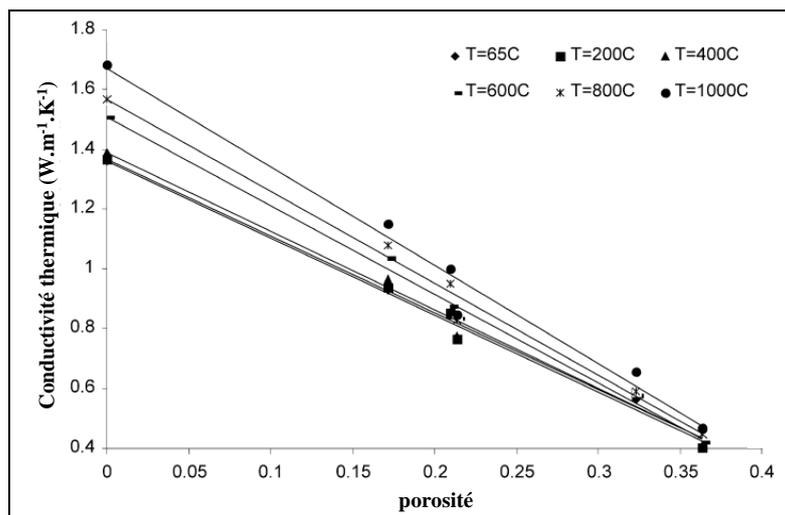


Figure 4. 6 Conductivité thermique en fonction de la porosité totale (d'après Nunes dos Santos 2003)

4.1.5. LE DEGRÉ DE SATURATION

Ce paramètre sera abordé en détail dans le Chapitre 6, entièrement consacré à l'évaluation des conditions hydriques du béton.

4.1.6. LES IONS CHLORURES

La présence d'ions chlorure dans le béton (provenant de granulats contaminés, de sels fondants, d'eau de mer par exemple) peut entraîner la corrosion des armatures et donc par la suite la dégradation du béton.

4.1.6.1. EN ÉLECTRIQUE

Henry (1964) a étudié l'influence de la concentration en NaCl (mélangé à l'eau de gâchage) sur la résistivité électrique du béton ($E/C = 0,44$) : plus la concentration d'ions chlore augmente dans le béton (de 0 à 3,13%), plus la résistivité diminue.

Hunkeler (1996) rapporte qu'une addition de 0,45% d'ions chlorures dans l'eau de gâchage diminue la résistivité du béton de 27%.

Plusieurs auteurs ont confirmé cette tendance (Saleem *et al.* 1996, Basheer *et al.* 2002^a, Al-Zahrani *et al.* 2004, Pruckner *et al.* 2004, Guissi 2004, RGC&U 2005).

4.1.6.2. EN THERMIQUE

La nature chimique de la solution interstitielle dans le béton influe peu sur la conduction de la chaleur. La conductivité thermique de l'eau pure est de $0,599 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$. La conductivité thermique d'une solution aqueuse contenant 10% de NaCl est de $0,590 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ (Missenard 1965). Avec une solution ayant une concentration en sel 3 fois plus élevée que celle de l'eau de mer (3,5%), la conductivité thermique diminue de seulement 1,5%. Ces chiffres démontrent que la présence de chlorures dans le béton en faible quantité ne modifie pas de façon significative ses propriétés thermiques.

4.1.6.3. ÉTUDE EXPÉRIMENTALE

Quatre dalles avec différents teneurs en chlorures ont été coulées en juillet 2002 afin d'étudier l'effet des ions Cl^- sur les propriétés électrique et thermique (Rivard 2003^a). Ces dalles ($1 \times 1 \times 0,2 \text{ m}$) comportent une seule rangée d'armature à 15 cm de la surface auscultée.

Trois teneurs en chlorures ont été visées : 0,30%, 0,75% et 1,20% par masse de ciment. Ces teneurs sont nettement supérieures à la limite admise (0,15% par masse de ciment) pour initier la corrosion des armatures, telle que prescrite par l'American Concrete Institute (ACI Committee 222, 2001).

Les formulations des bétons sont présentées dans le Tableau 4. 4, de même que leurs propriétés à l'état frais et à l'état durci. Les bétons ont la même formulation. Pour les dalles B, C et D, des granules de chlorure de calcium (CaCl_2) ont été ajoutées à l'eau de gâchage.

Par leurs propriétés à l'état frais et à l'état durci, les bétons sont tous différents.

Tableau 4. 4 Formulation et propriétés des mélanges A, B, C et D (d'après Rivard 2003^a)

	Dalle			
	A	B	C	D
Formulation				
E/C	0,56			
Dosage en ciment (kg.m ⁻³)	297			
Sable (kg.m ⁻³)	909			
Granulat (kg.m ⁻³)	911			
Entraîneur d'air (mL.L ⁻¹)	60			
Teneur en chlorure (% par masse de ciment)	0	0,30	0,75	1,20
Propriétés à l'état frais				
Air occlus (%)	7	5,2	5,2	4,7
Affaissement (mm)	90	90	160	120
Propriétés à l'état durci				
f'c à 28jours (MPa)	23	27	31	31
E à 28 jours (GPa)	27	29	29	29

Afin d'évaluer la quantité d'ions chlorure en solution dans les dalles B, C et D, le liquide interstitiel du béton a été extrait à l'aide d'un dispositif comprenant une presse et une cellule d'extraction, sur des éprouvettes âgées de 28 jours. Les solutions interstitielles extraites des dalles C (49 mmol.L⁻¹) et D (90 mmol.L⁻¹) sont respectivement 5 fois et 9 fois plus concentrées en Cl⁻ que la solution extraite de la dalle B (9,9 mmol.L⁻¹).

Guissi (2004) a étudié l'évolution de la résistivité électrique des dalles B, C et D au cours du temps. Pour cela, il a réalisé des mesures électriques à l'aide d'un dispositif de type Wenner. Les résultats montrent que (Figure 4. 7) :

- la résistivité électrique augmente de façon logarithmique au cours du temps, quelque soit la teneur en chlorures ;
- à un instant donné, plus la teneur en chlorures est élevée plus la résistivité électrique est faible.

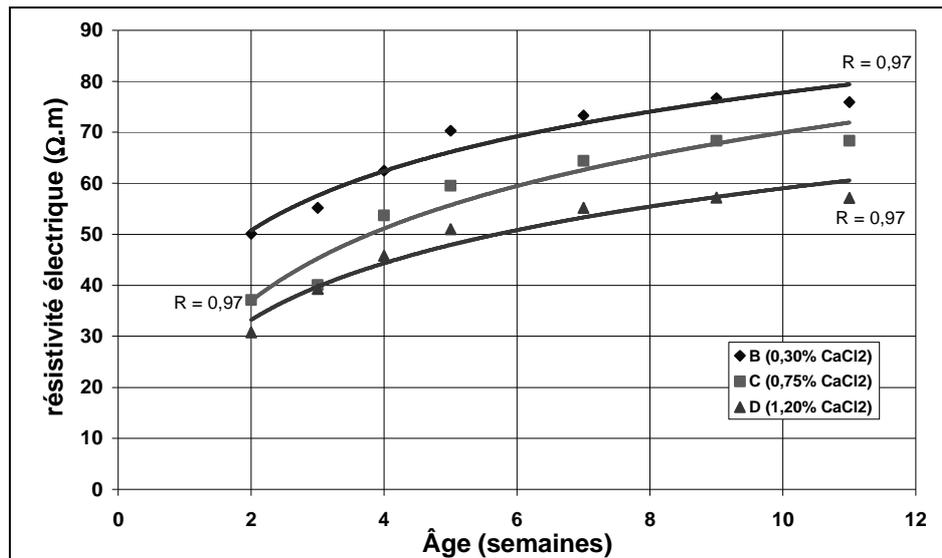


Figure 4.7 Effet des ions chlorures sur la résistivité électrique (d’après Guissi 2004)

Afin de poursuivre les travaux initiés par Guissi (2004), j’ai réalisé des mesures de résistivité électrique par quadripôle carré, en août 2004 (110 semaines après le coulage du béton). Sur toute la surface des dalles (A, B, C et D), un maillage régulier permet de positionner 36 points de mesure. Avec le protocole choisi, 90 mesures sont effectuées pour chaque dimension du dispositif (Q5 et Q10) et pour chaque sens d’injection du courant électrique (α et β). Le traitement statistique des données permet d’éliminer des valeurs aberrantes. Par ailleurs, l’étude des résultats selon le sens d’injection du courant ne révèle pas d’anisotropie électrique du béton. Ainsi, il est possible de calculer une résistivité électrique moyenne par taille de dispositif, en ne tenant plus compte du sens d’injection du courant. Associé à cette moyenne, nous avons calculé le coefficient de variation associé (voir annexe 3).

Les résultats sont présentés dans le Tableau 4. 5.

Tableau 4. 5 Influence mesurée de la teneur en chlorures sur la résistivité électrique

	A		B		C		D	
	Q5	Q10	Q5	Q10	Q5	Q10	Q5	Q10
Résistivité apparente <i>nombre de valeurs retenues</i>	179	175	179	162	179	164	174	179
<i>moyenne (Ω.m)</i>	279,6	198,6	29,0	80,3	45,9	45,5	35,9	49,1
<i>CV (%)</i>	52,7	127,8	31,8	177,5	39,4	78,1	35,2	96,4
[Cl] (% par masse de ciment)	0		0,30		0,75		1,20	

Les valeurs moyennes de la résistivité apparente ne permettent pas de classer les dalles selon leur teneur en chlorures. Ces résultats sont en désaccord avec ceux obtenus par Guissi (2004) sur ces mêmes corps d’épreuve. De plus, nous pouvons remarquer les très forts coefficients de variation associés à chaque moyenne (> 31% pour Q5 et > 78% pour Q10).

Afin d’expliquer ces résultats, je propose les hypothèses suivantes :

- formulation : bien que les quatre formulations soient identiques, les bétons sont tous différents de part leurs propriétés à l’état frais et à l’état durci. Or, les résultats

obtenus par Guissi (2004) montrent que la mesure électrique n'est pas sensible à cette différence ;

- dosage : aux vues des analyses de la teneur en chlorures contenue dans la solution interstitielle lors du gâchage, les dosages sont réalisés convenablement ;
- conditionnement : après les mesures réalisées par Guissi, à l'été 2002, les quatre dalles ont vieilli en environnement naturel, en extérieur. Elles ont donc subi de fortes variations de température entre l'hiver et l'été. De plus, conservées dans l'eau durant deux hivers, elles ont été confrontées au phénomène de gel/dégel. Enfin, non protégées des précipitations, les chlorures présents dans la solution interstitielle ont pu être lessivés plusieurs fois. La teneur en chlorures est probablement différente des dosages réalisés à 28 j.

Toutes les précautions ont été prises lors des mesures (trois séries de mesures ont été réalisées) et lors du traitement des données. L'hypothèse retenue pour expliquer nos résultats est un mauvais conditionnement des éprouvettes au cours de leur vieillissement.

Sur ces mêmes dalles, des mesures par thermographie infrarouge passive ont été réalisées au cours d'une journée. Les dalles ont alors subi les sollicitations thermiques naturelles dues au cycle diurne. Les images thermiques ne présentant pas d'anomalie de température, la moyenne de la température de surface pour chaque dalle a été calculée. Les résultats sont présentés sur la Figure 4. 8.

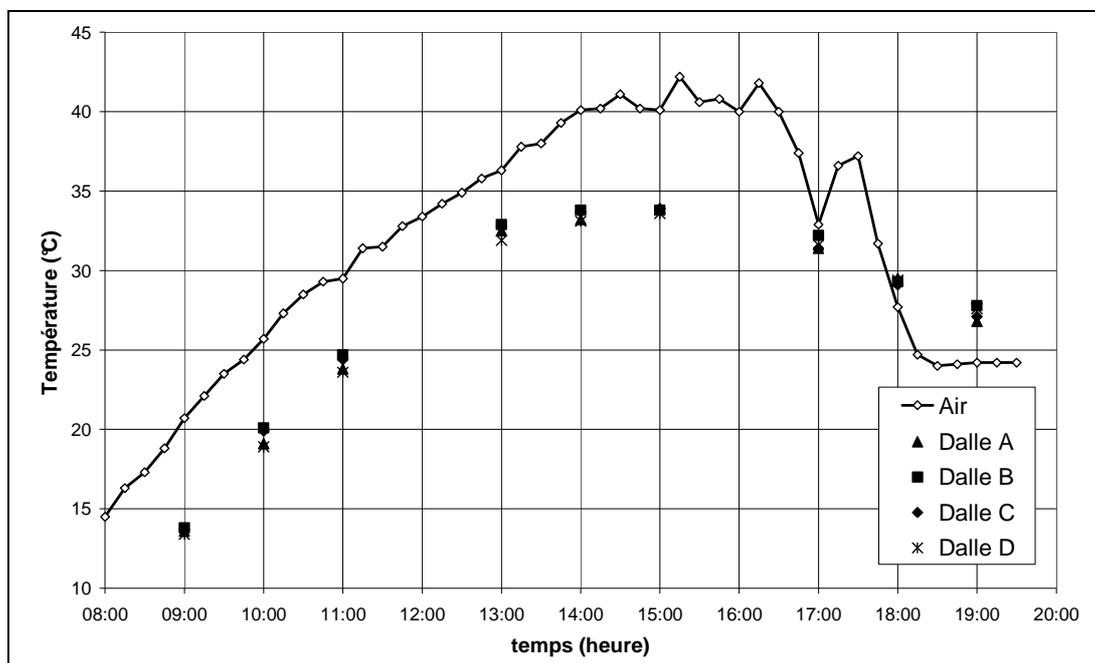


Figure 4. 8 Influence de la teneur en chlorures sur la température de surface

La température moyenne de surface de chaque dalle évolue de façon identique quelque soit le mélange. Ainsi, entre 9h et 14h, l'augmentation de température de surface des dalles A, B, C et D est respectivement de 19,6°C, 20°C, 20°C et 19,7°C. Dans le même temps, la température de

l'air augmente de 19,4°C. Sur cette expérience, l'inertie thermique est sensiblement la même pour les quatre formulations.

Ces résultats sont en accord avec la bibliographie : la présence d'ions chlorure dans le béton en faible quantité (ici \leq à 1,2%) ne modifie pas de façon significative ses propriétés thermiques.

4.2 AJOUTS DANS LE BÉTON

4.2.1. CENDRES VOLANTES

Les cendres volantes sont des pouzzolanes artificielles, c'est-à-dire des matériaux siliceux. Ses particules sont sphériques (diamètre de 1 à 100 μm) et ont une finesse très élevée (Neville 2000). Ainsi elles interagissent facilement avec l'hydroxyde de calcium (ou chaux) produit par l'hydratation du ciment.

L'addition de cendres volantes à une composition de béton a pour effet de réduire la porosité du matériau, ce qui influence la conduction du courant électrique et de la chaleur dans le béton (Bapat 2001).

4.2.1.1. EN ÉLECTRIQUE

La présence de cendres volantes augmente la résistivité électrique du béton de façon très importante. Cabrera *et al.* 1994 montrent dans leur étude, que le remplacement de 30% de ciment par des cendres volantes fait augmenter de 20% la résistivité électrique du béton. Cette tendance est confirmée par Baweja *et al.* (1996).

4.2.1.2. EN THERMIQUE

Kim *et al.* (2003) ont montré que la présence de cendres volantes diminue la conductivité thermique du béton (Tableau 4. 6).

Tableau 4.6 Influence de la présence de cendres volantes sur la conductivité thermique (adapté de Kim *et al.* 2003)

Cendres volantes (%)	k ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)
0	1,16
50	1,07
100	1,00

4.2.2. FUMÉE DE SILICE

L'addition de fumées de silice, dont la taille est 100 fois plus petite que celle des particules de ciment Portland, entraîne une modification de la microstructure du béton et notamment une diminution de la porosité de la pâte, en se substituant en partie à l'eau (Berke *et al.* 1991, Dupain *et al.* 1995).

4.2.2.1. EN ÉLECTRIQUE

La résistivité électrique augmente très fortement avec la présence de fumées de silice dans le béton (Wolsiefer 1991, Dotto *et al.* 2004). Berke *et al.* (1992) précisent que plus le rapport E/C diminue, plus l'effet de la fumée de silice est significatif (Figure 4. 9) : dans leur étude, le remplacement de 15% de ciment par des fumées de silice multiplie d'un facteur 10 la résistivité électrique du béton.

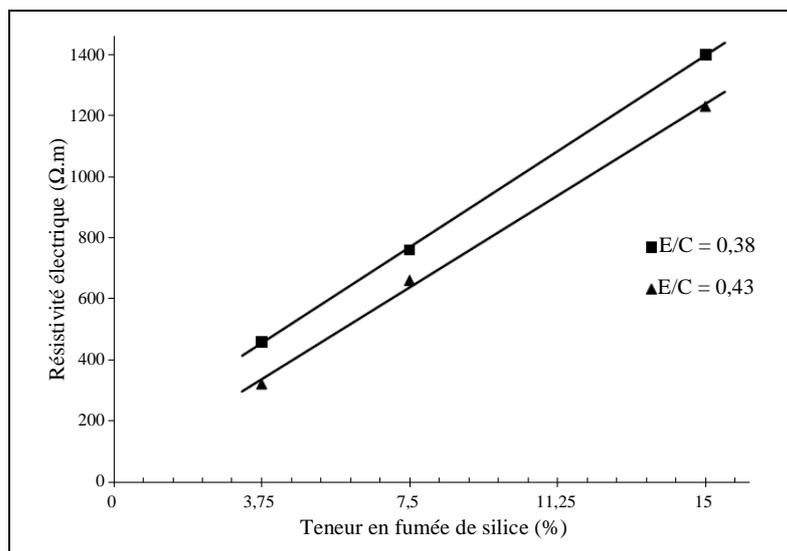


Figure 4. 9 Effet de la présence de fumée de silice sur la résistivité électrique (d'après Berke *et al.* 1992)

4.2.2.2. EN THERMIQUE

La conductivité thermique de la fumée de silice est faible (Fu *et al.* 1997).

L'addition de cette substance dans le béton augmente la chaleur spécifique et diminue la conductivité et la diffusivité thermique (Xu *et al.* 1999) : dans leur étude, le remplacement de 15% de ciment par des fumées de silice diminue de 30% la conductivité thermique du béton.

4.2.2.3. ÉTUDE EXPÉRIMENTALE

Trois mélanges de béton, B1, B3 et B5, de composition différente ont été préparés afin d'étudier les relations entre les propriétés mécaniques et physiques du béton (Rivard 2003^b). Pour les mélanges B3 et B5, le ciment utilisé est un ciment Portland ordinaire, alors que pour le mélange B1, il s'agit d'un ciment contenant de la fumée de silice. Un superplastifiant a également été ajouté au mélange B1. Les trois dalles (1 x 1 x 0,26 m) sont non armées.

La formulation des bétons est présentée au Tableau 4. 7, de même que leurs propriétés à l'état frais et à l'état durci. Le mélange B1 se distingue nettement des deux autres, tant par ses propriétés mécaniques que par sa microstructure. Il s'agit d'un béton très résistant (80 MPa en résistance en compression), avec une faible porosité efficace (8,7%) et contenant 5% de fumée de silice. Les mélanges B3 et B5 présentent des propriétés mécaniques similaires (environ 15 MPa en résistance en compression) : ils sont peu résistants. Les mélanges B3 et B5 sont plus poreux (respectivement 18,1 et 13,3% de porosité efficace).

Tableau 4. 7 Formulation et propriétés des mélanges B1, B3 et B5 (d'après Rivard 2003^b)

	B1	B3	B5
Date de coulée	28 oct. 2002	05 nov. 2002	05 nov. 2002
E/C	0,30	0,67	0,84
Formulation			
Ciment (kg.m ⁻³)	510	205	510
Fumée de silice (kg.m ⁻³)	27,5	---	---
Eau (kg.m ⁻³)	155,6	137	428
Granulat (kg.m ⁻³)	900	798	689
Sable (kg.m ⁻³)	793	1140	1002
Entraîneur d'air (mL.L ⁻¹)	0,1	0,1	0,1
Superplastifiant (mL.L ⁻¹)	7,5	---	---
Propriétés à l'état frais			
Température (°C)	21,3	14,5	16,8
Air occlus (%)	6,8	6,3	---
Masse volumique (kg.m ⁻³)	2283	2260	2262
Affaissement (mm)	255	100	230
Propriétés à l'état durci			
Porosité ouverte (%)	8,7	18,1	13,3
f'c à 28jours (MPa)	80,1	14,8	15
E à 28 jours (GPa)	38,4	22,7	21,9

J'ai réalisé des mesures de résistivité électrique par quadripôle carré, en août 2004 (90 semaines après le coulage du béton). Sur toute la surface des dalles (B1, B3 et B5), un maillage régulier a permis de positionner 12 points de mesure. Avec le protocole choisi, 27 mesures ont été effectuées avec le dispositif Q5 en utilisant les deux sens d'injection du courant électrique (α et β). L'étude des résultats ne révèle pas d'anisotropie électrique du béton. Ainsi, il est possible de calculer une résistivité électrique moyenne en ne tenant plus compte du sens d'injection du courant. Associé à cette moyenne, nous avons calculé le coefficient de variation (voir annexe 3).

Les résultats des mesures électriques sont présentés dans le Tableau 4. 8.

Tableau 4. 8 Influence mesurée de la présence de fumée de silice sur la résistivité électrique (dispositif Q5)

	B1	B3	B5
Résistivité apparente			
<i>nombre de valeurs retenues</i>	54	54	54
<i>moyenne ($\Omega.m$)</i>	443,6	55,2	46,0
<i>CV (%)</i>	16,1	23,9	27,1

Ces résultats sont en accord avec la bibliographie : la présence de fumée de silice augmente de façon importante la valeur de la résistivité électrique apparente, dans notre cas d'un facteur 10 (même si le rapport E/C et le dosage en ciment sont différents entre les bétons).

Sur ces mêmes dalles, des mesures par thermographie infrarouge passive ont été réalisées au cours d'une journée. Les images thermiques ne présentant pas d'anomalie de température, la moyenne de la température de surface pour chaque dalle a été calculée. Les résultats sont présentés sur la Figure 4. 10.

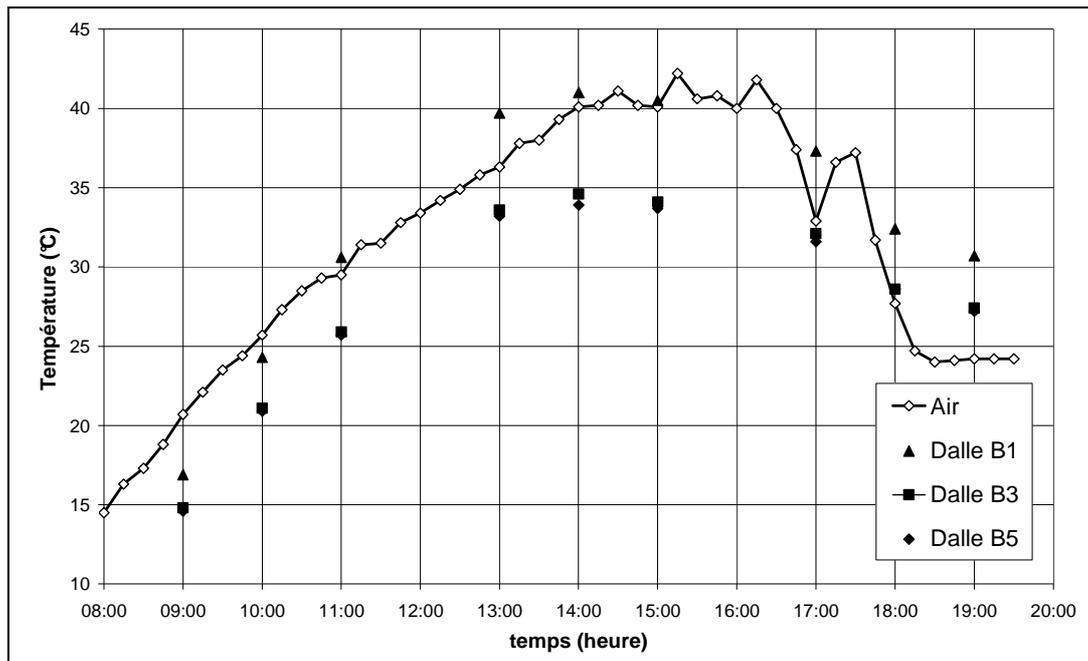


Figure 4.10 Influence de la fumée de silice sur la température de surface

En amplitude, la variation de la température moyenne de la surface de la dalle B1 contenant des fumées de silice est plus importante que celles des dalles B3 et B5. Sur la base de ces résultats, la présence de fumées de silice semble diminuer l'inertie thermique du béton. Or, d'après Xu *et al.* (1999), l'addition des fumées de silice dans le béton diminue la diffusivité et donc augmente l'inertie thermique. En outre, il est communément admis que l'addition de cette substance assombrit fortement la couleur du béton. Par conséquent, l'émissivité de la surface est différente entre un béton sans et avec des fumées de silice, ce qui explique que l'inertie thermique diminue.

4.2.3. FIBRES

L'utilisation de fibres est un moyen de modifier les caractéristiques mécaniques ou de mise en forme d'un béton.

4.2.3.1. EN ÉLECTRIQUE

La présence de fibres perturbe la conduction du courant électrique dans le matériau. Elles peuvent, selon leur nature (métalliques, de carbone, de verre, ou synthétiques), avoir différentes influences sur les propriétés globales du béton (Wen *et al.* 2000). La présence de fibres métalliques a un effet plus marqué que celle de fibres organiques (en carbone ou plastique). Lataste (2002) propose d'utiliser la mesure électrique, et en particulier l'anisotropie, afin d'estimer l'orientation des fibres dans le béton.

4.2.3.2. ÉTUDE EXPÉRIMENTALE

a. Présentation de l'étude

Dans le cadre des travaux de réfection du Pont Cosmos qui relie l'île Sainte-Hélène à l'île Notre-Dame (Montréal), une partie du tablier a été réparée avec six types de bétons de resurfaçage renforcés de fibres (Gagné *et al.* 2003) : deux bétons à retrait compensé (BRC), un

béton à hautes performances (BHP), deux bétons ordinaires (BO), et un béton avec un agent réducteur de retrait (BO-Éclipse). Chaque resurfaçage a une dimension de 9,2 x 2,5 m sur une épaisseur de 8 cm (Figure 4. 11).

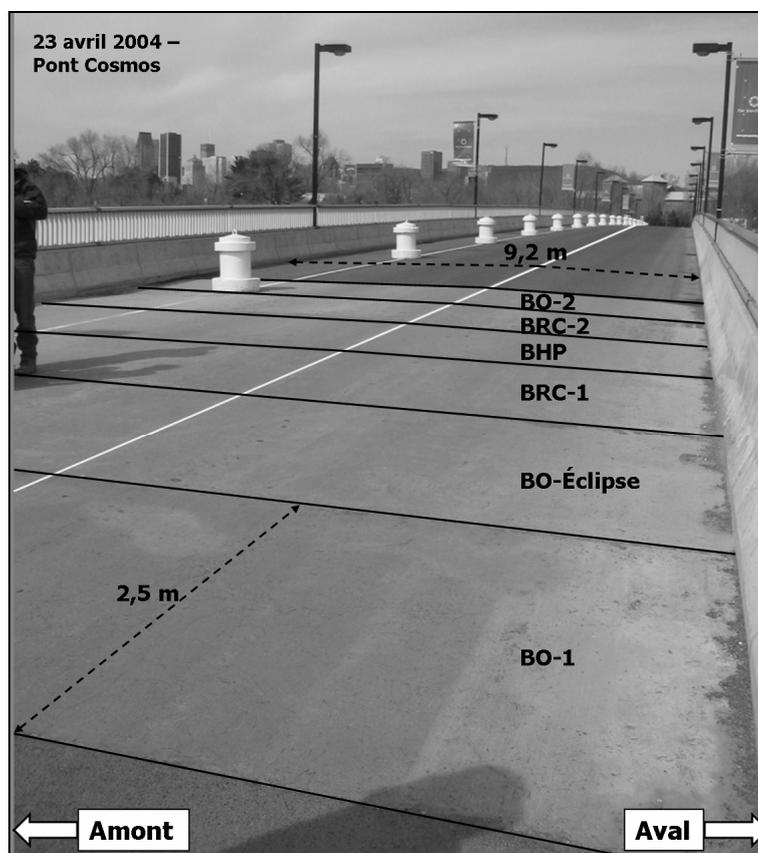


Figure 4. 11 Pont Cosmos (Montréal)

Les principales propriétés des bétons sont données dans le Tableau 4. 9.

Tableau 4. 9 Propriétés des bétons de resurfaçage (d'après Gagné *et al.* 2003)

	BRC-1	BRC-2	BHP	BO-1	BO-2	BO-Éclipse
E/C	0,40	0,42	0,34	0,38	0,40	0,42
Formulation						
Ciment	Type K	10SF + agent exp.	10SF	10SF	10SF	10SF
Fibres (kg.m ⁻³)	Acier 38	Acier 42	Acier 33	Acier 42	Synthétique 5,2	Synthétique 4,0
Agent réducteur de retrait	-	-	-	-	-	oui
Propriétés à l'état frais						
Air occlus (%)	8,0	7,8	20	3,8	17	18
Masse volumique (kg.m ⁻³)	2220	2250	1890	2420	1950	1860
Propriétés à l'état durci						
f'c à 28j (MPa)	43,6	40,6	25,2	79,4	35,8	15,1

Les formulations des bétons sont toutes différentes. Néanmoins, il est possible de distinguer deux groupes selon la nature des fibres ajoutées : acier ou synthétique (Figure 4. 12). Il est important de remarquer que le béton « BHP » est défini en terme de durabilité au gel et non sur des critères mécaniques ($f_c = 25,2$ MPa).



Figure 4. 12 Fibres en acier du béton BO-Éclipse (à gauche) et fibres synthétiques du béton BRC-2 (à droite)

b. Mesures électriques

Des profils de mesure de résistivité électrique de 10 points sont réalisés sur chaque dalle, avec le dispositif Q5 et deux orientations d'injection du courant. Les mesures sont possibles et peu bruitées sans aucun protocole d'humidification.

Après analyses statistiques des données (par fonction de répartition), la moyenne de la résistivité électrique est calculée pour chaque profil de mesure, en considérant le béton de chaque dalle homogène et en prenant soin d'éliminer les mesures aberrantes (Tableau 4. 10). Le coefficient de variation de la résistivité illustre la variabilité des mesures.

Tableau 4. 10 Résistivité électrique moyenne (Q5)

	BRC-1	BRC-2	BHP	BO-1	BO-2	BO-Éclipse
Résistivité apparente						
<i>nombre de valeurs retenues</i>	18	18	19	16	19	20
<i>moyenne ($\Omega.m$)</i>	16,7	14,2	133,7	120,2	335,3	204,7
<i>CV (%)</i>	57,7	50,7	69,4	55,6	14,2	21,2

Deux groupes de béton peuvent être différenciés en se basant sur deux indicateurs : la valeur moyenne et le coefficient de variation de la résistivité électrique. Les seuils définis ici sont arbitraires. Ils tiennent compte des résultats issus d'une seule série d'essais et demandent à être validés par d'autres expériences. D'autre part, les formulations et les propriétés des bétons étant très différentes, il est difficile d'attribuer à un paramètre unique les variations de résistivité observées.

Le premier groupe est défini par des valeurs moyennes de résistivité inférieures à 150 $\Omega.m$ et un coefficient de variation supérieur à 50%. Ce groupe comprend les bétons contenant des **fibres en acier** (BRC-1, BRC-2, BHP et BO-1). La présence de ce type de fibres favorise la

conduction du courant électrique dans le béton et donc diminue sa résistivité électrique. A l'intérieur même de ce groupe, il est possible d'interpréter les variations des indicateurs en se basant sur les formulations et les propriétés des bétons. En effet, BRC-1 et BRC-2 sont très proches de part leurs formulations (respectivement E/C = 0,40 et 0,42) et leurs propriétés mécaniques (respectivement $f_c = 43,6$ et $40,6$ MPa). Leurs valeurs moyennes et leurs coefficients de variation de la résistivité électrique sont comparables. Concernant le béton référencé BHP (vis-à-vis de la durabilité au gel), il a le plus petit rapport E/C (0,34). Il contient 20% d'air entraîné (ce qui augmente la porosité totale) et a une faible résistance en compression ($f_c = 25,2$ MPa). Pour ce groupe, la valeur moyenne de la résistivité électrique de ce béton est la plus élevée ($133,7 \Omega.m$) ; il en est de même pour son coefficient de variation (69,4%). Les bétons BRC-2 et BO-1 se différencient par le pourcentage en air occlus (respectivement 7,8 et 3,8%) et leurs résistances en compression (respectivement $40,6$ et $79,4$ MPa). Il est couramment admis que la résistance en compression diminue avec l'augmentation de la porosité totale. De ce fait, il est possible de déduire que la porosité totale du béton BRC-2 est supérieure à celle du BO-1. Par extension, nous pouvons faire l'hypothèse que cette remarque est également valable si l'on parle de la porosité efficace. Les valeurs moyennes de la résistivité électrique de ces bétons ($14,2 \Omega.m$ pour BRC-1 et $120,2 \Omega.m$ pour BO-1) confirme notre hypothèse : la valeur de résistivité électrique du béton augmente avec la porosité efficace qui elle-même influence la résistance en compression simple.

Le second groupe est défini par des valeurs moyennes de résistivité supérieures à $200 \Omega.m$ et un coefficient de variation inférieur à 30%. Ce groupe comprend les bétons contenant des **fibres synthétiques** (BO-2 et BO-Éclipse). Les deux bétons ont des formulations voisines (E/C, ciment, fibres, air occlus, masse volumique). Le béton référencé BO-Éclipse contient un agent réducteur de retrait. Sa résistance en compression est alors plus faible que celle du BO-2 (respectivement $35,8$ et $15,1$ MPa). Comme précédemment, nous pouvons établir un lien entre la résistance en compression, la porosité totale, la porosité ouverte puis la résistivité électrique : la valeur moyenne de la résistivité électrique du béton BO-2 ($335,3 \Omega.m$) est nettement supérieure à celle du béton BO-Éclipse ($204,7 \Omega.m$).

La Figure 4. 13 représente la valeur du logarithme décimal de l'anisotropie électrique pour chaque type de béton pour le dispositif porte-électrodes Q5. Lataste (2002) a défini un seuil de $\pm 0,3$ qui permet une détection des particularités présentant un allongement particulier. Dans le cas de la présence de fibres, ce seuil peut être pris en compte.

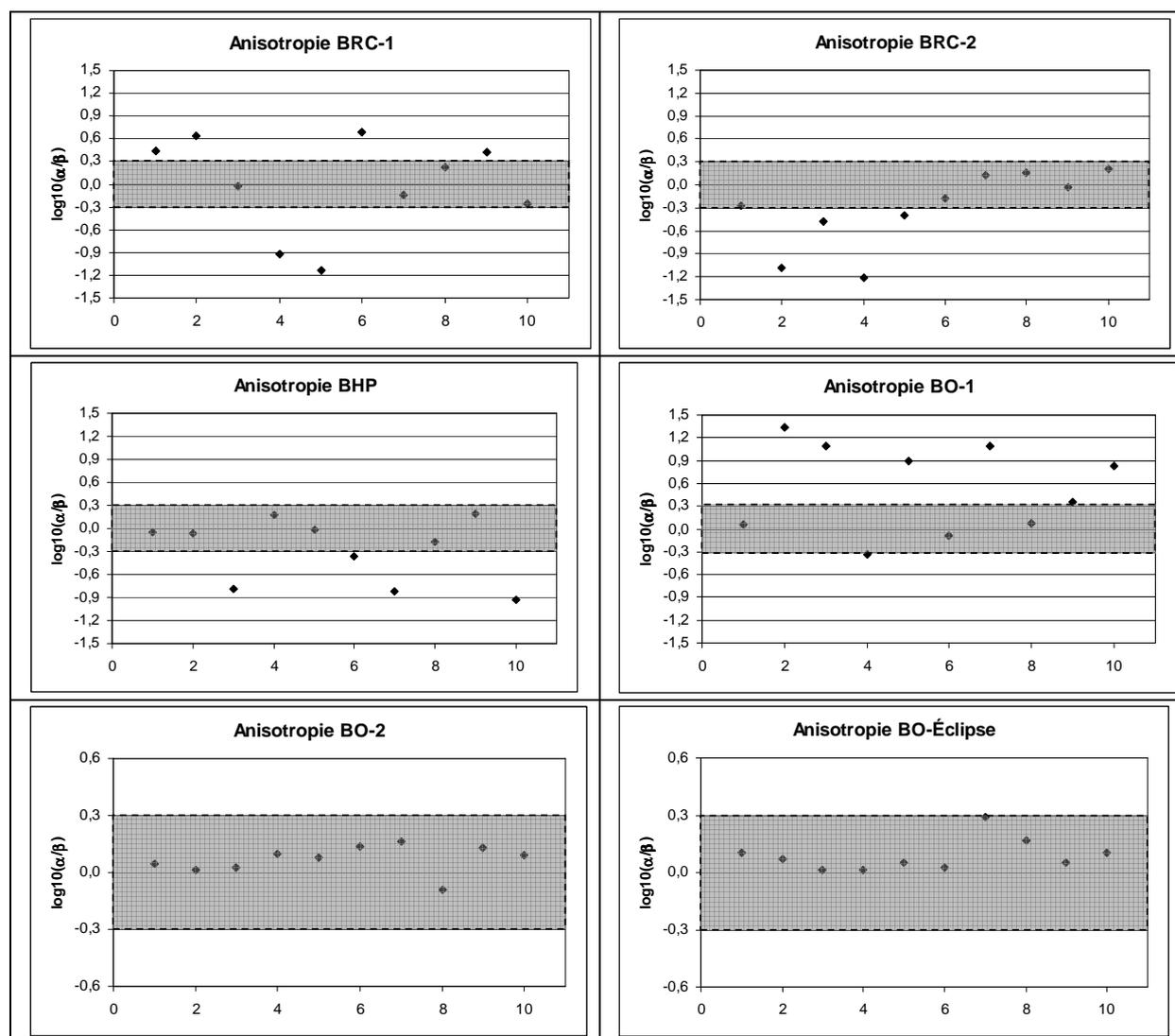


Figure 4.13 Résultats de l'anisotropie électrique

Il est possible de distinguer une nouvelle fois deux groupes de béton en utilisant les valeurs du logarithme décimal de l'anisotropie électrique :

- les bétons référencés BRC-1, BRC-2, BHP et BO-1, contiennent des fibres en acier. Ils présentent des valeurs élevées du logarithme décimal de l'anisotropie. Ainsi, il y a respectivement 55, 60, 65 et 55% des valeurs en dehors de la gamme $\pm 0,3$. La présence de ce type de fibres dans le béton devient une voie privilégiée de la circulation du courant électrique ;
- les bétons référencés BO-2 et BO-Éclipse contiennent des fibres synthétiques. Les variations du logarithme décimal de l'anisotropie sont inférieures au seuil de $\pm 0,3$. La présence de ce type de fibres n'entraîne pas d'anisotropie électrique du matériau.

c. Mesures par thermographie infrarouge

L'auscultation a été effectuée à l'aide d'une caméra infrarouge (ThermaCam PM 575). Les images thermiques sont prises à une hauteur de 1,50 m du sol. À cette distance de la zone étudiée et selon l'ouverture de l'objectif de la caméra infrarouge, la dimension de ces images est de

0,65 x 0,50 m. La valeur du coefficient d'émissivité du béton utilisée pour les mesures est $\varepsilon = 0,94$.

Deux séries de mesures ont été réalisées afin de suivre l'évolution de la température de la surface des différents bétons : la première à 8h30 et la seconde à 14h. Pour ces deux séances de mesures, les dalles ont la même exposition c'est-à-dire que l'ensoleillement est le même.

Lors de ces deux séances de mesure, aucune anomalie thermique n'a été mise en évidence à la surface des bétons. Le Tableau 4. 11 donne une valeur moyenne de la température de surface du béton, pour les deux séances de mesure. La troisième colonne est la différence de température :

Tableau 4. 11 Température moyenne de la surface du béton

	T _{8h30} (en °C)	T _{14h} (en °C)	ΔT (en °C)
Air	10,1	32,0	+ 21,9
BRC-1	12,9 ± 0,9	30,9 ± 0,8	+ 18
BRC-2	11,2 ± 1,2	27,5 ± 0,6	+ 16,3
BHP	13,1 ± 1,1	31,1 ± 0,6	+ 18
BO-1	14,1 ± 0,8	29,7 ± 0,9	+ 15,6
BO-2	12,6 ± 0,9	28,1 ± 0,6	+ 15,5
BO-Éclipse	13,9 ± 0,8	34,4 ± 0,9	+ 20,5

Entre les deux séances de mesure, la température de l'environnement a augmenté, passant de 10,1°C à 8h30 à 32°C à 14h. Dans le même temps, les températures à la surface des dalles ont également augmenté. Cette augmentation de température n'est pas la même pour l'ensemble des bandes ce qui traduit des propriétés thermiques des bétons différentes.

Les résultats présentés ici ne permettent pas de mettre en relation la variation de température à la surface des dalles et la nature des fibres.

d. Conclusion de l'étude

L'étude présentée ici vise à évaluer l'influence de la présence de fibres dans le béton sur ses propriétés électriques et thermiques.

Les résultats des mesures électriques permettent de dégager **trois indicateurs** : la valeur moyenne de la résistivité électrique, le coefficient de variation de la résistivité (ou variabilité des mesures) et le logarithme décimal de l'anisotropie. En effet, à partir de ces trois indicateurs, il est possible de distinguer les bétons selon la nature des fibres (en acier ou synthétique).

Concernant les résultats des mesures par thermographie infrarouge, la nature des fibres ne semble pas être un paramètre détecté par cette méthode.

4.3 INFLUENCE DES FACTEURS EXTÉRIEURS

Les deux méthodes choisies dans le cadre de cette recherche (résistivité électrique et thermographie infrarouge passive) sont développées pour être utilisées sur site, en conditions environnementales naturelles. Les influences de l'humidité de surface du béton et de la température des parements sont notables sur les propriétés électriques et thermiques du matériau.

4.3.1. HUMIDITÉ DE SURFACE

4.3.1.1. EN ÉLECTRIQUE

Gowers *et al.* (1993) ont montré que pour pouvoir réaliser des mesures électriques sur un parement de béton, il est nécessaire d'avoir un degré de saturation de la couche superficielle élevé, même si cela représente un biais de mesure qu'il faut maîtriser.

Lataste *et al.* (2001) ont établi un protocole d'humidification du parement ausculté avant la réalisation des mesures électriques pour s'affranchir de la résistance de contact entre les électrodes et le béton. Ils concluent que les conditions hydriques de la couche superficielle du matériau conditionnent la capacité de l'appareil à effectuer la mesure.

L'humidification de la surface élargit ainsi le domaine d'utilisation de la méthode. Pour des mesures réalisées moins d'une minute après l'humidification, on modifie la valeur de la résistivité apparente mesurée, mais pas les résultats en termes de variations relatives (Lataste 2002). Il semble que le biais soit lié directement à l'évolution de l'humidité dans le matériau, et non à la présence d'un fin film humide à la surface du parement. Au-delà de cette minute, il existe une dérive temporelle de la résistivité apparente liée à la diffusion de cette humidité dans le béton. Il est possible d'évaluer la perturbation due à cette dérive afin de la corriger. L'intensité de l'humidification du parement permet d'améliorer la répétabilité des mesures. Elle n'améliore pas les contrastes de résistivité par zone, mais augmente le temps possible de mesure avant le séchage de la surface.

4.3.1.2. EN THERMIQUE

En considérant un milieu poreux humide, tel que le béton, initialement en équilibre thermique et hydrique, auquel on impose un gradient de température, l'eau contenue dans ce milieu aura tendance à modifier sa distribution initiale. Si le milieu n'est pas saturé, la teneur en eau va augmenter du côté froid. C'est le phénomène de « thermomigration » (Maâledj 1968). Ce déplacement est lié au gradient de pression partielle de vapeur d'eau, qui augmente avec la température, selon la loi des gaz parfaits.

Les mouvements d'humidité influencent fortement les mesures puisque les paramètres thermiques sont dépendants de la teneur en eau. Haelterman *et al.* (1993) et Avdelidis *et al.* (2003) utilisent la thermographie infrarouge comme outil d'évaluation de la répartition des gradients d'humidité en surface d'un parement.

Comme pour les propriétés électriques, l'humidification de la surface d'un parement influence les propriétés thermiques.

4.3.1.3. MODÉLISATION DE L'EFFET D'UNE COUCHE SATURÉE SUR LES MESURES DE RÉSISTIVITÉ ÉLECTRIQUE

La présence d'une couche très conductrice en surface influence la résistivité électrique apparente. Cet effet se traduit par une diminution de la résistivité apparente. Cette baisse est d'autant plus importante que l'épaisseur de cette couche est grande.

a. Présentation de la démarche

L'objectif de cette étude est de définir le taux de perturbation généré par la présence d'une couche très conductrice en surface d'une dalle semi infinie sur la mesure de résistivité par un quadripôle carré et d'évaluer l'effet de la variation d'épaisseur de cette couche.

Afin de répondre à cet objectif, trois approches sont possibles :

- une approche analytique : cette approche est la plus simple et la plus rigoureuse, même si quelques hypothèses sont nécessaires. Elle utilise de la théorie des images de Thomson, développée et appliquée à la mesure électrique par Stefanescu *et al.* (1930) et Hummel (1932) ;
- une approche numérique : en utilisant l'analogie entre les lois qui régissent la conduction du courant électrique et celles utilisées pour la conduction de la chaleur, une modélisation par éléments finis (sous le logiciel CESAR-LCPC) peut être effectuée. Cette approche nécessite d'élaborer correctement le modèle en terme de dimensions, de maillage, de conditions aux limites et de chargements ;
- une approche expérimentale : cette dernière approche permet de valider les résultats obtenus analytiquement et numériquement. Mais que ce soit en laboratoire ou sur site, il est très difficile d'avoir seulement le paramètre considéré qui varie.

Pour cette étude de l'influence d'une couche saturée en surface, nous avons choisi de résoudre le problème de façon analytique, en utilisant la théorie des images de Thomson (analogue à la théorie des images en optique), et également de façon numérique.

b. Objectifs

Cette étude vise à permettre de :

- corriger la valeur de résistivité apparente mesurée : la présence du front de saturation constitue un biais de mesure. Or, connaissant l'épaisseur du front de saturation sur un prélèvement par carottage à sec, il est alors possible de corriger la valeur de résistivité apparente mesurée de façon à s'affranchir de cet effet ;
- estimer la profondeur du front de saturation : il est possible de mesurer la résistivité électrique du béton ρ_2 dans une zone saine ainsi que la résistivité du béton saturé ρ_1 (par prélèvement puis saturation d'une carotte). La résistivité apparente mesurée expérimentalement ρ_a dépend alors de la profondeur du front d'humidification.

c. Approche analytique

L'approche analytique considère un modèle semi-infini à deux couches séparées par une interface (Figure 4. 14).

A et M sont respectivement l'électrode de courant et celle de potentiel, séparées d'une distance « a ». A', A'', A'''... représentent les images de A par rapport à l'interface séparant les deux milieux. Ces images sont distantes de M. La couche superficielle a une épaisseur « z » ; la couche inférieure a une épaisseur infinie. Au dessus de la couche superficielle, on considère un milieu de résistivité infinie, de l'air. Les deux milieux sont séparés par une interface et sont caractérisés par leurs résistivités électriques, ρ_1 et ρ_2 .

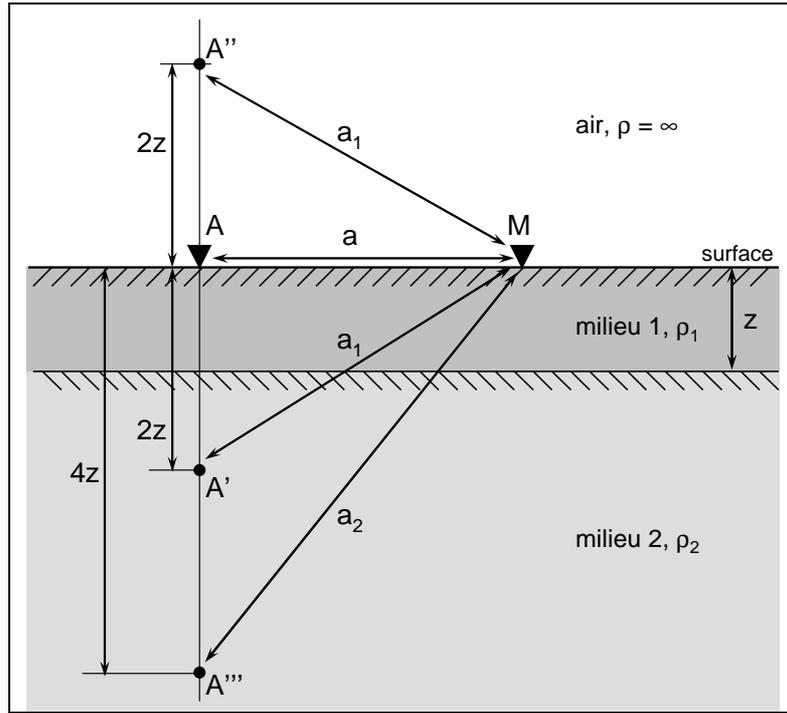


Figure 4. 14 Théorie d'un modèle à deux couches

L'interface entre les deux milieux est considérée comme un miroir semi transparent et caractérisée par son pouvoir réflecteur défini par $R = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1}$ (valeurs comprises entre -1 et 1).

Il est alors possible de démontrer que pour une source placée en A (solicitée par un courant +I) au point M, le potentiel V_{M-A} est dû à A et à l'influence des différentes images A', A'', A'''... de telle sorte que :

$$V_{M-A} = \frac{I \cdot \rho_1}{2\pi} \left[\frac{1}{a} + 2 \cdot \sum_{i=1}^{\infty} \frac{R^i}{\sqrt{a^2 + 4i^2 z^2}} \right]$$

En procédant de la même façon que pour le calcul du potentiel V_{M-A} , on définit le potentiel V_{M-B} dû à B (avec, dans ce cas, un courant -I), V_{N-A} dû à A et V_{N-B} dû à B. Dans le cas d'un quadripôle carré ABNM de côté a, placé en surface, on obtient donc :

$$\begin{aligned} V_{M-A} &= \frac{I \cdot \rho_1}{2\pi} \left[\frac{1}{a} + 2 \cdot \sum_{i=1}^{\infty} \frac{R^i}{\sqrt{a^2 + 4i^2 z^2}} \right] & V_{N-A} &= \frac{I \cdot \rho_1}{2\pi} \left[\frac{1}{a\sqrt{2}} + 2 \cdot \sum_{i=1}^{\infty} \frac{R^i}{\sqrt{2a^2 + 4i^2 z^2}} \right] \\ V_{N-B} &= -\frac{I \cdot \rho_1}{2\pi} \left[\frac{1}{a} + 2 \cdot \sum_{i=1}^{\infty} \frac{R^i}{\sqrt{a^2 + 4i^2 z^2}} \right] & V_{M-B} &= -\frac{I \cdot \rho_1}{2\pi} \left[\frac{1}{a\sqrt{2}} + 2 \cdot \sum_{i=1}^{\infty} \frac{R^i}{\sqrt{2a^2 + 4i^2 z^2}} \right] \end{aligned}$$

Par ailleurs, les lois qui régissent la propagation des phénomènes électriques sont linéaires, ce qui signifie que l'on peut additionner algébriquement les potentiels créés par différentes sources. Le potentiel total en un point M sera $V_M = V_{M-A} + V_{M-B}$ pour deux pôles d'injection du courant électrique en A (+I) et B (-I).

La différence de potentiel $\Delta V = V_M - V_N$ s'écrit alors :

$$V_M - V_N = \frac{I \cdot \rho_1}{\pi} \left[\frac{1}{a} - \frac{1}{a\sqrt{2}} + 2 \cdot \sum_{i=1}^{\infty} \frac{R^i}{\sqrt{a^2 + 4i^2 z^2}} - 2 \cdot \sum_{i=1}^{\infty} \frac{R^i}{\sqrt{2a^2 + 4i^2 z^2}} \right]$$

Or, pour un dispositif quadripolaire carré, la résistivité apparente est de la forme :

$$\rho_a = \frac{2 \cdot \pi \cdot a}{2 - \sqrt{2}} \cdot \frac{V_M - V_N}{I}$$

D'où :

$$\rho_a = \frac{2 \cdot a \cdot \rho_1}{2 - \sqrt{2}} \cdot \left[\frac{1}{a} - \frac{1}{a\sqrt{2}} + 2 \cdot \sum_{i=1}^{\infty} \frac{R^i}{\sqrt{a^2 + 4i^2 z^2}} - 2 \cdot \sum_{i=1}^{\infty} \frac{R^i}{\sqrt{2a^2 + 4i^2 z^2}} \right]$$

A partir de cette équation, il est alors possible de calculer la résistivité apparente ρ_a en connaissant la résistivité de nos deux couches (ρ_1 et ρ_2), l'épaisseur de la couche superficielle « z » et la dimension du dispositif utilisé « a ».

Remarque :

- afin d'utiliser ces résultats quelle que soit la dimension du dispositif quadripôle carré utilisé (5 ou 10 cm de côté), l'abscisse des graphiques représentant les résultats est le rapport « z/a » (épaisseur de la couche superficielle rapportée à l'écartement des électrodes) ;
- de la même manière, les ordonnées des graphiques sont exprimées en erreur relative. Ainsi deux erreurs, Er_1 et Er_2 , peuvent être calculées selon la valeur de la résistivité apparente de référence utilisée, respectivement ρ_1 et ρ_2 :

$$Er_1 = \frac{\rho_a - \rho_1}{\rho_1} \quad \text{et} \quad Er_2 = \frac{\rho_a - \rho_2}{\rho_2}$$

- lorsque l'épaisseur de la couche superficielle « z » tend vers 0, la résistivité apparente ρ_a tend vers la résistivité ρ_2 ;
- lorsque l'épaisseur de la couche superficielle « z » tend vers $+\infty$, la résistivité apparente ρ_a tend vers la résistivité de cette même couche ρ_1 .

d. Approche numérique

La modélisation de la conduction électrique dans le béton est réalisée par l'intermédiaire du logiciel d'éléments finis 3D CESAR-LCPC. Pour cela, un bloc de 50 x 50 x 16 cm est construit par superposition de 16 éléments de 1 cm d'épaisseur (au final, le modèle compte 85 833 nœuds). Situés à 25 cm du centre du dispositif quadripolaire carré, les effets de bords latéraux sont alors négligeables. Le maillage est raffiné autour des points de contact avec les électrodes.

Les propriétés physiques des 16 éléments sont définis par la conductivité électrique dans les trois directions de l'espace (inverse de la résistivité) $\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \sigma_{zz}$ et $\sigma_{xy} = \sigma_{xz} = \sigma_{yz} = 0 \text{ S.m}^{-1}$. Le matériau ainsi défini est isotrope.

Deux sollicitations ponctuelles sont appliquées en surface du modèle afin de simuler l'injection du courant dans le matériau : en un point A, une sollicitation ponctuelle $I = 0,1 \text{ mA}$ et en un point B, distant de « a » du point A, une sollicitation $-I = -0,1 \text{ mA}$.

Numériquement, il est nécessaire de définir également une condition aux limites. Pratiquement, une valeur de débit ponctuel nulle est positionnée à la surface du modèle et située sur l'axe de symétrie entre A et B. La position et la valeur imposée du débit n'ont aucune influence sur le résultat final.

L'exploitation des résultats se fait alors en calculant la différence de potentiel obtenue par la simulation aux points M et N, de telle sorte que ABMN forme un carré de côté « a », puis en calculant la résistivité électrique apparente.

Dans le cas où les propriétés électriques de toutes les couches sont identiques (matériau homogène et isotrope), la valeur de la résistivité apparente doit être proche de la valeur théorique. Avec le modèle créé ici, l'écart entre la valeur calculée et la valeur théorique est d'environ 3,2%. Cette différence caractérise l'erreur générée par le calcul numérique.

e. Résultats

Les résultats sont obtenus en considérant le milieu 1 comme une couche conductrice (zone saturée) au dessus d'une couche plus résistante (béton sain) : le milieu 1 a une résistivité de 50 $\Omega.m$ et le milieu 2 de résistivité 150 $\Omega.m$ (béton humide). Ces valeurs sont issues de résultats expérimentaux obtenus sur des éprouvettes conditionnées en teneur en eau (RGC&U 2005).

La Figure 4. 15 illustre l'erreur relative Er_1 due à la présence d'une couche superficielle. Cette étude montre que lorsque le rapport « z/a » devient supérieur à 1,5 (analytiquement), alors les mesures ne sont plus perturbées de façon significative par une augmentation de la profondeur du front d'humidification (l'erreur relative est alors inférieure à 5%).

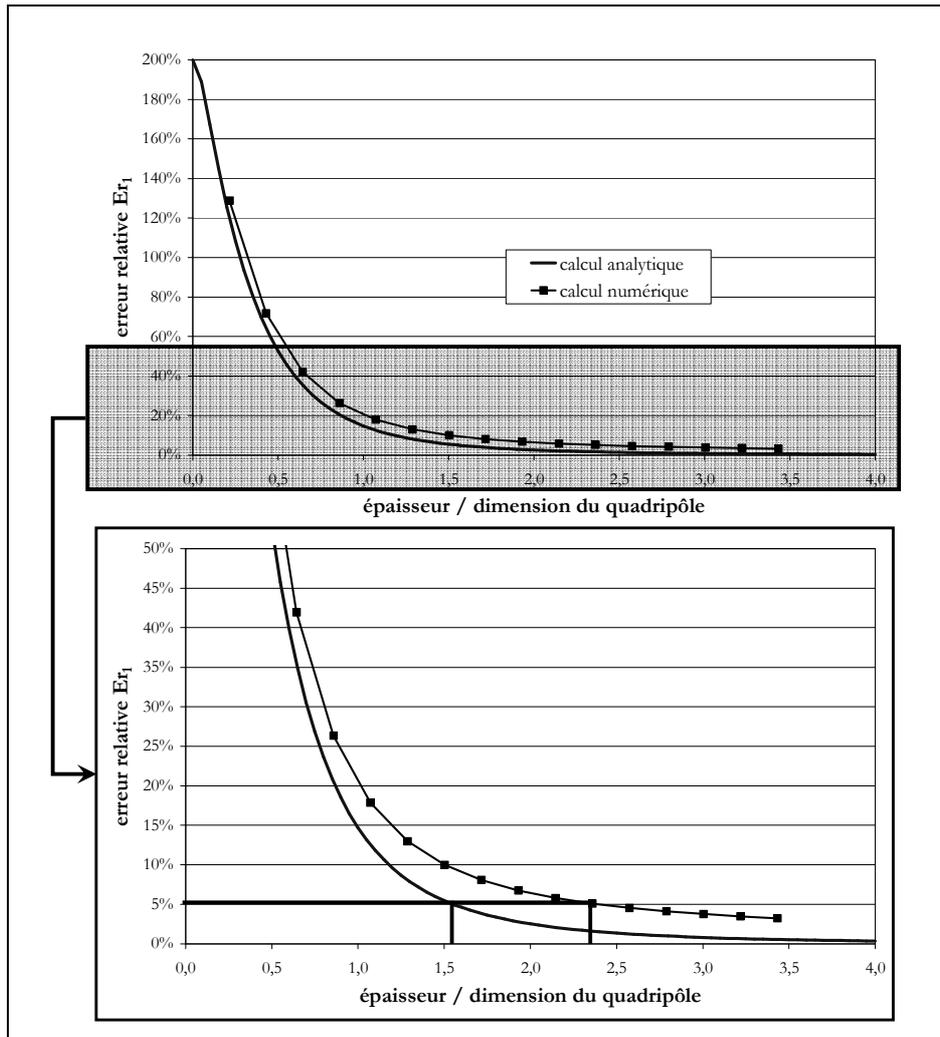


Figure 4. 15 Résultats de l'étude de l'influence de la profondeur du front de saturation (Er_1)

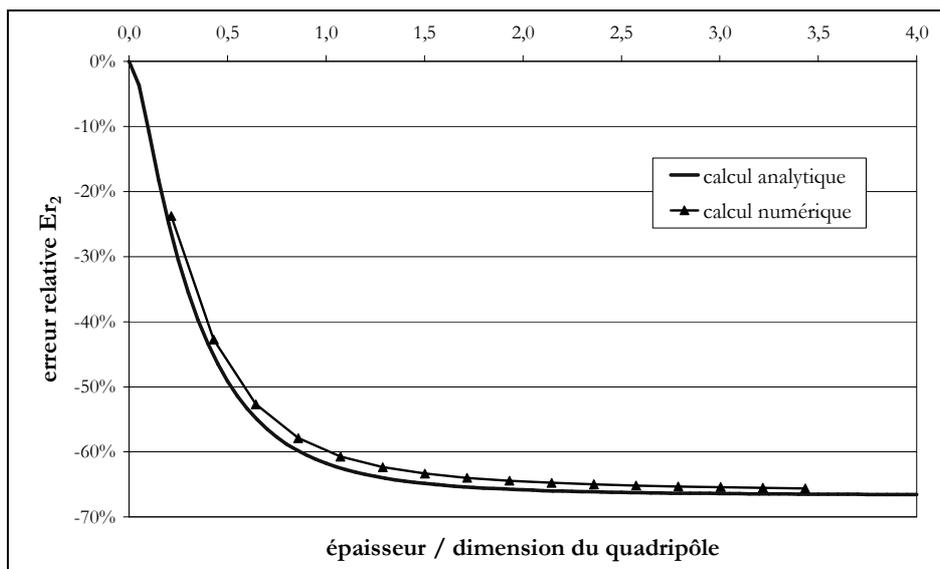


Figure 4. 16 Résultats de l'étude de l'influence de la profondeur du front de saturation (Er_2)

Lorsque l'épaisseur « z » tend vers 0, on a montré, analytiquement, que la résistivité apparente ρ_a tend vers ρ_2 . L'erreur relative Er_1 tend alors vers $\frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_1} = \frac{150 - 50}{50} = 2 = 200\%$.

L'erreur relative Er_2 tend alors vers $\frac{\rho_2 - \rho_2}{\rho_2} = 0\%$.

Lorsque l'épaisseur « z » tend vers $+\infty$, alors la résistivité apparente tend vers ρ_1 , c'est-à-dire que l'erreur relative Er_1 tend vers $\frac{\rho_1 - \rho_1}{\rho_1} = 0\%$, et l'erreur relative Er_2 tend alors vers

$$\frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_2} = \frac{50 - 150}{150} = -\frac{2}{3} = -66\%.$$

Les résultats obtenus dans le cadre de cette étude permettent de construire l'abaque suivant (Figure 4. 17) : à partir de la résistivité apparente mesurée (ρ_a) et en connaissant les valeurs des résistivités des deux couches (ρ_1 et ρ_2), il est possible de calculer l'erreur relative Er_1 et d'estimer la profondeur du front d'humidification « z ».

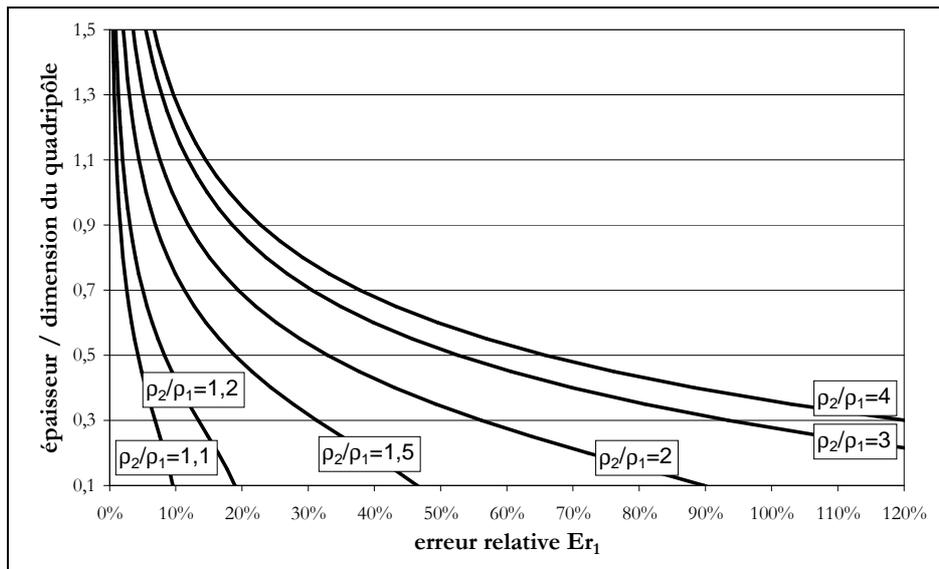


Figure 4. 17 Détermination de l'épaisseur du front humide

4.3.2. TEMPÉRATURE

4.3.2.1. EN ÉLECTRIQUE

L'influence de la température sur les propriétés électriques des matériaux est un phénomène largement démontré. La température ambiante a un effet significatif sur la résistivité électrique du béton, puisqu'elle conditionne les propriétés de la solution interstitielle contenue dans les pores (McNeill 1980). Avec l'augmentation de la température, la viscosité du fluide diminue et la mobilité des ions responsables de la conduction du courant électrique augmentent. Cela entraîne une diminution de la résistivité électrique.

Une relation générale entre la résistivité et la température est donnée par la loi de Rasch et Hinrichsen (1908) :

$$\rho_1 = \rho_2 \cdot e^{A \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right)}$$

- ρ_1 = résistivité électrique à la température T_1 (en $\Omega \cdot m$),
- ρ_2 = résistivité électrique à la température T_2 (en $\Omega \cdot m$),
- T_1, T_2 = températures (en K),
- A = constante dépendante du béton (en K).

Gowers *et al.* (1993) montrent que la valeur de la constante varie entre 2000 et 3000 K. McCarter *et al.* (1981) proposent une valeur moyenne proche de 2130 K. Le groupe de travail de la RILEM piloté par Polder (Polder *et al.* 2000) suggère d'utiliser cette relation pour la correction des effets de la température sur la mesure de résistivité électrique.

Spencer (1937) a construit une courbe de réduction de température qui permet de ramener la valeur de la résistivité électrique à la valeur à 21°C (70°F). Monfore (1968), puis Woelfl *et al.* (1980) ont ajouté des données à la courbe de Spencer (Figure 4. 18). Pour les ouvrages de génie civil, la température qui nous intéresse évolue de 0 à 30°C (32 à 86°F). De manière pratique, l'utilisation de la courbe de Spencer (1937) n'est pas suffisamment précise. De plus cette correction n'est pas facilement utilisable (Lataste 2002).

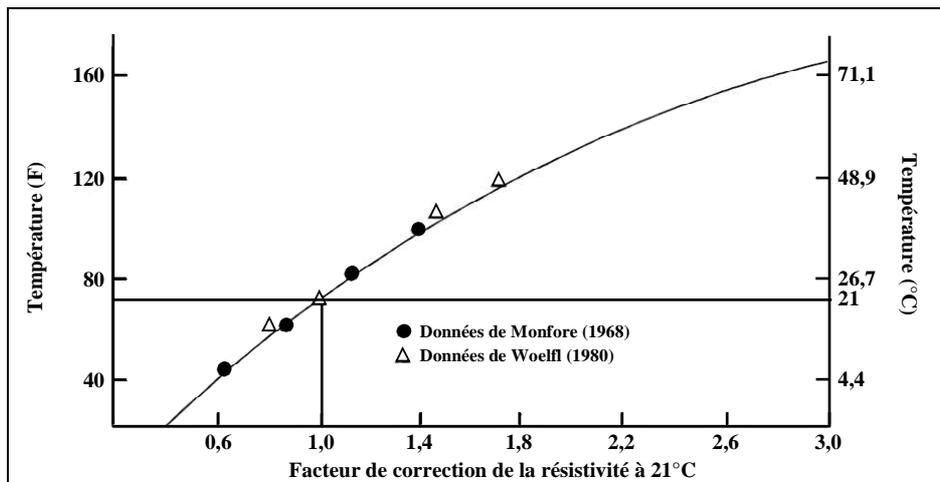


Figure 4. 18 Facteur de correction de la résistivité électrique à une température de 21°C (d'après Woelfl *et al.* 1980)

Hope *et al.* (1985) ont étudié l'effet de la température sur la résistivité électrique du béton pour plusieurs rapports E/C (Figure 4. 19). Les lignes sont quasiment parallèles quelle que soit la formulation. Ces données suivent la loi de Rasch et Hinrichsen (1908) pour une constante $A = 2889$ K.

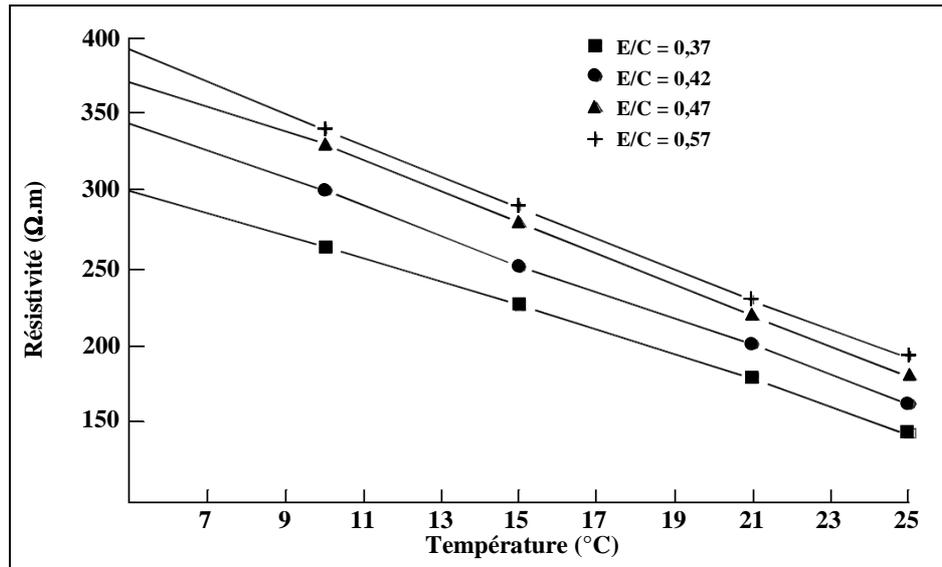


Figure 4.19 Effet de la température sur la résistivité électrique du béton pour plusieurs rapports E/C (d'après Hope *et al.* 1985)

En géologie, la prise en compte de l'effet de la température sur la résistivité des roches est effectuée en utilisant l'équation suivante :

$$\rho_{T_{mes}} = \frac{\rho_{T_{ref}}}{1 + \alpha(T_{mes} - T_{ref})}$$

- $\rho_{T_{mes}}$ = résistivité électrique à la température T_{mes} (en $\Omega.m$),
- $\rho_{T_{ref}}$ = résistivité électrique à la température T_{ref} (en $\Omega.m$),
- T_{mes} = température de mesure (en $^{\circ}C$),
- T_{ref} = température de référence (en $^{\circ}C$),
- α = coefficient de température du matériau (en $^{\circ}C^{-1}$).

Whittington *et al.* (1981) proposent un coefficient égal à $0,022^{\circ}C^{-1}$ pour les bétons. Cette valeur est proche de celle pour les électrolytes ($0,025^{\circ}C^{-1}$), étant donnée la nature de la conduction dans le béton.

La loi de Rasch et Hinrichson et l'équation utilisée en géologie ont été validées par des essais expérimentaux. Elles permettent de corriger l'effet de la température sur la résistivité de façon très comparable, même si la loi de Rasch et Hinrichson semble sensiblement meilleure que l'équation utilisée en géologie (Gowers *et al.* 1993). Néanmoins, la détermination des coefficients A et α est la condition nécessaire pour une bonne correction des effets thermiques.

L'effet de la température sur la mesure électrique est donc bien réel : en moyenne, pour une baisse de température du béton de $2^{\circ}C$, la résistivité augmente d'environ 5%. Polder *et al.* (2000) signalent qu'entre 0 et $40^{\circ}C$, une variation de $20^{\circ}C$ double la valeur de résistivité, soit une variation de 3 à 5% de la résistivité par degré de variation. Gowers *et al.* (1993) corrélient la résistivité à la température de l'air ambiant et proposent un gradient négatif moyen d'environ $-3.3 \Omega.m.^{\circ}C^{-1}$.

En pratique, Lataste (2002) a montré expérimentalement que si les variations de température sont inférieures à $3^{\circ}C$, ces effets peuvent être négligés. Dans le cas contraire, une

connaissance parfaite du coefficient A (loi de Rasch et Hinrichson) ou α (équation utilisée en géologie) est la condition indispensable pour une bonne correction des effets thermiques.

4.3.2.2. EN THERMIQUE

Pour les bétons courants, la conductivité thermique diminue de façon linéaire lorsque la température augmente. Kim *et al.* (2003) proposent une relation entre la conductivité thermique et la température (de 20 à 60°C) pour un béton dont le rapport E/C est de 0,4 :

$$k = 1,05 - 0,0025.T$$

k = conductivité thermique (en $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{C}^{-1}$),
 T = température (en °C).

L'EUROCODE 4 (2005) propose quant à lui une relation non linéaire entre la conductivité thermique et la température (de 20 à 1200°C) :

$$k = 2 - 0,2451 \cdot \frac{T}{100} + 0,0107 \cdot \left(\frac{T}{120} \right)^2$$

k = conductivité thermique (en $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{C}^{-1}$),
 T = température (en °C).

Les principaux paramètres de cette variation sont :

- le degré de saturation qui est le facteur principal : la conductivité thermique de l'air ($0,0034 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ à 20°C) est très inférieure à celle de l'eau ($0,515 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ à 20°C). Avec l'augmentation de température, la phase liquide s'évapore. Le volume d'eau est remplacé par un volume d'air ;
- le type de granulat : la diminution de la conductivité thermique en fonction de la température est assez marquée pour un béton contenant des granulats silico-calcaires, faible pour un béton de granulats calcaires et peu significative pour le béton « léger » (Collet 1977) ;
- l'état d'endommagement du béton : la conductivité thermique est plus faible pour un béton fissuré que pour un béton sain, du fait de la faible conductivité thermique de l'air présent dans les fissures.

Les variations de la chaleur spécifique avec la température, comparativement à la conductivité thermique, sont moins maîtrisées (Neville 2000). Néanmoins, la chaleur spécifique augmente avec la température entre 25 et 100°C (Vodak *et al.* 1997, Shin *et al.* 2002). L'EUROCODE 4 (2005) propose une évolution polynomiale du second degré en fonction de la température pour un béton sec :

$$c = 890 + 56,2 \cdot \frac{T}{100} - 3,4 \cdot \left(\frac{T}{100} \right)^2$$

c = chaleur spécifique (en $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{C}^{-1}$),
 T = température (en °C).

Selon Vodak *et al.* (1997), la diffusivité thermique décroît progressivement et de façon linéaire avec la température (Figure 4. 20).

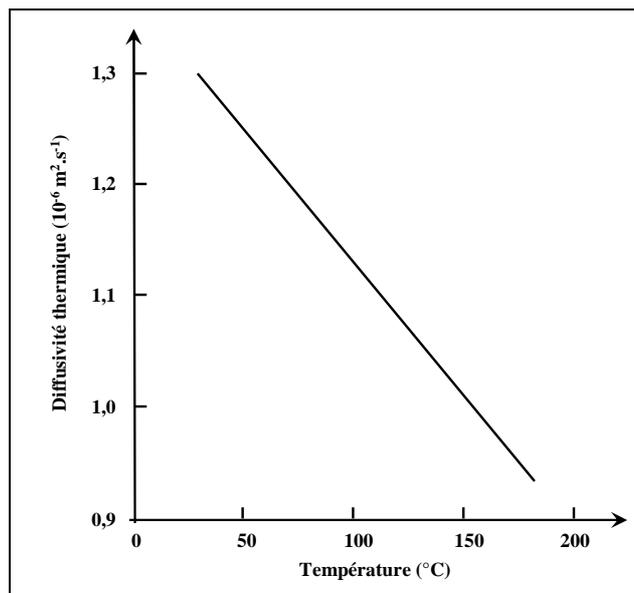


Figure 4. 20 Influence de la température sur la diffusivité thermique (d'après Vodak *et al.* 1997)

4.4 INFLUENCE DE LA STRUCTURE

Lors des nombreux essais sur site, on se rend bien compte que toutes les contraintes liées à la géométrie de l'ouvrage ne peuvent pas toujours être négligées : effet de bord (proximité des bords latéraux), effet de fond (épaisseur de dalle finie par rapport aux dimensions du dispositif de mesure), perturbation due à la présence d'armature dans le béton armé. Ces biais de mesures doivent être corrigés avant toute interprétation.

4.4.1. EFFET DE BORD SUR LA MESURE ÉLECTRIQUE

La proximité des bords est à l'origine de gradients de résistivité électrique apparente non représentatifs des propriétés réelles du matériau. Elle se traduit par une augmentation de la résistivité à proximité des bords. Cette perturbation diminue lorsque l'on s'en éloigne. Lataste *et al.* (2003^b) montrent que l'erreur relative devient inférieure à 10% dès que l'éloignement atteint 1,5 fois l'écartement des électrodes quelle que soit la configuration du dispositif quadripolaire carré (Figure 4. 21 et Figure 4. 22). Ces résultats (analytique, numérique, expérimental) confirment ceux obtenus par Millard *et al.* (1990) pour un dispositif quadripolaire de type Wenner.

Sur les Figure 4. 21 et Figure 4. 22, « d » désigne la distance du centre du dispositif au bord et « a » est la dimension du dispositif. L'erreur relative est définie par :

$$Er = (\rho_{a \text{ avec bord}} - \rho_{a \text{ sans bord}}) / \rho_{a \text{ sans bord}}$$

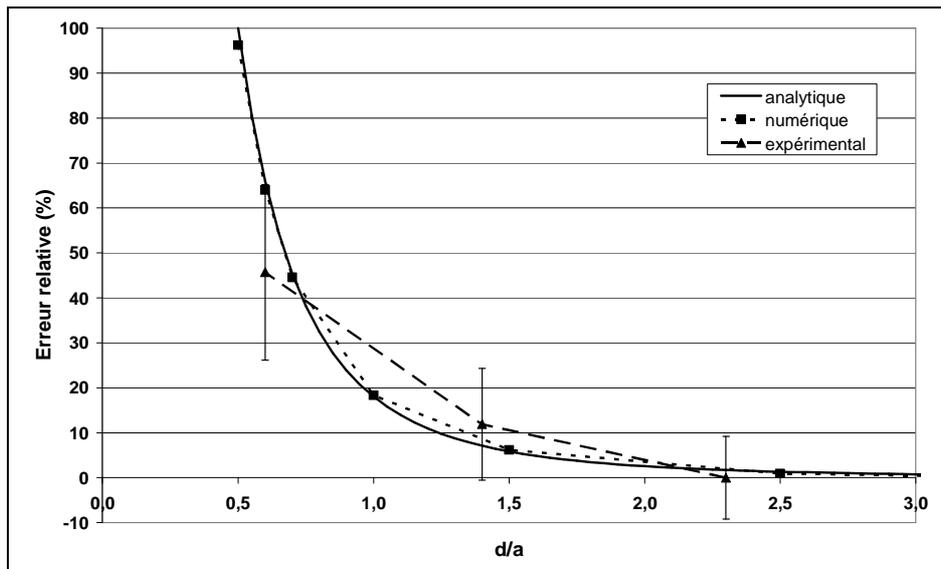


Figure 4. 21 Effets de bord sur la résistivité électrique dans le cas d'une injection du courant électrique parallèle au bord (d'après Lataste *et al.* 2003^b)

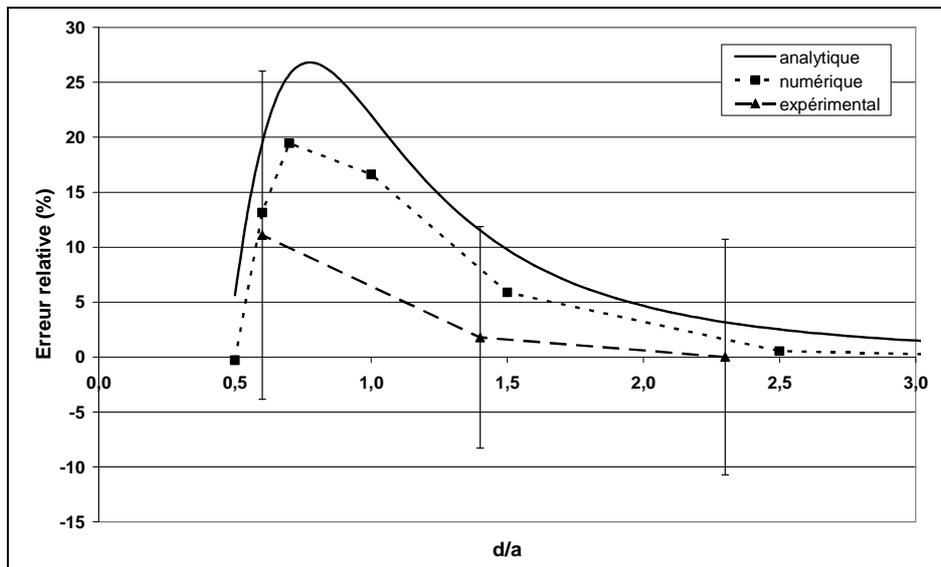


Figure 4. 22 Effets de bord sur la résistivité électrique dans le cas d'une injection du courant électrique perpendiculaire au bord (d'après Lataste *et al.* 2003^b)

4.4.2. EFFET DE FOND SUR LA MESURE ÉLECTRIQUE

Le travail réalisé ici vise à évaluer l'erreur relative de la résistivité électrique due à l'épaisseur finie de l'élément ausculté. La procédure d'étude est la même que pour celle menée sur l'influence de la présence d'une couche humide à la surface d'une dalle (voir paragraphe 4.3.1.3, page 84). Le milieu 2 qui est dans ce cas de l'air, a une résistivité très supérieure, pratiquement infinie, par rapport à celle du milieu 1, le béton. Le pouvoir réflecteur $R = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1}$, qui définit l'interface entre les deux milieux, est alors voisin de 1.

La proximité du fond de l'élément ausculté modifie la résistivité apparente. Elle se traduit par une augmentation de la résistivité. Cette hausse est d'autant plus importante que l'épaisseur est faible. Cet effet est notamment à prendre en compte lorsque cette épaisseur est variable.

a. Résultats

La Figure 4. 23 illustre l'erreur relative Er_1 due à la proximité du fond. On observe que cette erreur est toujours positive, c'est à dire que la présence du fond induit une augmentation de la résistivité apparente. Cette étude montre que lorsque le rapport z/a devient supérieur à 2,1 (analytiquement), alors il est possible de négliger l'influence de l'épaisseur de l'élément ausculté (l'erreur relative est alors inférieure à 5%).

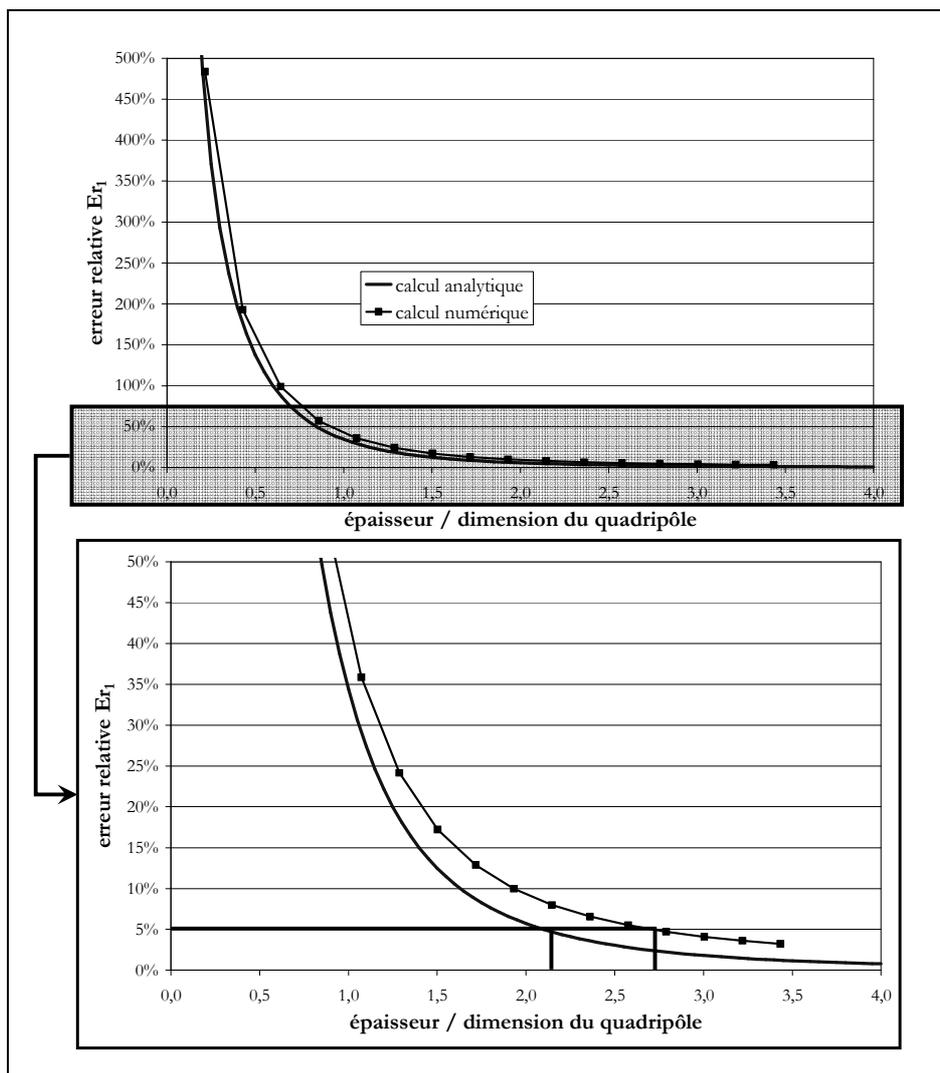


Figure 4. 23 Résultats de l'étude de l'influence de l'épaisseur de la dalle

Lorsque l'épaisseur de la dalle « z » tend vers 0, nous avons montré que la résistivité apparente tend vers ρ_2 . L'erreur relative Er_1 tend alors vers l'infini (dans la mesure où $\rho_2 \gg \rho_1$, alors R est voisin de 1). Les résultats analytiques et numériques tendent vers cette valeur.

De même, analytiquement, nous avons montré que lorsque l'épaisseur de la dalle « z » tend vers l'infini, la résistivité apparente tend vers la résistivité vraie du béton ρ_1 , c'est-à-dire que

l'erreur relative Er_1 tend vers $\frac{\rho_1 - \rho_1}{\rho_1} = 0\%$. Les résultats analytiques et numériques convergent vers cette valeur.

b. Facteurs de correction

A partir de ces résultats, les corrections sont effectuées sur la base des erreurs relatives calculées $Er_1 = \frac{\rho_a - \rho_1}{\rho_1}$ avec ρ_a la résistivité apparente mesurée (en $\Omega.m$) et ρ_1 la résistivité apparente de référence (en $\Omega.m$). La valeur corrigée est obtenue par $\rho_{corr} = \frac{\rho_{ames}}{1 + Er_1}$, avec ρ_{corr} la résistivité apparente corrigée (en $\Omega.m$), ρ_{ames} la résistivité apparente mesurée (en $\Omega.m$), et Er_1 l'erreur relative. Le facteur de correction est alors le rapport $\frac{1}{1 + Er_1}$ (Figure 4. 24).

Lorsque l'épaisseur de la dalle « z » tend vers zéro, nous avons montré que le taux de perturbation Tx_i tend vers l'infini. Dans ce cas, le facteur de correction tend également vers zéro. Lors du calcul analytique, nous n'avons utilisé seulement que les vingt cinq premiers termes de la suite. Pour que le résultat converge vers zéro, des termes supplémentaires de la suite doivent être pris en compte. Néanmoins, pour une valeur de « z/a » supérieure à 0,1, le résultat obtenu est entièrement satisfaisant.

Pratiquement, les éléments que nous avons auscultés ont une épaisseur au moins supérieure à l'écartement des électrodes « a », c'est-à-dire un rapport « z/a » supérieur à 1.

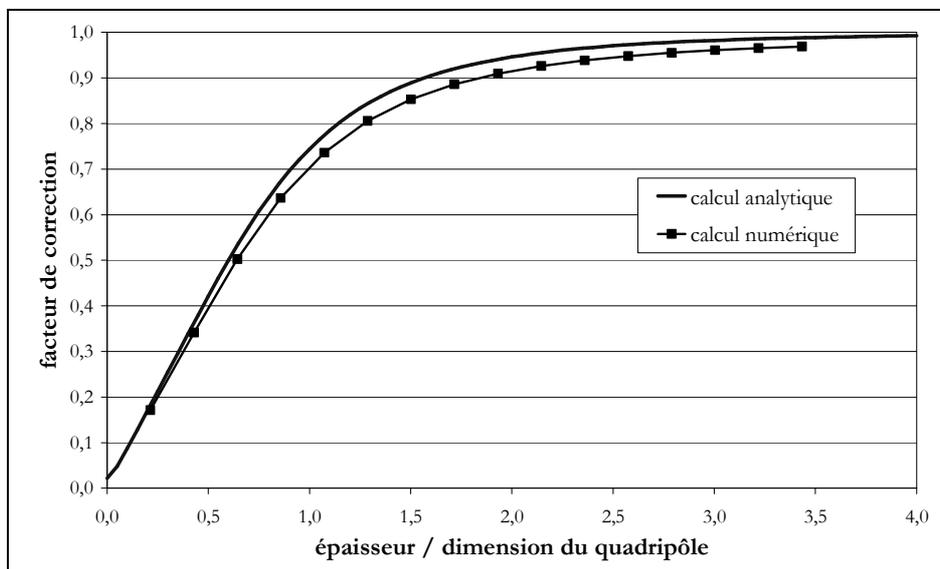


Figure 4. 24 Facteur de correction de l'effet de fond

c. Conclusion

Il est important de remarquer que les résultats de cette étude sont totalement indépendants de la valeur de résistivité électrique de la couche de béton ρ_1 . Ces résultats sont donc exploitables dans n'importe quel cas de figure.

4.4.3. EFFET DES ARMATURES SUR LA MESURE ÉLECTRIQUE

La présence des armatures perturbe la mesure de résistivité électrique lors de l'auscultation de l'état du béton d'enrobage. L'orientation des barres par rapport au sens d'injection du courant (Polder 2000), la densité de ferrailage (Millard 1991, Lataste 2002) ou encore l'épaisseur d'enrobage (Millard *et al.* 1990, Lataste 2002) et dans une moindre mesure, le diamètre des aciers (Millard *et al.* 1990), sont autant de paramètres qui perturbent la conduction du courant électrique dans le béton armé.

L'acier des armatures a une très faible résistivité électrique ($10^{-8} \Omega.m$) (Missenard 1965) par rapport aux gammes de résistivité du béton, de 10 à 10 000 $\Omega.m$ (Neville 2000). Il en résulte une baisse de la résistivité apparente. L'effet des armatures sur la mesure de résistivité électrique est connu et différentes tentatives de correction, à la fois expérimentale et numérique ont été tentées (Lataste 2002, El Hassan 2004). D'après Van Nostrand *et al.* (1996), une approche analytique n'est pas envisageable : le problème d'un tube infini, représentant l'armature, n'est pas soluble. A l'heure actuelle, pour les cas où l'effet des armatures n'est pas négligeable, des travaux sont encore nécessaires avant de pouvoir corriger de façon certaine les perturbations engendrées.

La détection des armatures (localisation et diamètre) avant toute tentative d'auscultation électrique est aujourd'hui possible en utilisant des techniques électromagnétiques telles que le profomètre (Proceq 2002) ou le radar (Derobert *et al.* 2001). Cette recommandation permet ensuite de bien positionner le dispositif de mesure afin de minimiser l'effet des armatures.

4.5 INFLUENCE DES ALTÉRATIONS DU BÉTON

4.5.1. GÉNÉRALITÉS

Même s'il est souvent considéré à juste titre comme un matériau durable, le béton subit de nombreuses agressions physiques (gel-dégel, érosion...), physico-chimiques (retrait...) et chimiques (réaction alcalis-granulats, carbonatation, action des chlorures...). L'intensité de ces attaques est principalement liée à la capacité de pénétration d'agents agressifs extérieurs (eau, chlorures, sels, gaz...) dans son réseau poreux. Les qualités du matériau s'altèrent lorsque ces agents réagissent avec les hydrates du ciment en formant des composés expansifs ou solubles (Calgaro *et al.* 1999).

La durabilité du béton peut être définie comme étant la résistance de la structure vis-à-vis des facteurs de détérioration, qui peuvent être externes ou internes (Bapat 2001). En d'autres termes, c'est la capacité de la structure à assurer des performances satisfaisantes sous certaines conditions et pendant le laps de temps pour lequel elle a été conçue.

La détérioration de la structure est souvent associée à un changement de volume du béton. Les principales causes de dégradation sont l'expansion due à la corrosion des armatures, la réaction alcalis-granulats, l'effet du gel-dégel... Les conséquences du gonflement de la structure sont alors la fissuration (ou délamination) du béton d'enrobage.

Le Tableau 4. 12 présente de manière synthétique les résultats d'enquêtes menées à l'échelle européenne dans le cadre du projet REHABCON (dédié aux techniques de réhabilitation du

béton dégradé) auprès d'administrations ou de gestionnaires d'ouvrages en béton (ponts et bâtiments).

Tableau 4. 12 Sources des dégradations du béton (d'après REHABCON 2001)

Source de dégradation	Ouvrages affectés (%)
Corrosion	47
Mécanique	18
Fondations	12
Matériaux	5
Alcali-réaction	5
Attaque chimique	4
Conception	4
Gel	2
Lixiviation	2
Érosion	1

4.5.2. LA CARBONATATION

4.5.2.1. DÉFINITION

La carbonatation est un phénomène inéluctable de vieillissement naturel du béton. Il s'agit d'un phénomène essentiellement de surface.

La carbonatation correspond à une transformation progressive de la portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) en calcite (CaCO_3) au contact du dioxyde de carbone (CO_2) contenu dans l'air et en présence d'humidité. La pénétration du CO_2 est d'autant plus rapide que le béton est poreux et que les pores ne sont pas totalement obturés. La dissolution de la portlandite réduit alors la porosité du béton, ce qui ne constitue pas un endommagement.

Cette transformation s'accompagne d'une diminution du pH (le pH d'un béton carbonaté est d'environ 9) : le béton sain, qui a un pH supérieur à 11, constitue un milieu protecteur pour les armatures en acier (Figure 4. 25). Lorsque le front de carbonatation parvient au voisinage des armatures, la carbonatation supprime toute réserve d'alcalinité au niveau des aciers, qui amorcent leur processus de corrosion. Cette dépassivation est d'autant plus rapide que des ions agressifs comme les chlorures sont présents en quantité importante (Tuutti 1982).

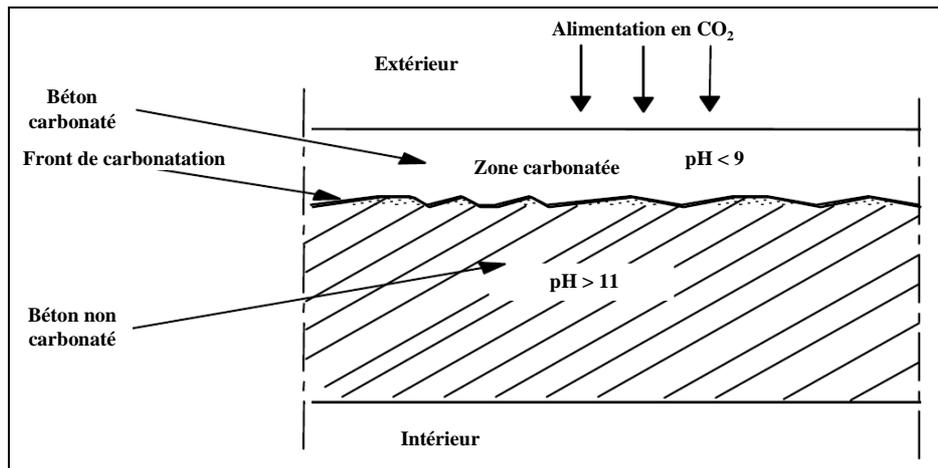


Figure 4. 25 Principe de la carbonatation

L'épaisseur de la couche carbonatée évolue selon une loi en racine carrée du temps :

$$e_c = a.\sqrt{t}$$

- e_c = épaisseur carbonatée (en mm),
 a = coefficient de carbonatation (en $\text{mm.j}^{-1/2}$),
 t = temps (en j).

La profondeur de pénétration de la carbonatation est de l'ordre de 2 mm au bout d'un an, 8 mm au bout de 10 ans et 20 à 25 mm au bout de 50 ans (Calgaro *et al.* 1999). Toutefois, dans les ouvrages réels, les résultats des mesures de cette profondeur sont très dispersés.

L'estimation de la profondeur de carbonatation est donc un paramètre important intervenant dans la durabilité des ouvrages en béton.

Aujourd'hui, la mesure de l'épaisseur de la couche carbonatée des bétons est généralement réalisée sur des échantillons au moyen d'un indicateur coloré, la phénolphthaléine alcoolique en général, sensible aux variations de pH annonçant le début de la carbonatation (Rafai *et al.* 2002). Cette mesure nécessite un prélèvement destructif de matériau sur l'ouvrage.

4.5.2.2. LA CARBONATATION ET LA MESURE ÉLECTRIQUE

La dissolution de la portlandite entraîne une augmentation de la porosité, suivie d'une précipitation de calcite qui elle provoque une diminution de la porosité. Cela est d'abord observable dans les pores de plus grand diamètre, c'est-à-dire dans ceux qui supportent l'essentiel de la conduction électrolytique. De plus, elle s'accompagne d'une diminution de l'humidité du béton, ce qui accentue l'augmentation de résistivité apparente (Raharinaivo 2001). La mesure de résistivité électrique peut être utilisée pour classer différents ouvrages (RGC&U 2005).

Selon Claisse *et al.* (1999), la perméabilité du béton au cours de la carbonatation évolue dans le même sens que sa résistivité électrique. De plus, la création et l'évolution de la couche carbonatée en surface induit des problèmes d'interprétation de la mesure électrique : les résultats peuvent indiquer un béton compact donc a priori sain. Enfin, la résistance de contact en surface trop élevée rend le couplage de la mesure électrique plus difficile à assurer. Weydert *et al.* (1999) proposent une humidification de plusieurs heures. On comprend alors la difficulté à réaliser des mesures électriques sur ce type de béton.

Millard *et al.* (1992) ont étudié les effets d'une couche résistante en surface du béton sur la mesure de résistivité apparente, pour un dispositif de configuration Wenner. Avec cette géométrie, l'épaisseur carbonatée n'a que peu d'effet sur la résistivité apparente du matériau, tant que celle-ci reste faible par rapport à l'écartement entre électrodes. Elle commence à être détectée pour des épaisseurs équivalentes à l'écartement entre électrodes, ici 5 cm. Une telle profondeur représente déjà une épaisseur de carbonatation très importante qui peut déjà avoir initié la corrosion des armatures. Lataste (2002) a étudié l'effet d'une couche carbonatée sur la mesure de résistivité apparente au droit d'une armature avec un dispositif quadripolaire carré. Avec cette géométrie, la résistivité apparente augmente avec l'épaisseur carbonatée quel que soit le sens d'injection à partir d'une profondeur carbonatée de l'ordre de 2 mm. Il ajoute que les écarts-types des mesures de résistivité, traduisant le bruit de mesure, augmentent avec l'épaisseur de béton carbonaté.

4.5.2.3. MODÉLISATION DE L'EFFET D'UNE COUCHE CARBONATÉE SUR LES MESURES DE RÉSISTIVITÉ ÉLECTRIQUE

Le travail réalisé ici vise à évaluer le taux de perturbation de la résistivité électrique dû à la présence d'une couche carbonatée résistante en surface. La procédure d'étude est la même que pour celle menée sur l'influence de la présence d'une couche humide à la surface d'une dalle (voir paragraphe 4.3.1.3, page 84). Le milieu 1 a une résistivité de 1 800 Ω .m (valeur mesurée expérimentalement sur un béton carbonaté) et le milieu 2 une résistivité de 150 Ω .m. Ces valeurs sont issues d'une campagne de mesure réalisée par Lataste (2002).

La présence d'une couche carbonatée en surface modifie la résistivité apparente. Elle se traduit par une augmentation de la résistivité. Cette hausse est d'autant plus importante que l'épaisseur de cette couche est grande.

Cette étude a pour but de :

- corriger la valeur de résistivité apparente mesurée : la présence d'une couche carbonatée est un biais de mesure. Or connaissant l'épaisseur de la couche carbonatée sur un prélèvement par carottage, il est alors possible de corriger la valeur de résistivité apparente mesurée de façon à s'affranchir de cet effet ;
- estimer l'épaisseur de béton carbonaté : il est possible de mesurer la résistivité électrique du béton ρ_2 dans une zone saine ainsi que la résistivité du béton totalement carbonatée ρ_1 (par prélèvement d'une carotte). La résistivité apparente mesurée expérimentalement ρ_a dépend alors de la profondeur du front de carbonatation. Ainsi, il est possible de qualifier les variations relatives de l'épaisseur carbonatée à partir des mesures de résistivité réalisées en surface.

a. Résultats

La Figure 4. 26 illustre l'erreur relative Er_1 engendrée par la présence d'une couche carbonatée en surface.

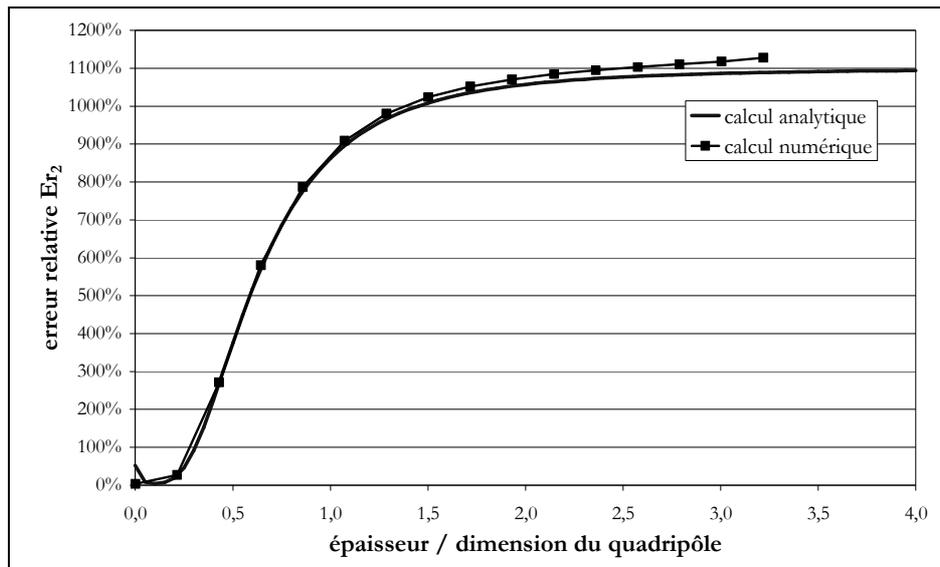


Figure 4. 26 Résultats de l'étude de l'influence de l'épaisseur d'une couche carbonatée

Lorsque l'épaisseur de la couche carbonatée « z » tend vers zéro, nous avons montré analytiquement que la résistivité apparente tend vers ρ_2 . L'erreur relative Er_2 tend alors vers $\frac{\rho_2 - \rho_2}{\rho_2} = 0\%$. Les modèles analytique et numérique convergent vers cette valeur.

Lorsque l'épaisseur de la couche carbonatée « z » tend vers $+\infty$, alors la résistivité apparente tend vers ρ_1 , c'est-à-dire que l'erreur relative Er_2 tend vers $\frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_2} = \frac{1800 - 150}{150} = 11 = 1100\%$. Les modèles analytique et numérique convergent vers cette valeur.

Comme pour les études précédentes, lors du calcul analytique, nous n'avons utilisé seulement que les vingt cinq premiers termes de la suite. Pour que le résultat converge effectivement vers zéro, des termes supplémentaires de la suite doivent être pris en compte.

De plus, nous avons ici un pouvoir réflecteur $R = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} = \frac{150 - 1800}{150 + 1800} < 1$. Selon que la puissance de ce terme soit paire ou impaire, lorsque l'épaisseur de la couche carbonatée tend vers zéro, l'erreur relative Er_2 converge en oscillant autour de la valeur nulle. Cela explique l'imprécision des résultats entre $z/a = 0$ et $z/a = 0,3$.

b. Facteur de correction

A partir de ces résultats, les corrections sont effectuées sur la base des erreurs relatives calculées $Er_2 = \frac{\rho_a - \rho_2}{\rho_2}$ avec ρ_a la résistivité apparente mesurée (en $\Omega.m$) et ρ_2 la résistivité apparente de référence (en $\Omega.m$). La valeur corrigée est obtenue par $\rho_{corr} = \frac{\rho_{ames}}{1 + Er_2}$, avec ρ_{corr} la résistivité apparente corrigée (en $\Omega.m$), ρ_{ames} la résistivité apparente mesurée (en $\Omega.m$), et Er_2 l'erreur relative. Le facteur de correction est alors le rapport $\frac{1}{1 + Er_2}$ (Figure 4. 27).

Lorsque l'épaisseur de la couche carbonatée « z » tend vers zéro, nous avons montré que l'erreur relative Er_2 tend vers zéro. Dans ce cas, le facteur de correction tend également vers l'unité. Comme pour les études précédentes, lors du calcul analytique, nous n'avons utilisé seulement que les vingt cinq premiers termes de la suite. Pour que le résultat converge vers 1, des termes supplémentaires de la suite doivent être pris en compte. Néanmoins, pour une valeur de « z/a » supérieure à 0,1, le résultat obtenu est entièrement satisfaisant.

Pratiquement, les éléments que nous avons auscultés ont une épaisseur au moins supérieure à l'écartement des électrodes « a », c'est-à-dire un rapport « z/a » supérieur à 1.

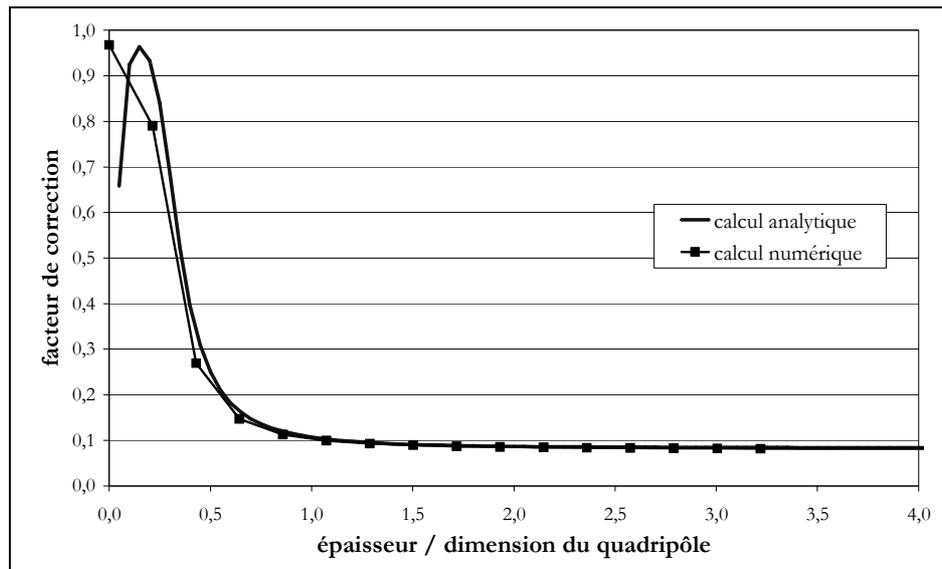


Figure 4. 27 Facteur de correction de l'effet d'une couche carbonatée pour $\rho_2 / \rho_1 = 1/12$

4.5.3. LA RÉACTION ALCALIS-GRANULATS

L'étude de l'endommagement créé par la réaction alcalis-granulat fera l'objet d'un chapitre particulier (voir Chapitre 7).

4.5.4. LA FISSURATION ET LA DÉLAMINATION

La fissuration ou la délamination sont des conséquences communes à plusieurs pathologies : la réaction alcalis-granulats, la corrosion des barres d'armatures... Elles seront abordées dans un chapitre spécifique (voir Chapitre 8).

4.6 SYNTHÈSE

Avant l'étude de certaines altérations des ouvrages, la maîtrise de la mesure de la résistivité électrique et par thermographie infrarouge est nécessaire afin de s'assurer de la signification et de la pertinence des valeurs mesurées sur site.

Les propriétés électriques et thermiques des bétons dépendent fortement de la porosité de la matrice et des fluides qu'elle contient. La composition du béton, la nature de ses constituants, ou son âge sont autant de paramètres qui vont contribuer à définir la microstructure du matériau et donc sa porosité (volume et caractéristiques). Les fluides, de par leur volume, nature et concentration sont des vecteurs variables de la circulation électrique et thermique dans le réseau poreux.

Le Tableau 4. 13 est une synthèse des **différents facteurs propres au béton** qui influencent ses **propriétés électriques** (résistivité ρ) et **thermiques** (conductivité k). Dans ce tableau, les lettres « S » et « I » indiquent respectivement la sensibilité ou non du paramètre ρ ou k au facteur considéré. Les signes « - » et « + » traduisent respectivement une évolution en sens inverse ou dans le même sens du paramètre ρ ou k et du facteur considéré : par exemple, l'augmentation du dosage en ciment diminue la résistivité électrique et augmente la conductivité thermique du béton.

Tableau 4. 13 Influence des facteurs intrinsèques au béton sur la résistivité électrique et sur la conductivité thermique

	ρ ($\Omega.m$)	k ($W.m^{-1}.K^{-1}$)
Ciment		
▪ nature	S	S
▪ dosage	-	+
Granulat		
▪ nature	S	S
▪ quantité	+, variabilité \uparrow	+
▪ répartition (taille)	variabilité \uparrow	-
Rapport E/C	-	-
Porosité	-	-
Chlorures	-	I
Cendres volantes	+	-
Fumée de silice	+	-
Fibres (nature)	-	I
Humidité de surface	-, dérive	-
Température	-	-

En ce qui concerne la mesure de résistivité, un nouveau facteur de biais, lié à des paramètres structuraux, peut être pris en compte : l'**effet de l'épaisseur** de l'élément ausculté. Comme pour l'effet de bords, celui-ci peut être corrigé de façon analytique. L'effet de la présence d'armature reste quant à lui toujours présent mais peut être minimisé au moment de l'auscultation par un choix judicieux de la position des points de mesure. Cet effet ne pouvant être corrigé analytiquement, seule une étude numérique permettra la construction d'abaques afin de résoudre ce problème.

L'étude menée sur la contamination du béton par des **ions chlorures** révèle l'importance du bon conditionnement des corps d'épreuve fabriqués en laboratoire afin de pouvoir exploiter les résultats de façon sereine. En effet nous avons montré que les mesures réalisées sur des

éléments de laboratoire à teneur en chlorures différentes ne permettent pas de les classer correctement vis-à-vis de ce paramètre. Toutes les précautions ayant été prises lors des différentes séances de mesures et lors du traitement des résultats, l'hypothèse retenue quant à cette difficulté de distinction provient d'un mauvais conditionnement des éprouvettes au cours de leur vieillissement, et vraisemblablement au lessivage.

L'étude de l'ajout de fumée de silice lors de la fabrication d'éléments en béton afin de réduire la porosité du matériau confirme les résultats déjà obtenus en ce qui concerne la mesure de résistivité électrique : la présence de **fumée de silice augmente considérablement la résistivité**, dans notre cas d'un facteur 10 par rapport à un béton sans fumée de silice (même si les bétons sont difficilement comparables). Les mesures par thermographie infrarouge passive montrent que la présence de **fumée de silice** augmente l'inertie thermique du béton. Ces résultats confirment ceux trouvés dans la littérature.

La présence de fibres métalliques perturbe de façon importante la conduction électrique dans le béton. En effet la **résistivité diminue fortement en présence de fibres métalliques** : d'un facteur 10 par rapport à un béton avec des fibres synthétiques. Quant à l'**anisotropie électrique, elle dépasse le seuil de $\pm 0,3$** (seuil théorique de variation significative d'une particularité) en présence de ce type de fibres. L'utilisation de deux sens d'injection du courant électrique est parfaitement justifiée dans ce cas. Les **fibres ne modifient pas le comportement thermique** du béton.

Les résultats des mesures de résistivité électrique ont permis de dégager trois **indicateurs** : la valeur moyenne de la résistivité, le coefficient de variation de la résistivité et le logarithme décimal de l'anisotropie électrique.

CHAPITRE 5 : LE COUPLAGE DE MÉTHODES D'END

Actuellement, il n'existe pas une méthode unique d'END qui puisse répondre à toutes les questions posées par un gestionnaire d'ouvrage sur l'état d'une structure en béton. En se concentrant sur l'étude de telle ou telle pathologie, on constate la plupart du temps que ces méthodes ne répondent que de manière partielle au problème posé. On peut alors être amené à employer une autre technique pour compléter la réponse et ainsi préciser le diagnostic. La démarche la plus logique consiste à trouver un compromis entre le niveau d'exigence demandé par le maître d'œuvre et le coût acceptable pour l'application (Aubagnac *et al.* 2002).

Le recours au couplage de plusieurs techniques non destructives est séduisant si l'on souhaite mieux caractériser l'état d'endommagement du béton. Depuis quelques années, de nombreux projets de recherche dans ce domaine voient le jour, parmi lesquels :

- projet européen ONSITEFORMASONRY « On-Site investigation techniques for the structural evaluation of historic masonry buildings » (1998-2002) sur les techniques d'investigation sur site pour l'évaluation de la structure des monuments historiques en maçonnerie, fondé par la Commission Européenne (Maierhofer *et al.* 2003) ;
- RILEM Technical Committee « 189-NEC - Non-destructive Evaluation of the Covercrete » (2000-2005), sur l'END du béton d'enrobage ;
- groupe de travail (2000-2005) sur la méthodologie d'END de l'état d'altération des ouvrages en béton armé, soutenu par l'AFGC et la COFREND (Breysse *et al.* 2005) ;
- projet de recherche (2001-2004) sur la pathologie du béton de peau par méthodes non destructives, soutenu par RGC&U, le Ministère de la Recherche et le Ministère de l'Équipement en France (Arliguie 2005) ;
- Chaire de recherche sur l'auscultation des structures en béton (2001-2006), soutenu financièrement par le Conseil de Recherche en Sciences Naturelles et en Génie du Canada et une douzaine de partenaires industriels (Chaire 2003) ;
- RILEM Technical Committee « INR207 - Interpretation of NDT Results and assessment of RC structures » (2004-2009), sur l'interprétation des résultats d'essais non destructifs et évaluation des ouvrages en béton armé ;
- RILEM Technical Committee « ACD - Acoustic Emission and Related NDE Techniques for Crack Detection and Damage Evaluation in Concrete » (2004-2009)

sur l'émission acoustique et techniques d'END associées pour la détection de la fissuration et pour l'évaluation de l'endommagement du béton ;

- projet européen MEDACHS (2005-2008) sur l' « Endommagement des ouvrages historiques ou de transport de la côte atlantique dû à l'environnement marin : méthode de diagnostic et de réparation, maintenance » (Yotte *et al.* 2005) ;
- projet de recherche (2006-2009) SENSO « Stratégie d'Evaluation Non destructive pour la Surveillance des Ouvrages en béton », soutenu par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR).

Un état de l'art récent (Breysse *et al.* 2005) a permis, entre autre, de mettre en lumière les couplages possibles entre les différentes techniques d'END, couplages déjà mis en œuvre ou à envisager. A la lumière des tableaux synthétiques définissant le degré de sensibilité de certaines techniques à différents paramètres étudiés, il s'agit de définir une démarche d'analyse stratégique en terme d'utilisation de plusieurs méthodes associées à la caractérisation des ouvrages en béton.

Dans notre cas, nous nous intéresserons à préciser la complémentarité entre la méthode de résistivité électrique et la thermographie infrarouge passive.

5.1 UTILISATION DE PLUSIEURS MÉTHODES D'END

De nombreux articles font référence à l'utilisation de plusieurs méthodes d'END pour la caractérisation d'un site en géophysique (Gourry *et al.* 1995, Gautman *et al.* 2000...), détecter ou caractériser des anomalies dans le béton (Weill *et al.* 1998, Abraham *et al.* 2003, Uomoto 2003, Antczak *et al.* 2004, Meola *et al.* 2005...) ou tout simplement tester la complémentarité des méthodes (Dérobert *et al.* 2002, Rhazi *et al.* 2003...). Très souvent, les résultats issus des différentes méthodes sont juxtaposés les uns à côté des autres.

Détaillons quelques exemples de cette liste :

- Weill *et al.* (1998) utilisent successivement la méthode par thermographie infrarouge passive et la technique impact-écho pour l'auscultation d'un dôme en béton armé d'environ 33 000 m², à Seattle (USA). Les défauts recherchés sont a priori des délaminations. La première méthode permet de repérer rapidement des défauts thermiques. La deuxième méthode permet de confirmer les résultats obtenus par thermographie infrarouge. On comprend ici la complémentarité des méthodes en terme de stratégie d'auscultation (gain de temps et donc de coût), ou en terme d'informations recueillies ;
- Dérobert *et al.* (2002) ont utilisé quatre méthodes d'END sur une poutre du Pont Neuf de Foix sur l'Ariège avant destruction (en décembre 2000) et autopsie : Ferroskan[®] (méthode électromagnétique basse fréquence), radar (méthode électromagnétique haute fréquence centrée sur 1,5 GHz), gammagraphie (méthode radiographique) et impact-écho. A l'issue de ces campagnes de mesures non destructives, il a été possible de localiser les câbles de précontrainte et les armatures passives (Ferroskan[®] et radar selon la profondeur), d'apprécier la qualité de l'injection et des câbles (par radar et gammagraphie) ainsi que d'évaluer la qualité du

béton. Les résultats finaux montrent tout l'intérêt que peut avoir le couplage de plusieurs méthodes d'END pour lever certaines ambiguïtés, localiser des zones douteuses à partir de mesures à grand rendement ou répondre complètement à un problème en utilisant des méthodes complémentaires. Cette auscultation a permis de mettre en évidence les avantages et les limites de chaque méthode vis-à-vis des objectifs demandés ;

- A la suite de l'incendie survenu dans le tunnel du Mont-Blanc en mars 1999, des travaux d'auscultation ont été menés par Abraham *et al.* 2003. Dommageables pour l'ouvrage, les carottes prélevées ponctuellement dans le tunnel ont permis de mettre en évidence un endommagement du béton décroissant au fur et à mesure que l'on s'éloigne du foyer de l'incendie. Un programme d'auscultation des murs en béton par méthodes non destructives a été mis en place : utilisation du radar (avec des antennes de fréquence centrale 900 MHz et 1,5 GHz) et d'une méthode sismique (réfraction). Sur les cartographies radar, plusieurs couches peuvent être identifiées avec des propriétés électromagnétiques différentes. Après calibration, cette méthode a également permis d'estimer la profondeur de chacune des couches. La sismique réfraction confirme et caractérise l'existence et la profondeur de plusieurs couches de propriétés mécaniques différentes. Dans ce cas, les deux méthodes donnent des informations différentes (profondeurs, propriétés mécaniques...). Complémentaires, elles facilitent et consolident l'interprétation des résultats afin d'adapter au mieux les réparations ;
- Gros *et al.* (1999) utilisent la fusion de données basée sur la compilation de plusieurs sources d'information afin de faciliter l'interprétation des signaux enregistrés par différentes méthodes. Le but est de mieux détecter et caractériser les éventuels défauts présents dans une plaque de carbone en fibres composites. Les deux méthodes utilisées sont le courant de Foucault et la thermographie infrarouge active. Chaque méthode permet d'obtenir une image discrétisée en pixels. La fusion de données (somme des amplitudes des deux signaux, moyenne arithmétique, moyenne pondérée, algorithme statistique...) est alors opérée sur chaque pixel. Selon l'algorithme de fusion choisi, le résultat est très différent : dans le meilleur des cas, l'image fusionnée présente un gain d'information, alors qu'à l'inverse, de l'information est perdue (Figure 5. 1). Cette démarche reste actuellement encore en développement mais semble être un exemple de méthodologie permettant un réel couplage des informations issues de différentes méthodes.

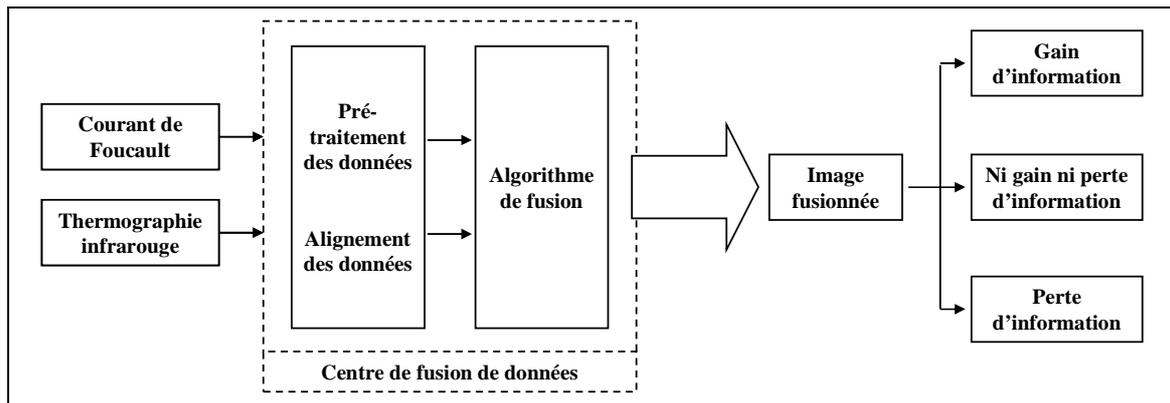


Figure 5.1 Schéma de l'architecture du système de fusion de données et des sorties possibles (d'après Gros *et al.* 1999)

5.2 LE COUPLAGE

5.2.1. DÉFINITION

Le couplage est l'utilisation successive ou simultanée de deux ou plusieurs méthodes d'END. L'information fournie par le couplage doit alors être plus riche que la simple somme des informations fournies par chaque méthode.

5.2.2. OBJECTIFS

Les principaux objectifs visés lors de l'utilisation de méthodes d'END peuvent être hiérarchisés de la manière suivante, dans le cas de l'auscultation d'ouvrage in situ (Breyse *et al.* 2005) :

- **détecter** : le but premier de l'utilisation de ces méthodes est de réussir à détecter des variations spatiales de propriétés d'un matériau ou d'un éventuel endommagement ou à détecter un défaut mécanique. Cela peut alors se faire à une échelle locale, à l'échelle de l'ouvrage entier, voire entre plusieurs ouvrages ;
- **quantifier de façon relative** : la détection d'un paramètre ou d'une propriété étant réalisée, il s'agit alors d'être capable d'établir un classement des différentes valeurs prises par le paramètre, à l'échelle de l'ouvrage (on parlera alors de zonage) ou entre différents ouvrages (on parlera de classement) ;
- **quantifier de manière absolue** : le but ultime de l'utilisation de ces méthodes est de quantifier de façon absolue les propriétés, de façon à permettre la comparaison des résultats à des valeurs de référence ou l'utilisation dans des modèles d'inversion et de re-calcul. Cela nécessite donc un travail de calibration des méthodes sur des éprouvettes de laboratoire et l'établissement de seuils. Cet objectif est certainement, par son caractère absolu, le plus difficile à atteindre.

Pour chaque méthode, on peut définir également trois niveaux de compréhension. Le couplage des différentes techniques doit alors permettre d'apporter une plus-value en terme de :

- **précision** des estimations faites sur les paramètres mesurés, de façon à conforter des résultats, à diminuer l'incertitude sur les mesures... ;
- **pertinence** des explications physiques de façon à ce que l'interprétation des données gagne en crédibilité ;
- **rapidité** d'obtention des conclusions de telle sorte que par le couplage, certaines hypothèses puissent être levées.

Ainsi si on croise les différents objectifs de l'END avec les plus-values possibles, on peut définir neuf cas de figure possibles quant à la contribution du couplage (Tableau 5. 1) :

Tableau 5. 1 Objectifs du couplage des différentes méthodes d'END

	A. Précision	B. Pertinence	C. Rapidité
1. Détecter	précision de détection d'une variation de propriété afin d'améliorer la définition de seuils ou de diminuer le risque de mauvaise interprétation des résultats	pertinence des causes suspectées suite à l'interprétation des résultats	amélioration du rendement des méthodes
2. Quantifier de façon relative	précision et amélioration du zonage à l'échelle de l'ouvrage ou du classement entre différents ouvrages	pertinence des valeurs des variations des propriétés dans le but de zoner un ouvrage ou de le classer parmi une collection d'ouvrages	rapidité du zonage de l'ouvrage ou du classement de différents ouvrages afin de cibler les futurs travaux
3. Quantifier de manière absolue	précision dans la quantification d'un paramètre	pertinence de l'interprétation des valeurs mesurées en terme de variations des propriétés du matériau et de la définition de critères de seuil	rapidité de la quantification des propriétés

5.2.3. ANALYSE DES DIFFÉRENTES POSSIBILITÉS DE COUPLAGE

La mise en œuvre répétée de plusieurs techniques utilisées simultanément sur différents corps d'épreuve (en laboratoire) ou sur les mêmes ouvrages (sur site) conduit à envisager les quatre modes de valorisation suivants :

- mode [1] : confrontation des résultats pour confirmer les mesures et leurs variations relatives. On se place alors dans les cas A1 et B1 ;
- mode [2] : confrontation des résultats pour affiner l'interprétation des variations, réduire les effets de biais et ainsi renforcer la qualité de l'évaluation. L'objectif est alors de quantifier de façon relative (cas A2, B2 et C2) ;
- mode [3] : utilisation successive d'une technique rapide (à fort rendement mais peut-être à faible précision) et d'une technique plus lente (à rendement moyen mais dont la précision est meilleure) dans les zones repérées par la première technique. On cherche à quantifier de façon pertinente ou absolue (cas A3, B3 et C3) ;

- mode [4] : utilisation d'une deuxième technique pour identifier un paramètre complémentaire, qui influence le résultat de la première technique, sans être le paramètre recherché a priori. Cela revient à éliminer complètement un facteur de biais pour améliorer la précision du résultat (cas A1, B1 et C1) et son interprétation (cas A2, B2 et C2).

Les trois premiers modes de valorisation correspondent à une utilisation éclairée mais somme toute classique de l'END (Tableau 5. 2).

Tableau 5.2 Synthèse bibliographique sur le couplage de méthodes d'END appliquées au génie civil

Références bibliographiques	Méthodes utilisées ⁽⁸⁾	Domaine d'application / matériau ausculté	Objectifs recherchés	Mode de couplage
Gourry <i>et al.</i> 1995	TIR, radar	Tunnel en maçonnerie (France)	Détecter des anomalies	/
Alt <i>et al.</i> 1996	TIR, radar, électrique	Tablier de pont, Viaduc Polk-Quincy (Kansas-USA)	Détecter des anomalies de sub-surface (délaminations...)	/
Maierhofer <i>et al.</i> 1998	Radar, US	Parement d'une écluse	Réduire le nombre de forages	3
Weill <i>et al.</i> 1998	TIR passive, IE	Dôme en béton armé, (Seattle-USA)	Détecter des défauts	3
Colla <i>et al.</i> 2002	IE, US et radar	Voie ferrée non ballastée	Évaluer les limites et avantages des méthodes	/
Dérobot <i>et al.</i> 2002	Radar, γ , ferroskan®, IE	Poutre de pont en béton avant destruction	1. Localiser les câbles de précontrainte et les armatures passives 2. Apprécier la qualité de l'injection et des câbles 3. Évaluer la qualité du béton	/
Karastathis <i>et al.</i> 2002	Sismique, radar, électrique	Barrage en béton et fondations (Marathon-Grèce)	1. Ausculter la structure 2. Investiguer les fondations	/
Abraham <i>et al.</i> 2003	radar, sismique réfraction	Tunnel en béton, (Mont-Blanc-France)	Caractériser l'endommagement	1 et 2
Klysz <i>et al.</i> 2003	Radar, capa, US, TIR	Tablier de pont en béton (Toulouse-France)	Zonage de l'ouvrage	1 et 2
Lataste <i>et al.</i> 2003 ^a	Électrique, acoustique	Dalle expérimentale en béton (6 x 5 x 0,6 m ³)	Caractériser la fissuration	1 et 2
Rhazi <i>et al.</i> 2003	Radar, potentiel de corrosion	Tablier de pont en béton (Montréal-Canada)	Tester les méthodes	1 et 2
Scott <i>et al.</i> 2003	Chaîne, IE, radar,	Tablier de pont	Comparaison des méthodes	/
Uomoto 2003	TIR passive et active, S, IE et US	Bloc expérimental en béton armé (1 x 1 x 0,4 m ³)	Détection de défauts internes	1 et 2
Antczak <i>et al.</i> 2004	TIR, IT	Parement d'une écluse en béton	Détection de vide	1 et 2
Meola <i>et al.</i> 2005	TIR, US, électrique	Structure en maçonnerie	Détection de défaut	/

⁽⁸⁾ TIR = thermographie infrarouge ; US = ultrasons ; γ = gammagraphie ; IE = impact écho ; IT = impédance thermique.

5.3 CHOIX DES MÉTHODES D'END

5.3.1. MOTIVATION POUR LE CHOIX DE LA MESURE DE RÉSISTIVITÉ ÉLECTRIQUE

5.3.1.1. EXPÉRIENCE ACQUISE

De nombreux travaux de recherche au sein du Centre de Développement des Géosciences Appliquées de l'Université Bordeaux 1 ont été menés ces dernières années concernant l'utilisation de la mesure de résistivité électrique en géophysique (Cabassut 1996, Denis *et al.* 1996, Lebourg *et al.* 1999) ou pour l'évaluation de l'état d'endommagement des ouvrages en béton armé (Bourget *et al.* 1995, Lataste 1998, Villesuzanne 1999, Lataste 2002, El Hassan 2004).

Au Canada, au sein du Groupe de Recherche en Auscultation et en Instrumentation (GRAI), la méthode électrique, telle que nous l'utilisons, a également fait l'objet de travaux récents dans le domaine du génie civil (Guissi 2004).

Les développements effectués par les deux équipes ainsi que l'expérience acquise depuis une dizaine d'années constituent des arguments forts pour approfondir l'utilisation de cette méthode.

5.3.1.2. NATURE DE LA CONDUCTION ÉLECTRIQUE ET INFLUENCE DES ALTÉRATIONS DU BÉTON SUR LES PROPRIÉTÉS ÉLECTRIQUES

Comme nous l'avons vu précédemment (voir chapitre 3), l'intérêt de développer la méthode de résistivité électrique comme outil d'END de l'état d'endommagement des ouvrages repose sur le fait que la conduction du courant électrique dans le béton est très affectée par la teneur en eau ou la présence de défauts dans le matériau.

De plus, on note que la porosité du béton est un paramètre essentiel qui conditionne les possibilités de circulation des fluides dans la matrice (Whittington *et al.* 1981). Or, la plupart des altérations physiques (fissuration, délamination...) ou chimiques (lessivage, lixiviation...) du béton se traduisent par une variation de sa porosité. C'est cette influence des altérations du béton sur ses propriétés électriques qui nous intéresse.

5.3.2. MOTIVATION POUR LE CHOIX DE LA THERMOGRAPHIE INFRAROUGE PASSIVE

5.3.2.1. EXPÉRIENCE ACQUISE

L'utilisation de la thermographie infrarouge passive dans le domaine de la géophysique ou du génie civil a fait l'objet de nombreux travaux de recherche au sein du Centre de Développement des Géosciences Appliquées ces dernières années (Métivier 1981, Durot 1989, Majourau 1990, Sirieix 1990).

Au Canada, au sein du Groupe de Recherche en Auscultation et en Instrumentation (GRAI), la thermographie infrarouge a également fait l'objet de nombreuses études de terrain

dans le domaine du génie civil (Daoust 1989, Pallardy *et al.* 1999, Delacre *et al.* 2001, Ballivy 2002, Ballivy *et al.* 2003, Ostrowsky 2005).

5.3.2.2. NATURE DE LA CONDUCTION THERMIQUE ET INFLUENCE DES ALTÉRATIONS DU BÉTON SUR LES PROPRIÉTÉS THERMIQUES

Comme nous l'avons vu précédemment (voir chapitre 4), l'intérêt de développer la méthode par thermographie infrarouge passive comme outil d'END repose sur le fait que la propagation de la chaleur dans le béton est très affectée par la teneur en eau ou la présence de défaut dans le matériau.

L'intérêt de cette technique tient également au fait que l'auscultation est totalement non destructive et sans contact, ce qui n'entraîne pas d'interaction avec l'ouvrage et ne pose pas de problème de couplage avec le matériau. L'unité de mesure (une caméra infrarouge) est portable, autonome et de faible encombrement. De ce fait, sa mise en œuvre est simple et très rapide. Elle permet de repérer rapidement des zones suspectes sur l'ouvrage et de visualiser en direct la réponse thermique. Enfin, les investigations sont très rapides et ne nécessitent pas l'interruption du fonctionnement des ouvrages, ce qui est un avantage pour ceux qui sont liés au trafic routier ou ferroviaire par exemple.

5.3.3. COMPLÉMENTARITÉ DES DEUX MÉTHODES CHOISIES

L'intérêt du couplage est d'utiliser la complémentarité des méthodes. La première priorité est d'identifier la sensibilité des deux techniques aux paramètres étudiés. Le Tableau 5. 3 synthétise les informations recueillies lors du travail bibliographique.

Tableau 5. 3 Sensibilité attendue des techniques aux propriétés et/ou défauts

	TIR passive	Résistivité électrique
Propriétés intrinsèques du béton (composition, E/C, ajouts...)	Quantification relative	Quantification relative
Teneur en chlorures	?	Quantification relative
Armatures	/	Détection, biais de mesure
Conditions hydriques	Quantification relative	Quantification relative
Température	Quantification absolue	Sensibilité
Alcali-réaction	?	Quantification relative
Fissuration	Détection	Quantification relative
Délamination	Zonage, extension	Quantification relative

On comprend alors la sensibilité croisée des deux techniques. Par exemple, si l'on s'intéresse au diagnostic d'une délamination, les informations recherchées sont l'extension, la profondeur et l'épaisseur. La thermographie permet de détecter rapidement le défaut et de tracer les limites de son extension. La mesure de résistivité électrique permet dans un premier temps de valider les limites de l'extension du défaut mis en évidence par la thermographie infrarouge. Puis, par l'utilisation de deux dispositifs allant à deux profondeurs d'investigations, il est possible d'estimer la profondeur du défaut.

L'utilisation d'une technique rapide et de surface (la thermographie infrarouge passive) avec une technique sensible aux différentes manifestations physico-chimiques des endommagements (la mesure de résistivité électrique) trouve un intérêt dans le couplage des méthodes d'END.

5.4 **CONCLUSION**

Le **couplage** de plusieurs méthodes d'END dans le cadre du diagnostic des ouvrages en béton devient incontournable. En effet, aucune méthode ne permet de répondre complètement aux attentes des gestionnaires d'ouvrages.

Quatre modes différents de couplage sont définis dans ce chapitre. Dans la suite du document, nous illustrerons les trois premiers à travers deux des trois études choisies :

- l'évaluation des **conditions hydriques** dans le béton : dans cette partie du document, l'utilisation de deux méthodes d'auscultation sur site permet de confronter les résultats pour confirmer les mesures et leurs variations relatives (**mode 1**). Le mode 2 peut être envisagé : l'utilisation de deux méthodes d'auscultation sur site permet d'affiner l'interprétation des variations, de réduire les effets de biais et ainsi de renforcer la qualité de l'évaluation ;
- l'aide à la caractérisation de la **fissuration** et de la **délamination** : l'utilisation successive d'une technique rapide à grand rendement, discriminante mais peu apte à quantifier (la thermographie infrarouge passive) et d'une technique plus lente, à rendement moyen, mais de précision meilleure (la mesure de résistivité électrique) dans les zones repérées par la première technique. Le **mode 3** du couplage est ici illustré.

DEUXIEME PARTIE :
RESULTATS EXPERIMENTAUX

CHAPITRE 6 : ÉVALUATION DES CONDITIONS HYDRIQUES DANS LE BÉTON

L'eau est à la fois un biais de mesure et un paramètre favorisant la plupart des dégradations du béton. En effet, la formation de gels gonflants dans la réaction alcalis-granulats, la corrosion des armatures en présence de chlorures, la lixiviation... nécessitent la présence d'eau pour débiter et se développer. L'évaluation des conditions hydriques du béton est donc une phase importante dans le diagnostic des ouvrages en génie civil. Pour cela, il existe des méthodes qui permettent de caractériser la teneur en eau ou ses variations relatives (le radar et la méthode capacitive, par exemple).

L'étude bibliographique réalisée lors de ce travail a permis de mettre en évidence l'influence majeure de l'eau sur les propriétés électriques et thermiques du béton. Dans ce chapitre, ce paramètre est étudié au travers de plusieurs expériences menées à la fois en laboratoire et sur site.

6.1 INTRODUCTION

6.1.1.1. DÉFINITION

Les bétons sont des matériaux caractérisés par une matrice poreuse qui contient plus ou moins d'eau. Différentes expressions de la quantité d'eau dans un matériau poreux existent. Il est possible de l'exprimer sous forme de (Magnan 2000) :

- sa **teneur en eau massique** (notée w) représentée par le rapport de la masse d'eau sur la masse du matériau sec. Elle s'exprime en pourcentage (%). Classiquement, la teneur en eau du béton est de l'ordre de quelques pour cent (4 à 8) ;
- sa **teneur en eau volumique** (notée Θ) représentée par le rapport du volume d'eau sur le volume total du matériau. Elle s'exprime en pourcentage (%). Elle est de l'ordre de quelques pour cent ;
- son **degré de saturation** (noté S_r) représenté par le rapport du volume occupé par l'eau sur le volume de la porosité totale (exprimé en %), Il peut varier théoriquement entre 0 à 100%. En général, un béton dans un environnement extérieur possède un degré de saturation d'au moins 60%.

Remarque : Par abus, on retrouve souvent le terme d'« humidité relative » pour parler des conditions hydriques du béton. Emprunté au vocabulaire de la météorologie, il s'agit là du pourcentage d'humidité, ou de vapeur d'eau, contenu dans l'air par rapport à la quantité maximum que peut contenir cet air avant de se condenser, c'est-à-dire avant que ne se forment

des gouttelettes d'eau. En d'autres termes, une humidité relative de 70% nous indique que l'air contient 70% du maximum de vapeur d'eau qu'il peut absorber à cette température. On dit que l'air est saturé, lorsque l'humidité relative est de 100%. Ce terme d'humidité relative est équivalent au degré de saturation pour un matériau solide.

Il convient également de distinguer l'eau contenue dans la masse du matériau, et l'eau de la couche superficielle. L'**eau dans la masse** représente l'eau emprisonnée dans la profondeur du matériau, au delà des premiers centimètres de surface. D'après Basheer *et al.* (2001^a), au-delà de 1 cm et dans des conditions usuelles de température, le degré de saturation du béton est supérieur à 80%. L'**eau de la couche superficielle** est, au contraire, celle contenue dans les premiers centimètres de l'épaisseur du parement. Elle peut être sujette à des variations rapides du fait de son interaction avec les conditions environnementales extérieures (Figure 6. 1). Cette dernière varie de 45 à 100% dans le premier centimètre de béton (Basheer *et al.* 2001^a).

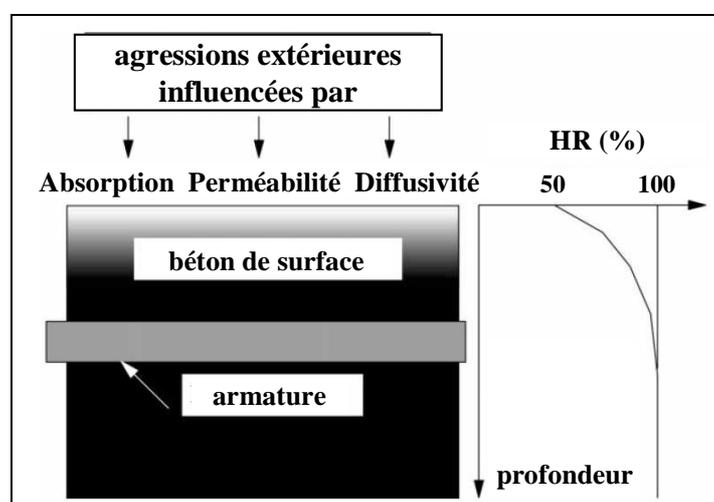


Figure 6. 1 Gradients d'humidité relative (HR) dans le béton (adapté de Basheer *et al.* 2001^a)

En termes de durabilité et de vieillissement du matériau, la présence d'eau dans le béton est reconnue comme étant un paramètre d'influence majeur, commun à la plupart des agressions physiques et/ou chimiques. Elle peut être à la fois le vecteur de l'altération (RAG, corrosion des armatures, carbonatation...), une conséquence de l'endommagement (RAG...) ou un biais de mesure. La connaissance des variations hydriques à la surface de l'ouvrage ou au sein même de la structure est donc susceptible d'apporter une aide non négligeable au diagnostic des ouvrages.

6.1.1.2. EN ÉLECTRIQUE

Différents types d'eau peuvent être distingués dans la structure du béton. Ainsi, Setzer (1990) propose une classification de l'eau en fonction du diamètre des pores : au delà de 0,1 μm l'eau est considérée comme **libre**, en deçà, l'eau est **liée** à la surface des grains. Selon Hunkeler (1996), l'eau contenue dans les petits pores du béton ou bien adsorbée à la surface des grains ne participe pas à la conduction électrique.

Pour un béton classique, Woelfl *et al.* (1980) indiquent que pour un degré de saturation évoluant de 90 à 100%, la résistivité électrique diminue de 4% pour chaque pourcent de degré de

saturation en plus. Cette tendance ne correspond pas aux mesures effectuées par Hunkeler (1996) sur plusieurs formulations. Il indique qu'entre 100 et 80%, la résistivité évolue en moyenne de 83 à 100 $\Omega.m$, puis qu'entre 80 et 40%, elle passe de 100 à 1000 $\Omega.m$.

En général, et quel que soit le rapport E/C, l'augmentation du degré de saturation entraîne une diminution de la résistivité électrique (Saleem *et al.* 1996, Al-Zahrani *et al.* 2003). Selon Gjørsvik *et al.* (1977), la résistivité du béton (E/C = 0,5) augmente d'un facteur 100 entre 40 à 100% de degré de saturation. Pour un degré de saturation inférieur à 80%, la résistivité électrique du béton évolue très rapidement vers des valeurs très élevées.

Cabrera *et al.* (1994) expriment la résistivité électrique comme une fonction de la teneur en eau. Brameshuber *et al.* (2003) proposent d'utiliser la mesure électrique afin d'estimer l'état d'humidité du matériau.

Chrisp *et al.* (2002) proposent d'utiliser la méthode de résistivité électrique afin d'estimer la répartition spatiale de l'humidité dans le matériau et notamment la profondeur du front d'humidification.

Enfin, il est à noter que la composition de l'eau interstitielle joue un rôle important dans la conduction électrolytique. Composée chimiquement pour une grande partie d'ions K^+ , Na^+ et OH^- , la capacité des fluides à transporter le courant électrique dépend pour beaucoup des espèces ioniques et de sa concentration. Il est possible de calculer la conductivité électrique σ d'une solution (inverse de la résistivité ρ) à partir des propriétés des ions détectés :

$$\sigma = \sum n_i \cdot u_i \cdot z_i \cdot F$$

- σ = la conductivité électrique de la solution (en $S.m^{-1}$),
- n_i = la concentration molaire de la solution (en $mol.L^{-1}$),
- u_i = la mobilité (en $m^2.s^{-1}.V^{-1}$),
- z_i = la magnitude de la charge (en eV),
- F = la constante de Faraday ($F = 96485 C.mol^{-1}$).

D'après Snyder *et al.* (2003), la résistivité électrique du liquide interstitiel varie entre 0,03 et 0,27 $\Omega.m$ pour des solutions fabriquées artificiellement à partir des concentrations de K^+ , Na^+ et OH^- . La composition chimique de leurs solutions est représentative de la majorité des bétons âgés de plus de 28 jours.

A partir des travaux de Snyder *et al.* (2003), il est possible de calculer l'influence de l'ajout d'ions chlorures sur la valeur de la résistivité de la solution interstitielle. En effet, pour l'élément chlore Cl^- , la mobilité est d'environ $6.10^{-8} m^2.s^{-1}.V^{-1}$ et la magnitude de la charge est de -1 eV. Pour une solution saline à 35 $g.L^{-1}$ (eau de mer), la résistivité électrique de la solution interstitielle diminue d'environ 0,03%.

Les ions sont présents dans la solution interstitielle du matériau dès la fabrication du béton. La pollution par des ions extérieurs entraîne une baisse de la résistivité apparente du béton. Cette diminution, comme dans le cas des ions Cl^- , est d'autant plus grande que la concentration ionique est élevée.

Selon Saleem *et al.* (1996), l'influence de la concentration ionique est plus importante que celle des conditions hydriques : plus la concentration ionique est élevée, moins les variations de

degré de saturation ont d'effet sur la résistivité apparente (dans le cas de la pollution par les chlorures ou les sulfates).

6.1.1.3. EN THERMIQUE

Les résultats expérimentaux démontrent une augmentation linéaire de la conductivité thermique en fonction du degré de saturation, à basses températures ($< 20^{\circ}\text{C}$), où les effets d'évaporation/condensation dans l'espace poral sont négligeables (Laurent 1986).

Kahn *et al.* (1994) ont montré que la conductivité thermique augmente de façon significative lorsque le degré de saturation atteint 50%.

D'autres études menées par Kahn (2002) ont montré que la conductivité thermique du béton augmente avec la teneur en eau : augmentation d'environ 10% par degré de teneur en eau (Figure 6. 2).

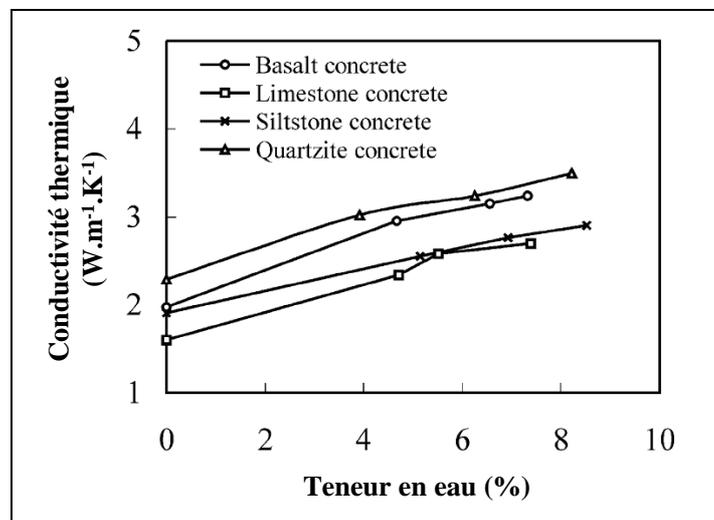


Figure 6. 2 Conductivité thermique en fonction de la teneur en eau (d'après Kahn 2002)

D'après Kim *et al.* (2003), la conductivité thermique entre un béton totalement sec et un béton saturé en eau augmente de façon très importante d'environ 20%.

6.1.1.4. AUTRE MÉTHODE UTILISÉE POUR ÉVALUER L'HUMIDITÉ

La méthode capacitive permet d'évaluer les conditions hydriques du béton. Elle a notamment été développée par le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (Baron *et al.* 1977, Blaszczyk *et al.* 1993). Le principe de cette méthode est présenté succinctement puisque j'ai utilisé par la suite les résultats de mesures effectuées par Xavier Dérobert (LCPC-Nantes).

Le principe de la méthode capacitive repose sur la mesure de la fréquence de résonance d'un circuit oscillant entre deux électrodes métalliques posées à la surface du béton. Ces deux électrodes constituent avec le matériau environnant un condensateur diélectrique dont la capacité dépend de la géométrie des électrodes et de la valeur de la constante diélectrique relative du matériau ϵ . La fréquence de résonance varie en fonction de la nature diélectrique du béton et dépend principalement de sa teneur en eau. Cette technique apparaît donc comme étant une mesure relative de la teneur en eau (Dérobert *et al.* 2005).

Dans le cas d'électrodes planes et parallèles de même surface (condensateur plan), la valeur de la capacité est donnée par la formule suivante (Figure 6. 3) :

$$C = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon \cdot S}{e}$$

- C = capacité (en F),
- S = surface d'une électrode (en m^2),
- e = écartement des électrodes (en m),
- ϵ_0 = permittivité absolue du vide ($\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ F.m}^{-1}$),
- ϵ = constante diélectrique relative du matériau entre les électrodes (en F.m^{-1}).

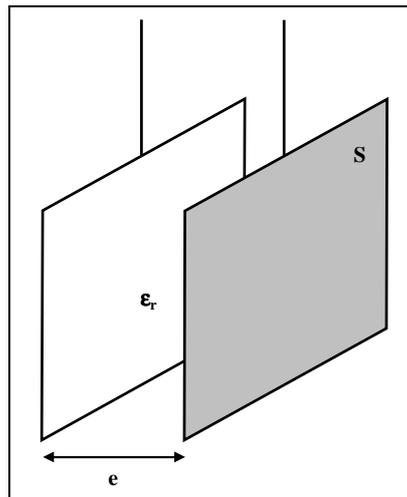


Figure 6. 3 Schéma d'un condensateur plan

La valeur de la capacité est proportionnelle à la constante diélectrique. Plus le matériau contient de l'eau, plus la capacité est élevée.

Dans le cas de mesures à partir de la surface, la disposition des électrodes peut être schématisée par la Figure 6. 4. Le volume de mesure déterminé par les électrodes ainsi que la profondeur d'action « h » dépendent de la longueur, de la largeur et de l'écartement des électrodes. Dans cette géométrie, il n'y a pas de formule simple pour exprimer la valeur de la capacité.

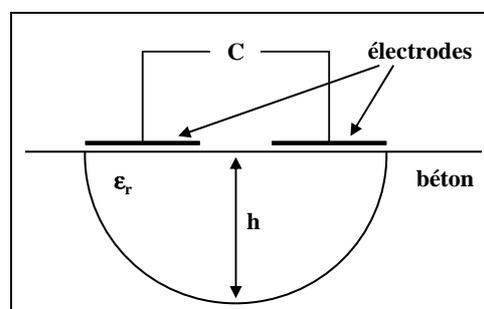


Figure 6. 4 Principe du dispositif de mesure en surface

Un circuit électronique qui délivre une tension alternative (oscillateur), est généralement utilisé pour mesurer la capacité diélectrique. La fréquence du signal reçu dépend alors de la valeur

de la capacité. Cette fréquence est mesurée par un fréquencesmètre. Il existe une relation linéaire entre la fréquence et la constante diélectrique. Si un étalonnage a pu être réalisé (sur prélèvement), il est possible de quantifier la teneur en eau.

En pratique, pour les ouvrages en béton, il existe généralement un gradient d'humidité important dans le matériau. Les mesures capacitatives donnent alors une information volumique sur la permittivité relative moyenne du béton sur les premiers centimètres. Elle prend en compte la teneur en eau à différentes profondeurs avec une pondération liée à la distance entre les électrodes. Dans une telle situation, l'étalonnage reste difficile, voire impossible. La première raison est la nature des composants du béton très variable suivant les ouvrages. Les permittivités relatives correspondantes peuvent être notablement différentes pour une même teneur en eau. De plus, il existe souvent un gradient d'humidité au sein du béton qui rend toute tentative d'étalonnage difficile. Il faut donc se contenter d'une information relative qui évolue avec la teneur en eau du béton de surface (lui-même sensible à la teneur en eau en profondeur).

Cette information intéressante peut être entachée d'erreur lorsque la surface de contact est trop irrégulière (rugosité du parement), la méthode étant particulièrement sensible à la qualité de la surface du matériau. Ceci constitue une limite importante de la méthode.

6.2 ÉTABLISSEMENT DES PARAMÈTRES DE LA FORMULE D'ARCHIE DANS LE CAS DES BÉTONS

6.2.1. INTRODUCTION

Les relations entre les propriétés microstructurales des bétons (et notamment la porosité) et les propriétés telles que la résistivité électrique sont étudiées depuis longtemps. La relation empirique établie par Archie en 1942 permet de mettre en relation la résistivité électrique d'un matériau poreux (ρ) avec la résistivité électrique de la solution interstitielle (ρ_w), sa porosité (Φ), son degré de saturation (S_r) et d'autres facteurs intrinsèques à la roche (lithologie et cimentation). Cette loi s'écrit sous la forme :

$$\rho = a \cdot \rho_w \cdot \Phi^{-m} \cdot S_r^n$$

Dans cette expression interviennent trois paramètres définis empiriquement et applicables aux roches :

- « a » caractérise la lithologie. Ce paramètre prend des valeurs de 0,6 à 2 (1,8 à 2 pour un grès ; environ 1,3 pour un sable non consolidé) ;
- « m » est le facteur de cimentation. Ce paramètre prend des valeurs de 1,3 à 2,2. Il augmente lorsque la tortuosité augmente ;
- « n » \approx 2.

Si l'on s'intéresse aux bétons, les résultats sont très différents d'un auteur à l'autre. Concernant le paramètre « m », les valeurs sont de 2,15 et 3,21 pour, respectivement un béton âgé de 28 jours et un béton âgé de 29 ans selon Tumidajski *et al.* (1996). Selon Backe *et al.* (2001) ce

paramètre est de 5,77 pour une pâte fraîche de ciment. Selon Whittington *et al.* (1981), il vaut 1,2 (dans ce cas, la porosité est remplacée par la fraction de pâte).

Dans l'évaluation des propriétés du béton, il est important de pouvoir dissocier l'effet de la porosité de celui du degré de saturation en eau.

6.2.2. CORPS D'EPREUVE A POROSITE VARIABLE

Dans le cadre du « Projet de recherche sur la pathologie du béton de peau par méthodes non destructives » soutenu par le RGC&U, des mesures électriques ont pu être réalisées par Jean-François Lataste (CDGA, Université Bordeaux 1) sur deux séries de corps d'épreuve. Sur ces mêmes corps d'épreuve, des mesures capacitives ont été réalisées par Xavier Derobert (LCPC-Nantes). Je tiens à les remercier de m'avoir fourni les données permettant d'étoffer mon travail.

6.2.2.1. DESCRIPTION DES CORPS D'EPREUVE

Les mesures électriques sont réalisées sur des corps d'épreuves fabriqués au cours du projet français BHP2000 (Baroghel-Bouny *et al.* 2004). Les échantillons sont entreposés dans le port de La Rochelle depuis 1996, dans la zone de marnage (Figure 6. 5).



Figure 6. 5 Site de stockage dans le port de La Rochelle à marée basse (photographie de gauche) et à marée montante (photographie de droite)

Tous les corps d'épreuve ont la même géométrie (Figure 6. 6) et ont été conservés dans les mêmes conditions. Seules leurs formulations sont différentes, ce qui leur confèrent en particulier des porosités différentes (Tableau 6. 1) :

- les résistances en compression varient de 25 à 120 MPa ;
- des fumées de silice (SF pour Silica Fume) ou des cendres volantes (FA pour Fly Ashes) ont été incorporées à certains échantillons afin notamment d'élargir la gamme de porosité.

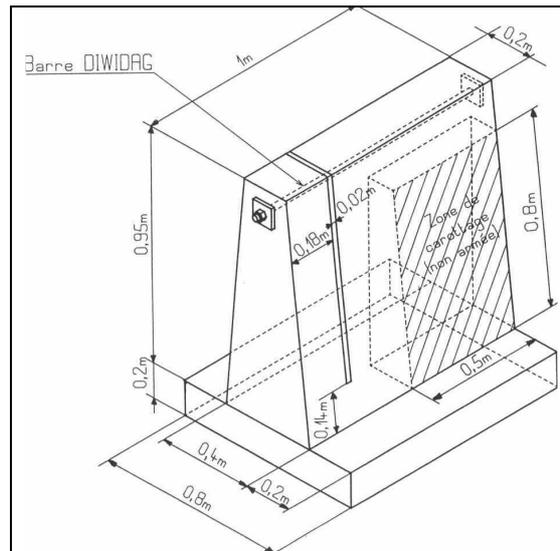


Figure 6.6 Caractéristiques géométriques des corps d'épreuve

Tableau 6.1 Formulations des corps d'épreuve auscultés

	M25	M50(1)	M50(2)	M75	M25FA	M30FA	M75SF	M100SF	M120SF
	Ciment Portland			Cendres volantes			Fumées de silice		
E/C	0,84	0,48	0,48	0,32	0,96	0,74	0,38	0,33	0,26
f_c (MPa)	25	50	50	75	25	30	75	100	120
Φ efficace	0,146	0,144	0,144	0,115	0,15	0,126	0,1	0,084	0,074

Les valeurs de porosité représentent une mesure de la porosité accessible à l'eau sur des prélèvements. Aucune information n'est donnée sur la précision de ces valeurs.

Neuf échantillons ont donc été auscultés par méthode électrique, dans des zones non armées. Les périodes de mesure sont conditionnées par les horaires de marée. Dans de telles conditions de stockage, nous pouvons considérer que tous les corps d'épreuve sont saturés par une solution d'eau salée dont la concentration en chlorures est identique (35 g.L^{-1} de sel dans l'eau de mer).

6.2.2.2. RESULTATS DES MESURES ELECTRIQUES

La Figure 6.7 représente les résultats obtenus sur les corps d'épreuve de La Rochelle (Lataste *et al.* 2005). Il est important de noter qu'il s'agit de bétons différents dont on considère qu'ils sont complètement saturés en eau de mer ($S_r = 1$).

La valeur de résistivité électrique apparente est une moyenne arithmétique sur 40 mesures effectuées avec le dispositif Q5 (5 cm entre électrodes), selon deux profils. Les barres d'erreur présentées sur la Figure 6.7 sont \pm un écart-type.

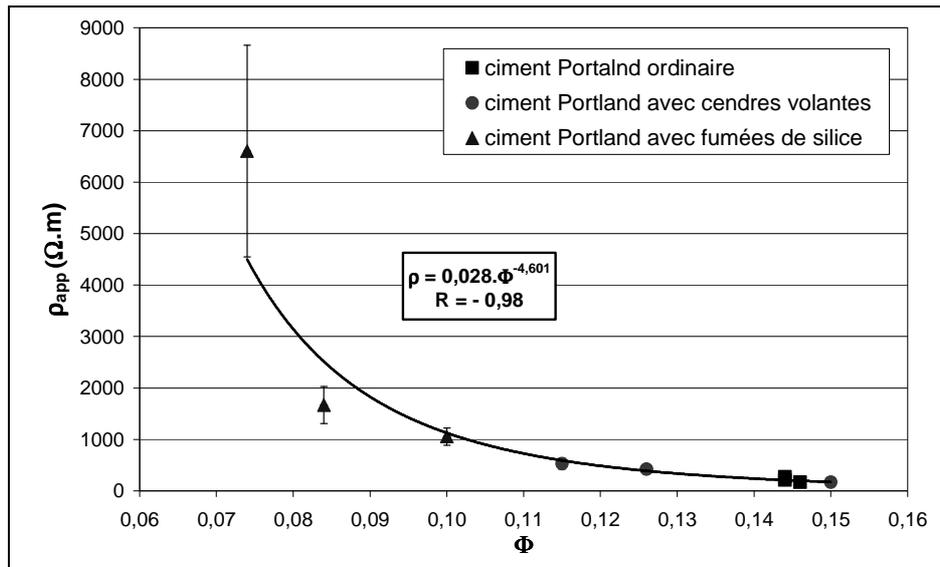


Figure 6. 7 Résistivité électrique en fonction de la porosité

A partir de ce jeu de données, il est possible de tracer une courbe de régression (ici de type puissance). La forme de l'équation obtenue $\rho = f(\Phi)$ rappelle la formule d'Archie (avec un degré de saturation $S_r = 1$). Par identification, les différents paramètres sont alors :

$$\begin{cases} \rho = a \cdot \rho_w \cdot \Phi^{-m} & \text{Archie} \\ \rho = 0,028 \cdot \Phi^{-4,601} & \text{Régression} \end{cases} \quad \begin{cases} a \cdot \rho_w = 0,028 \\ m = 4,601 \end{cases}$$

Cette courbe tient compte ici de l'ensemble des échantillons. En écartant les mélanges contenant des fumées de silice (porosité efficace < 0,1), la courbe de régression calculée sans ces trois points donne des résultats tout à fait comparables (l'équation et le coefficient de corrélation sont très proches). De la même manière, en écartant les mélanges contenant des cendres volantes, la courbe calculée donne des résultats tout à fait comparables.

L'effet des conditions hydriques sur les propriétés électriques semblent être prépondérant sur l'ajout des cendres volantes ou des fumées de silice dans le béton.

Nous obtenons **une relation entre la porosité efficace et la résistivité apparente** du béton.

6.2.3. CORPS D'EPREUVE A DEGRE DE SATURATION VARIABLE

6.2.3.1. DESCRIPTION DES CORPS D'EPREUVE

Dans le cadre du « Projet de recherche sur la pathologie du béton de peau par méthodes non destructives » soutenu par le RGC&U, six corps d'épreuve avec des degrés de saturation différents ont été auscultés.

Il s'agit de plusieurs échantillons identiques en termes de composition (béton ordinaire, $f_c = 25$ MPa, porosité efficace = 0,179) mais qui ont été progressivement séchés dans une

enceinte. Le conditionnement des dalles, réalisé au LMDC-Toulouse (Figure 6. 8), a été mis en œuvre à un âge minimum du béton de 90 jours. La procédure retenue est la suivante :

- saturation en eau jusqu'à obtention d'une masse constante, puis pesée ;
- séchage à 80°C jusqu'à obtention d'une masse constante, puis pesée ;
- imprégnation jusqu'à obtention du degré de saturation souhaité ;
- imperméabilisation des faces par application de papier aluminium auto-adhésif ;
- étuvage à 80°C pendant 2 mois pour homogénéisation de la répartition du volume d'eau.

Ainsi les degrés de saturation obtenus varient entre 40 et 90%.



Figure 6. 8 Conditionnement des dalles

6.2.3.2. RESULTATS DES MESURES ELECTRIQUES

La Figure 6. 9 représente les résultats des mesures électriques sur les corps d'épreuve de laboratoire fabriqués au LMDC-Toulouse.

La valeur de résistivité électrique est une moyenne arithmétique sur 20 mesures effectuées avec le dispositif Q5 (5 cm entre électrodes). Les barres d'erreur présentées sur la Figure 6. 7 représentent \pm un écart-type.

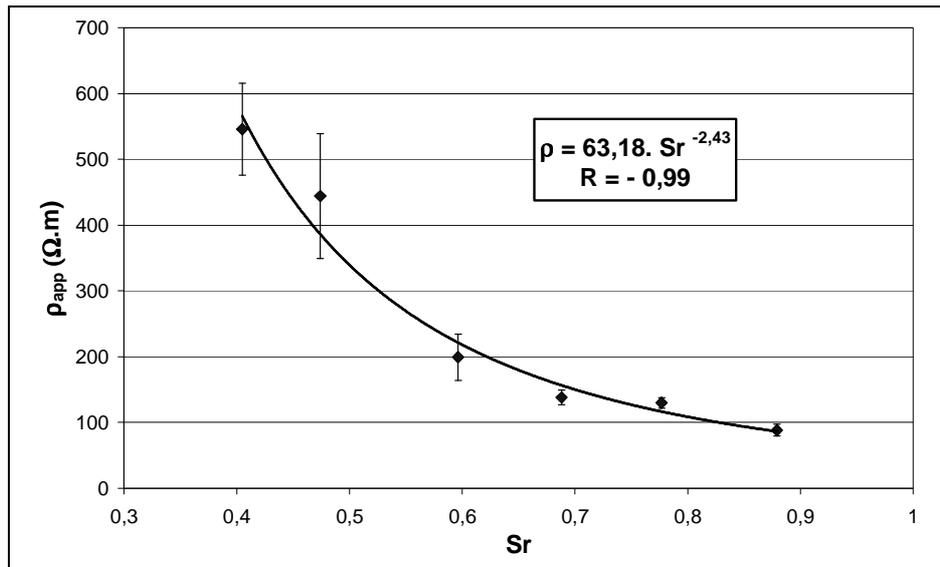


Figure 6.9 Résistivité électrique en fonction du degré de saturation

A partir de ce jeu de données, il est possible de tracer une courbe de régression (ici de type puissance). La forme de l'équation obtenue $\rho = f(Sr)$ rappelle la formule d'Archie (avec une porosité efficace $\Phi = 0,179$). Par identification, les différents paramètres sont alors :

$$\begin{cases} \rho = a \cdot \rho_w \cdot \Phi^m \cdot Sr^{-n} & \text{Archie} \\ \rho = 0,028 \cdot Sr^{-2,43} & \text{Régression} \end{cases} \quad \begin{cases} a \cdot \rho_w \cdot \Phi^m = 63,18 \\ n = 2,43 \end{cases}$$

Nous obtenons une **relation entre le degré de saturation et la résistivité électrique** du béton.

6.2.4. DISCUSSION

Les deux courbes de régression obtenues ont pour équation respective :

- $\rho = 0,0281 \cdot \Phi^{-4,60}$ ($Sr = 1$; Φ varie) ;
- $\rho = 63,18 \cdot Sr^{-2,43}$ ($\Phi = 0,179$; Sr varie).

Dans les deux cas, l'indépendance des données statistiques est vérifiée (test sur les variances : l'hypothèse H_0 « le coefficient de régression est égal à 0 » est dans les deux cas rejetée de façon très hautement significative). Les coefficients de corrélation sont très proches de 1, respectivement de -0,98 et -0,99.

Afin de valider les deux formules obtenues à partir de bétons différents, lors de deux expérimentations totalement indépendantes, la porosité des corps d'épreuves de Toulouse peut être calculée : en considérant dans la deuxième équation un degré de saturation $Sr = 1$, la résistivité apparente est de 63,18 $\Omega.m$. En réinjectant cette valeur de résistivité dans la première formule, le calcul de la porosité donne $\Phi = 0,187$. Cette valeur de porosité est très proche de la vraie valeur (porosité mesurée = 0,179 - soit une erreur de 5,5%).

A partir des deux expériences réalisées, nous avons montré qu'il existe une relation entre la résistivité électrique du béton ρ , sa porosité Φ et son degré de saturation S_r . Cette relation peut s'écrire sous la forme :

$$\rho = 0,0281 \cdot \Phi^{-4,60} \cdot S_r^{-2,43}$$

Par analogie avec la formule établie par Archie, nous proposons d'identifier les différents paramètres : $n \approx 2,43$ et $m \approx 4,60$. Ces deux valeurs sont tout à fait comparables avec les résultats trouvés dans la littérature.

En connaissant la résistivité électrique du fluide interstitiel ρ_w , il est possible d'estimer le paramètre « a ». D'après Snyder *et al.* (2003), la résistivité électrique du fluide interstitiel varie entre 0,03 à 0,27 $\Omega \cdot m$ pour des solutions fabriquées artificiellement, et représentatives de la majorité des bétons au-delà de 28 jours.

Le calcul du paramètre « a » à partir des deux équations suivantes donne :

$$\begin{cases} \rho = 0,0281 \cdot \Phi^{-4,60} & \text{avec } S_r = 1 \\ \rho = 63,18 \cdot S_r^{-2,43} & \text{avec } \Phi = 0,179 \end{cases}$$

$$\begin{cases} a \rho_w = 0,0281 \\ a \rho_w \cdot \Phi^{-4,60} = 63,18 & \text{avec } \Phi = 0,179 \end{cases}$$

$$\begin{cases} a \rho_w = 0,028 \\ a \rho_w = 63,18 \times 0,179^{-4,60} = 0,023 \end{cases}$$

Si la résistivité du fluide « ρ_w » varie entre 0,03 et 0,27 (Snyder *et al.* 2003) alors le paramètre « a » varie de 0,1 à 0,8.

6.2.5. CONCLUSION

Sur la base des mesures présentées dans cette partie, une relation existe entre la résistivité électrique du matériau, sa porosité et son degré de saturation. Par analogie, cette relation peut être reliée à la formule empirique d'Archie (établie en 1942). Dans le cas du béton, les paramètres de cette relation sont identifiés aux valeurs suivantes :

- a, paramètre de lithologie, varie de 0,1 à 0,8. Il prend des valeurs de 0,6 à 2 pour des roches. Dans la gamme usuelle des bétons, la porosité efficace est faible (< 20%). Les valeurs de « a » sont plus faibles que dans le cas des roches ;
- m = 4,6. Ce paramètre de cimentation prend des valeurs de 1,3 à 2,2 pour les roches. Il augmente lorsque la tortuosité augmente ;
- n = 2,4. Ce paramètre a une valeur d'environ 2 pour les roches.

6.2.6. RESULTATS DES MESURES CAPACITIVES

La Figure 6. 10 représente les résultats des mesures capacitives obtenues sur les corps d'épreuve testés en laboratoire à teneur en eau contrôlée (voir paragraphe 6.2.3.1). Les mesures sont réalisées par Xavier Derobert (LCPC-Nantes) en utilisant des électrodes de dimensions 10 x 70 mm². Sur la Figure 6. 10, l'axe des ordonnées représente la différence de fréquence (en

kHz) entre la mesure réalisée sur la surface du matériau et une mesure de référence (prise dans l'air). Cette mesure de référence varie à chaque utilisation du système de mesure en fonction des conditions environnementales (température et humidité principalement).

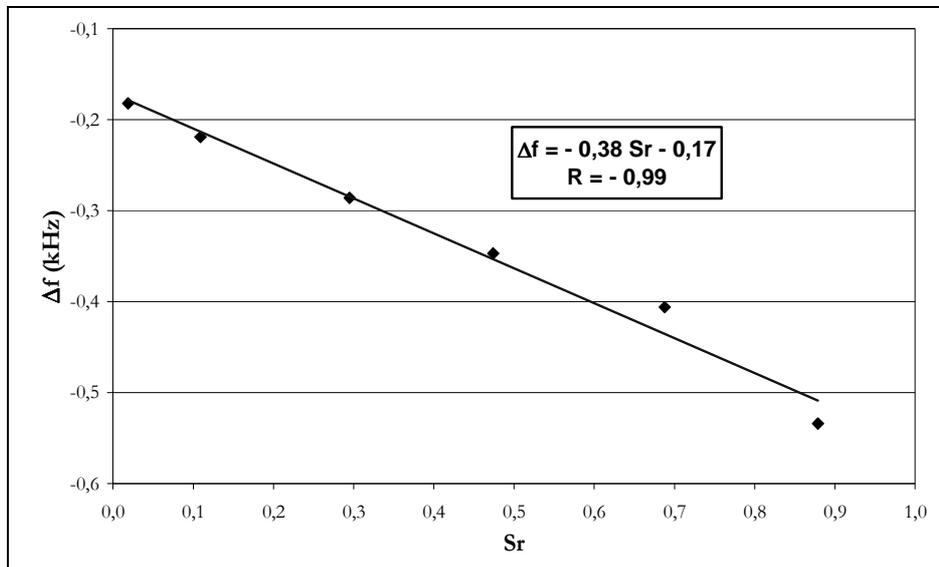


Figure 6. 10 Évolution de la différence de fréquence en fonction du degré de saturation

Classiquement, les mesures fréquentielles Δf (en kHz) sont exploitées en termes de degré de saturation S_r , en traçant la droite de régression entre ces deux paramètres. A partir des mesures réalisées, l'équation de la droite est la suivante :

$$\Delta f = -0,38.S_r - 0,17 \quad \text{avec } R = -0,99$$

L'indépendance des données statistiques est testée (l'hypothèse H_0 est rejetée de façon très hautement significative). Le coefficient de corrélation est très proche de 1.

Cette méthode d'auscultation est essentiellement sensible à un paramètre : la teneur en eau volumique du matériau. Par cette nouvelle approche, il est maintenant possible d'estimer le degré de saturation en utilisant cette relation mathématique.

6.2.7. CONCLUSION

En se basant sur la loi d'Archie (relation établie de façon empirique), il est possible de distinguer les effets de la résistivité électrique du fluide, de la porosité, du degré de saturation sur la mesure de résistivité électrique du matériau. Les valeurs de paramètres de cette relation sont proposées à la suite de deux expérimentations. Elles apparaissent cohérentes vis-à-vis des valeurs de ces mêmes paramètres pour les roches.

Il existe une relation linéaire entre les mesures fréquentielles obtenues à partir de la capacimétrie et le degré de saturation. À partir des mesures fréquentielles, il est possible d'estimer le degré de saturation d'un matériau, sous réserve de calage de ces deux paramètres.

6.3 ÉTUDE DE L'INFLUENCE DES VARIATIONS HYDRIQUES EN LABORATOIRE

Le but de cette étude en laboratoire est d'estimer l'influence de la profondeur du front de séchage et d'humidification par deux méthodes non destructives : la mesure de résistivité électrique et la thermographie infrarouge passive.

6.3.1. CARACTÉRISTIQUES DE LA DALLE

Plusieurs dalles ont été prélevées sur le tablier du pont de Snowdon (Montréal, Canada), avant sa démolition. Seulement l'une d'entre elles, la dalle 5, présente une surface non rugueuse qui permet la réalisation de mesures non destructives. Les autres dalles sont très endommagées.

Aucune information sur la formulation du béton, son âge ou encore ses propriétés mécaniques n'est connue. Visiblement, les armatures métalliques présentent les symptômes d'une corrosion avancée. Les dimensions de la dalle étudiée sont données sur la Figure 6. 11.

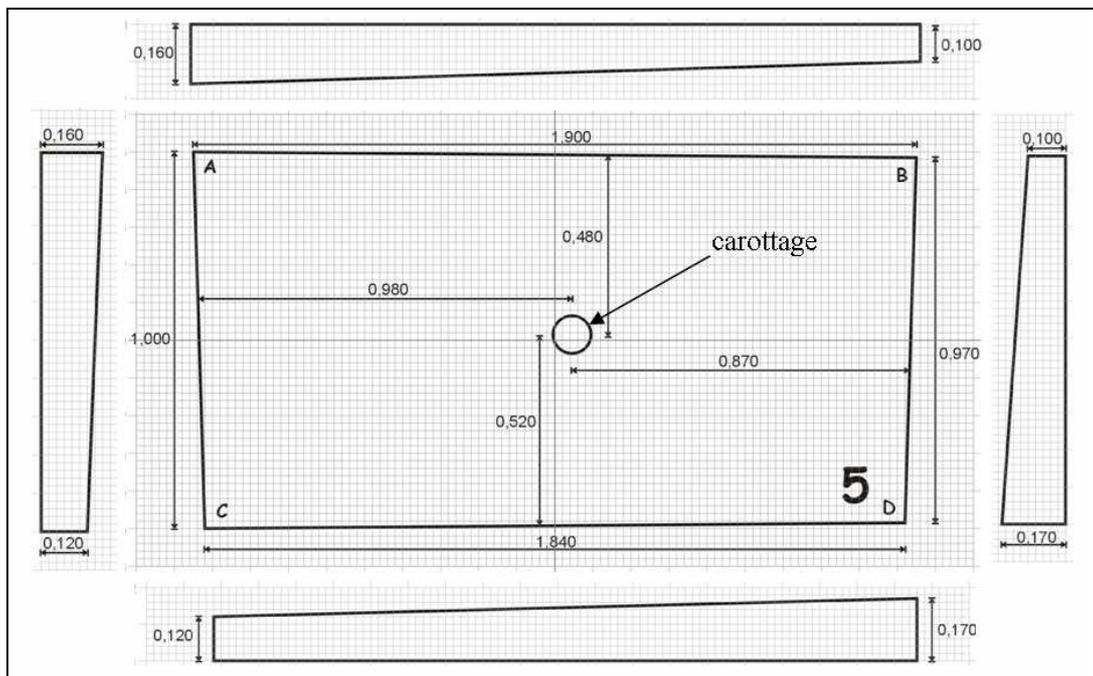


Figure 6. 11 Dimensions de la dalle 5

L'épaisseur de la dalle n'est pas constante. Avant toute interprétation des résultats, il est nécessaire de corriger les valeurs de résistivité électrique de ces variations (comme proposé au paragraphe 4.4.2, page 95).

6.3.2. PROGRAMME EXPÉRIMENTAL

La dalle est mise dans un entrepôt pour un séchage à température ambiante durant un mois avant la procédure de saturation. La cartographie des armatures est effectuée par mesures radar.

Une partie de la dalle est humidifiée pendant 21 jours. Pratiquement, un cadre en bois est collé à la surface de la dalle afin de retenir l'eau durant la période indiquée (Figure 6. 12). Une deuxième partie est humidifiée durant 7 jours et une troisième partie durant 2 jours. La dernière partie de la dalle est laissée dans l'environnement ambiant (état référence sans humidification). Par la suite, ces différentes zones humidifiées seront notées « 0j », « 2j », « 6j » et « 21j ».



Figure 6. 12 Photographie du dispositif expérimental

En faisant l'hypothèse de fronts parallèles à la surface et d'une humidité répartie de façon homogène entre la surface et le front d'humidification, quatre zones sont créées avec des profondeurs du front d'humidification différentes.

6.3.3. MÉTHODES D'INVESTIGATION

Des mesures de résistivité électrique et des images par thermographie infrarouge sont réalisées dans les quatre zones au cours de quatre séances de mesure réparties sur une demi-journée.

Les premières mesures sont effectuées au moment où les cadres en bois, qui retiennent l'eau, sont retirés. Cet instant est pris comme temps de référence (t_0). Afin de suivre l'évolution de la résistivité électrique et de la température de surface au cours du séchage, des mesures sont effectuées aux temps t_0+1h , t_0+2h et t_0+3h (notés respectivement t_1 , t_2 et t_3). Ce suivi est réalisé sur les trois zones humidifiées. La zone « 0j » n'a fait l'objet que d'une séance de mesure.

En électrique, les points de mesure sont situés entre deux armatures longitudinales afin de limiter l'effet de ces armatures sur les mesures. Les deux dispositifs quadripolaire carré (Q5 et Q10) sont utilisés dans les deux directions d'injection du courant (α pour une injection perpendiculaire à l'armature transversale et β pour une injection parallèle à l'armature transversale). Pour chaque position du dispositif, quatre mesures de résistivité électrique sont ainsi réalisées (α_5 , β_5 , α_{10} et β_{10}). Dans chaque zone, six points de mesure sont choisis (Figure 6. 13) :

- profil armé (PA) : trois points de mesure au droit d'une armature transversale. Dans ce cas, la configuration α est peu sensible à la présence de cette armature ;

- profil non armé (PNA) : trois points de mesure entre deux armatures transversales. On se place alors au centre d'une maille dessinée par le réseau d'armatures afin de minimiser leurs effets.

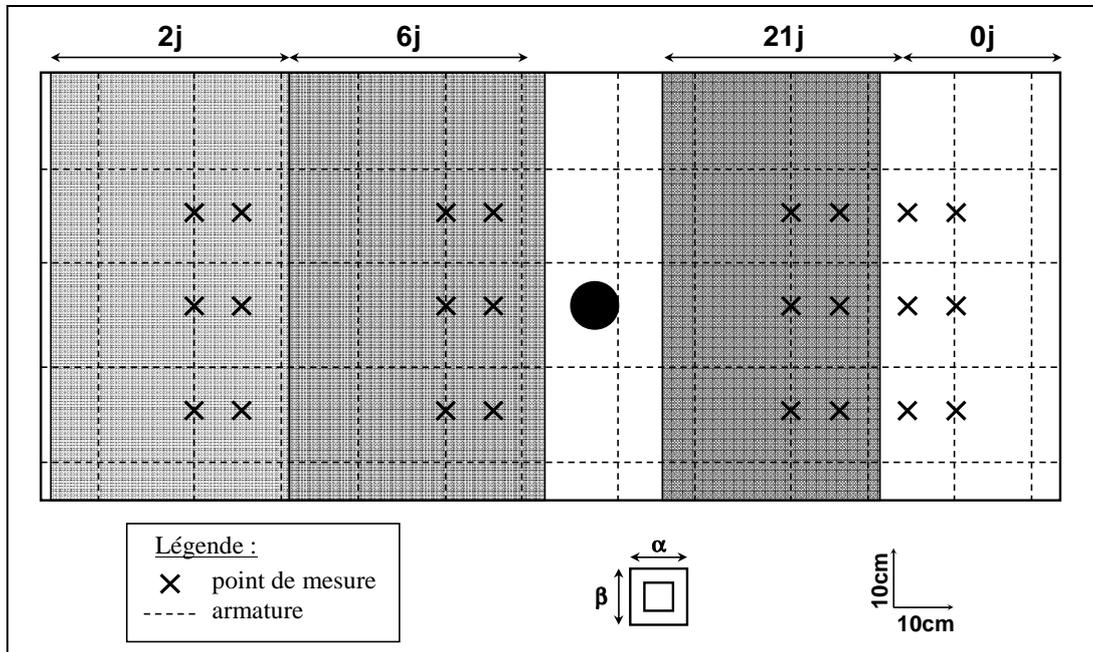


Figure 6.13 Schématisation de la procédure d'expérimentation

A la fin des séances de mesures, des carottes de béton sont récupérées sur chacune des quatre zones. Le carottage est réalisé par sciage à sec afin de ne pas perturber les conditions hydriques du béton prélevé. Trois pesées permettent d'avoir la masse de l'échantillon, la masse de l'échantillon complètement saturé en eau (saturation en eau jusqu'à obtention d'une masse constante, puis pesée) et la masse de l'échantillon sec (séchage à 80°C jusqu'à obtention d'une masse constante, puis pesée). Ces différentes mesures en laboratoire permettent d'estimer la teneur en eau (w), la porosité du béton (Φ) et la densité du matériau sec (d). Il est alors possible d'en déduire le degré de saturation à l'échelle de la carotte (S_r). Les résultats sont donnés dans le Tableau 6. 2.

Tableau 6. 2 Résultats des mesures effectuées sur les carottages

Zone	Φ (%)	w (%)	S_r (%)	d
0j	9,77	2,85	65,71	2,25
2j	10,01	3,67	85,26	2,33
6j	9,90	3,82	86,82	2,25
21j	10,02	3,96	88,79	2,25

Remarque : ces valeurs sont des moyennes sur toute l'épaisseur de la dalle et ne tiennent pas compte des gradients possibles (gradient de porosité, de degré de saturation...).

6.3.4. RÉSULTATS ET ANALYSE DES MESURES DE RÉSISTIVITÉ

Le traitement des données permet de mettre en évidence les corrélations entre les mesures réalisées dans les deux sens d'injection (α et β) et entre les deux profils (PA et PNA). Les mesures sont également corrigées des effets de l'épaisseur de la dalle. Il est donc possible de calculer une valeur moyenne de résistivité électrique pour chaque taille de dispositif (moyenne sur 12 mesures).

6.3.4.1. TRAITEMENT DES DONNÉES

Afin d'illustrer le traitement des données, nous prenons comme exemple les mesures effectuées à t_0 .

a. Corrélation entre les deux sens d'injection du courant

En l'absence d'une quelconque anisotropie électrique, les résistivités mesurées dans le cas d'une injection dans le sens α sont égales à celles mesurées dans le sens β . Or, la présence des armatures se traduit par une anisotropie électrique.

Les mesures réalisées avec l'injection du courant dans le sens α sont les moins sensibles à la présence des armatures. La pente des droites de régression calculées pour chaque dimension du dispositif traduit l'anisotropie électrique (Figure 6. 14). Afin d'augmenter le nombre de points de mesure dans le but d'avoir une valeur moyenne par zone, nous re-normons les résistivités ρ_β par rapport aux résistivités ρ_α de telle sorte que :

$$\rho_{\beta(Q5)\text{calculé}} = \rho_{\beta(Q5)\text{mesuré}}/0,8884$$

$$\rho_{\beta(Q10)\text{calculé}} = \rho_{\beta(Q10)\text{mesuré}}/1,3101$$

Cette opération est effectuée pour chaque profil (PA et PNA) lors de chaque séance de mesure, en tenant compte de la pente de la droite de régression.

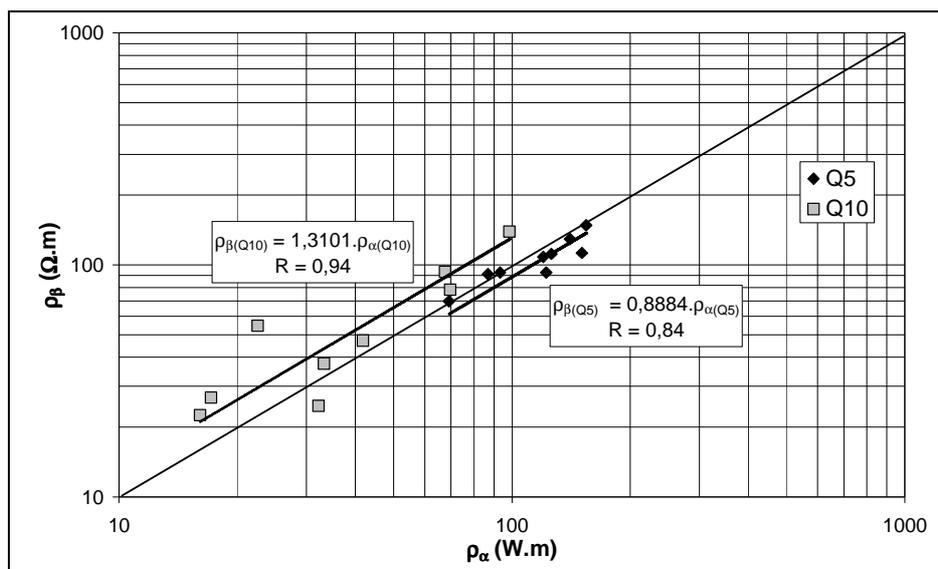


Figure 6. 14 Corrélation entre les deux sens d'injection pour le profil armé

b. Corrélation entre les deux profils

De la même manière que précédemment, les mesures réalisées le long du profil non armé (PNA) sont le moins sensibles à la présence des armatures. Ainsi, il est possible de re-normer les valeurs mesurées le long du profil armé (PA) par rapport à celles du profil non armé (PNA) de telle sorte que :

$$\rho_{PA(\alpha 5)}_{calculé} = \rho_{PA(\alpha 5)}_{mesuré} \cdot 0,9604$$

$$\rho_{PA(\beta 5)}_{calculé} = \rho_{PA(\beta 5)}_{mesuré} \cdot 0,9691$$

$$\rho_{PA(\alpha 10)}_{calculé} = \rho_{PA(\alpha 10)}_{mesuré} \cdot 1,2008$$

$$\rho_{PA(\beta 10)}_{calculé} = \rho_{PA(\beta 10)}_{mesuré} \cdot 1,1835$$

Cette opération est effectuée pour chaque configuration du dispositif (α_5 , β_5 , α_{10} , β_{10}) lors de chaque séance de mesure, en tenant compte de la pente de la droite de régression.

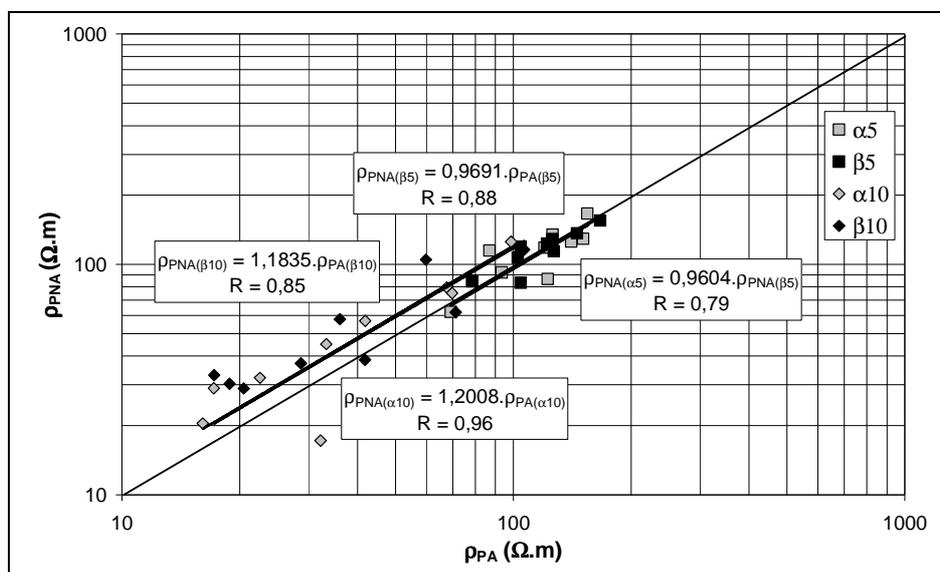


Figure 6.15 Corrélation entre les deux profils

c. Correction des effets de l'épaisseur de la dalle

La dernière correction effectuée porte sur l'influence de l'épaisseur de l'élément ausculté (comme proposé au paragraphe 4.4.2, page 95).

Pour chaque position du dispositif, il est possible d'estimer l'épaisseur de la dalle « z » (Figure 6. 11) et de calculer le rapport « z/a » (avec « a » l'écartement des électrodes). Connaissant ce rapport, nous calculons la valeur du facteur de correction à appliquer (Figure 4. 24). Les facteurs de correction utilisés varient de 0,96 à 0,99 pour Q5, et 0,82 à 0,90 pour Q10, selon la position du dispositif.

d. Conclusion

Toutes les corrections sont faites sur les mesures brutes. Ainsi, nous obtenons une valeur moyenne de résistivité électrique par dimension de dispositif (Q5 et Q10), par zone (« 0j », « 2j », « 6j » et « 21j »), et par séance de mesure (t_0 , t_1 , t_2 et t_3).

Remarque : les moyennes arithmétiques de la résistivité électrique calculées sans tenir compte des diverses corrections sont au maximum 3% différente de la moyenne calculée en

tenant compte de ces corrections. Les coefficients de variations calculés dans les deux cas sont également très proches (variation maximale de 4%).

6.3.4.2. ESTIMATION INSTANTANÉE DES CONDITIONS HYDRIQUES DU MATÉRIAU

La Figure 6. 16 et le Tableau 6. 3 sont les résultats des mesures électriques réalisées à t_0 . Chaque valeur de résistivité électrique est une moyenne sur douze mesures intégrant les deux sens d'injection du courant (α et β) et les deux profils (PA et PNA). Ces valeurs prennent en compte également la correction de l'effet de l'épaisseur de la dalle. Les barres d'erreur représentent \pm un écart-type.

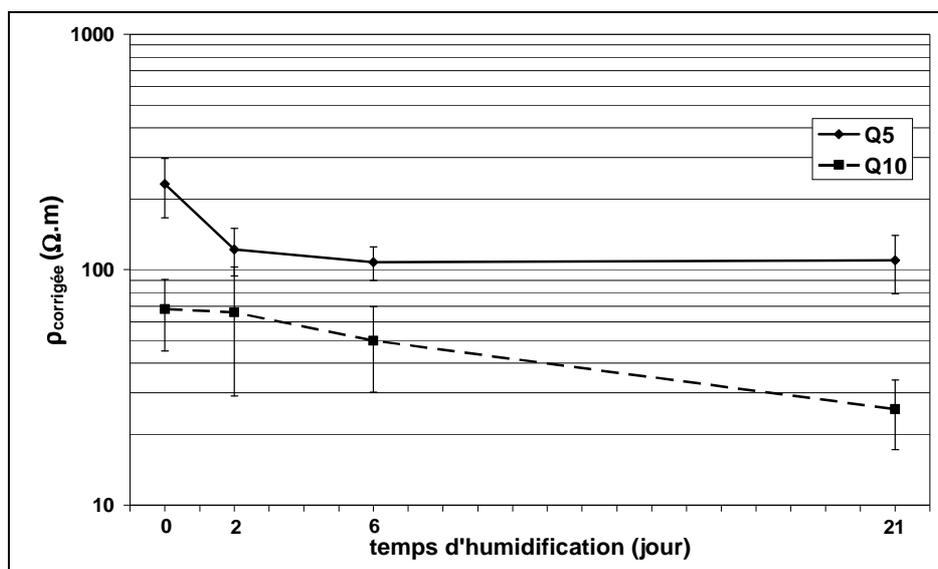


Figure 6. 16 Résultats des mesures électriques à t_0

Tableau 6. 3 Résultats des mesures électriques à t_0

zone	ρ_a corrigée (moyenne sur 12 mesures)			
	Q5		Q10	
	moy (Ω.m)	CV (%)	moy (Ω.m)	CV (%)
0j	231,2	28,2	68,0	33,5
2j	121,8	22,7	65,9	55,9
6j	107,4	16,3	49,9	39,5
21j	109,4	27,7	25,6	32,7

On constate alors que :

- quelle que soit la dimension du dispositif (Q5 ou Q10), la résistivité électrique corrigée diminue lorsque le temps d'humidification augmente, lui-même vraisemblablement corrélé à l'épaisseur du front d'humidification. Ces résultats indiquent que la résistivité électrique est sensible à l'épaisseur humide (paragraphe 4.3.1.1) ;

- dans tous les cas, les valeurs obtenues avec le dispositif Q5 sont supérieures à celles obtenues avec le dispositif Q10. La dimension des deux dispositifs est à mettre en relation avec la profondeur d'investigation. On met ici en évidence la présence d'un gradient de propriétés électriques dans la dalle. Deux hypothèses sont proposées : une variation d'humidité dans l'épaisseur (le matériau semble plus humide en profondeur qu'en surface) et une influence de la présence des armatures (Q10 plus sensible que Q5) ;
- concernant le dispositif Q5, les variations de résistivité entre les zones « 2j », « 6j » et « 21j » sont faibles voire non significatives (en tenant compte de la variabilité des mesures représentées par les coefficients de variation). Or, ces trois zones ont vraisemblablement des épaisseurs humides différentes qui n'influencent pas (ou peu) la valeur de résistivité. On peut penser qu'en terme de teneur en eau, les volumes investigués sont identiques dans les trois cas ;
- pour le dispositif Q10, Le volume d'investigation est plus important que pour les mesures en Q5. On peut considérer que l'épaisseur de la zone humide augmente avec le temps d'humidification. On observe une diminution de la résistivité électrique apparente avec le temps d'humidification, vraisemblablement due à une augmentation de la teneur en eau.

La Figure 6. 17 et le Tableau 6. 4 sont les résultats des mesures réalisées à t_1 , soit après une heure de séchage par évaporation. La Figure 6. 18 et le Tableau 6. 5 représentent les résultats des mesures réalisées à t_2 (deux heures de séchage). La Figure 6. 19 et le Tableau 6. 6 sont les résultats de la dernière séance de mesure à t_3 (trois heures de séchage). L'interprétation de ces résultats est réalisée dans le paragraphe suivant, sur l'étude de la cinétique de séchage.

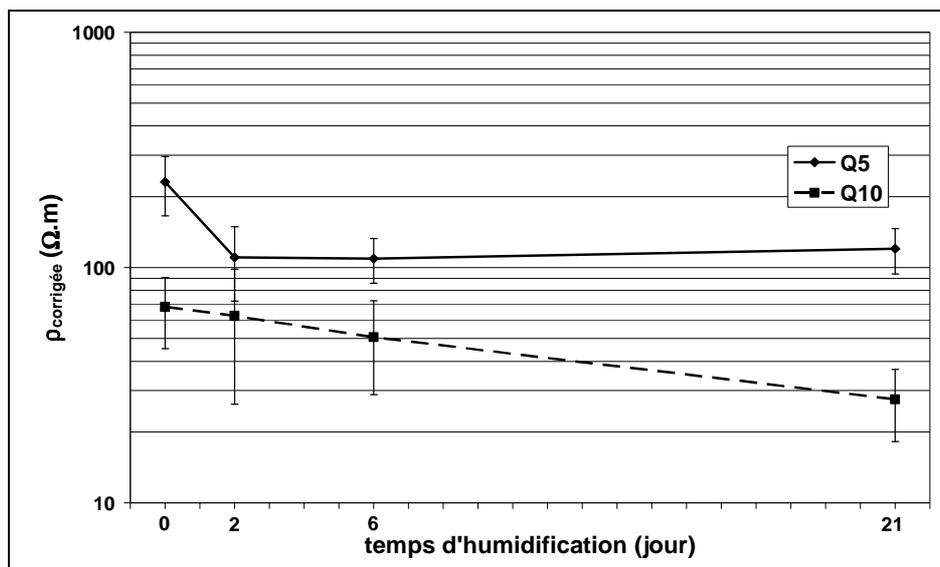


Figure 6. 17 Résultats des mesures électriques réalisées à t_1

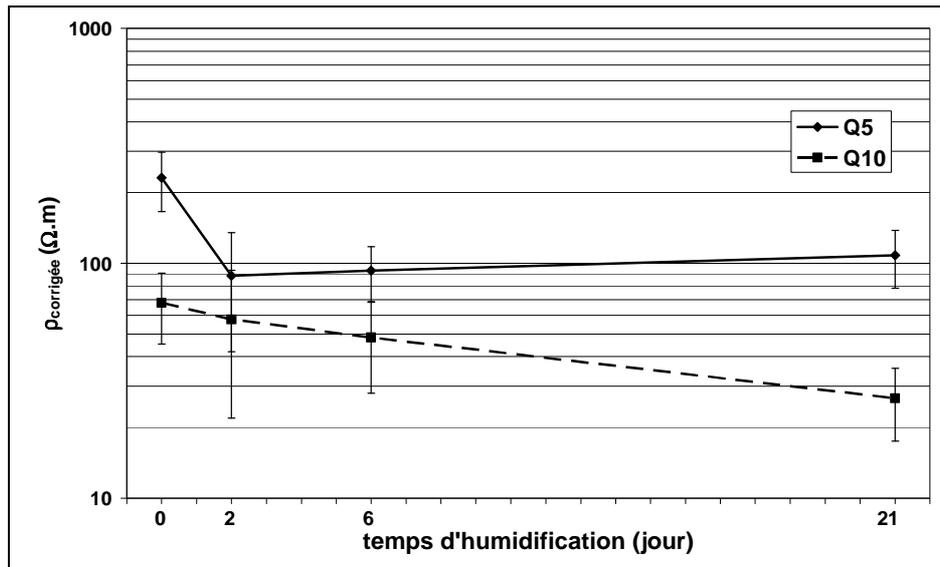


Figure 6. 18 Résultats des mesures électriques réalisées à t_2

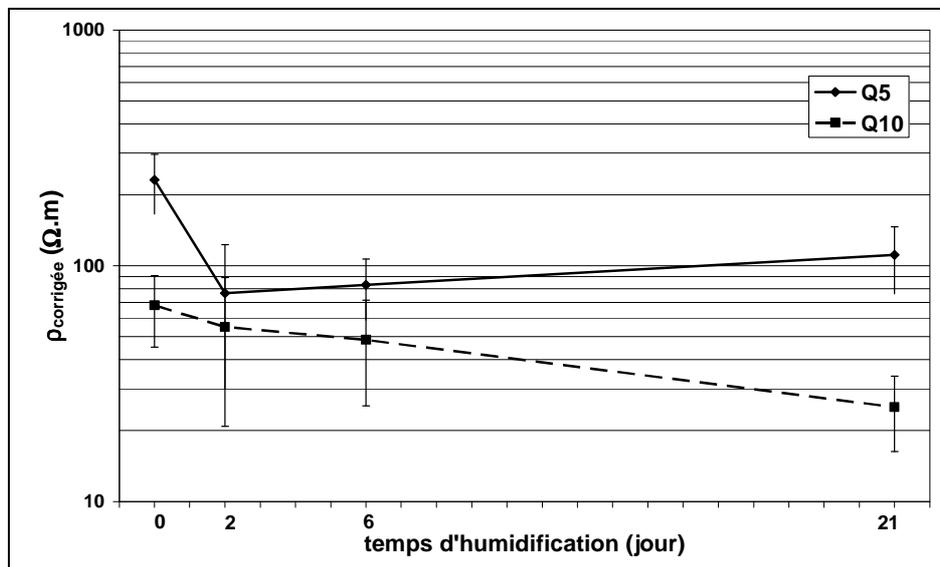


Figure 6. 19 Résultats des mesures électriques réalisées à t_3

Tableau 6. 4 Résultats des mesures électriques à t_1

zone	ρ_a corrigée (moyenne sur 12 mesures)			
	Q5		Q10	
	moy ($\Omega.m$)	CV (%)	moy ($\Omega.m$)	CV (%)
0j	231,2	28,2	68,0	33,5
2j	110,7	34,9	62,4	57,9
6j	109,4	21,6	50,5	42,9
21j	120,3	21,9	27,5	33,8

Tableau 6.5 Résultats des mesures électriques à t_2

zone	ρ_a corrigée (moyenne sur 12 mesures)			
	Q5		Q10	
	moy ($\Omega.m$)	CV (%)	moy ($\Omega.m$)	CV (%)
0j	231,2	28,2	68,0	33,5
2j	88,5	52,5	57,7	62,0
6j	93,0	26,5	48,3	42,0
21j	108,0	27,6	26,6	34,2

Tableau 6.6 Résultats des mesures électriques à t_3

zone	ρ_a corrigée (moyenne sur 12 mesures)			
	Q5		Q10	
	moy ($\Omega.m$)	CV (%)	moy ($\Omega.m$)	CV (%)
0j	231,2	28,2	68,0	33,5
2j	76,6	60,5	55,0	62,1
6j	82,8	29,0	48,4	47,5
21j	111,2	31,5	25,1	35,3

A travers les résultats des mesures réalisées à t_1 , t_2 et t_3 , on peut mettre en évidence :

- dans tous les cas, sur une même zone, les valeurs obtenues avec le dispositif Q5 sont supérieures à celles obtenues avec le dispositif Q10 ;
- pour le dispositif Q10, la résistivité électrique corrigée diminue lorsque le temps d'humidification augmente, même lorsque la surface du béton commence à sécher.

6.3.4.3. ÉTUDE DE LA CINÉTIQUE DE SÉCHAGE

a. Hypothèse de travail

En première approche, la cinétique de séchage est schématisée sur la Figure 6. 20.

Au temps t_0 , nous considérons qu'il existe une épaisseur saturée en eau ($S_r = 100\%$) allant de la surface à une profondeur $z_h(t_0)$. Cette épaisseur est vraisemblablement d'autant plus grande que le temps d'humidification est long. Cette couche est limitée en profondeur par un front d'humidification $f_h(t_0)$.

Après un temps t de séchage, la profondeur du front d'humidification $z_h(t)$ varie. En surface, il se crée une mince couche humide non saturée allant jusqu'à une profondeur $z_s(t)$. Ainsi, il existe dans le matériau, une succession de trois couches ayant des degrés de saturation différents. Ces couches sont délimitées par un front sec proche de la surface $f_s(t)$ et un front d'humidification $f_h(t)$. Avec le temps de séchage, nous pouvons penser que l'épaisseur du front de séchage $z_s(t)$ augmente.

Dans cette hypothèse, nous considérons des couches parfaitement homogènes délimitées par des fronts nets. En réalité, il existe des gradients d'humidité qui varient avec la profondeur.

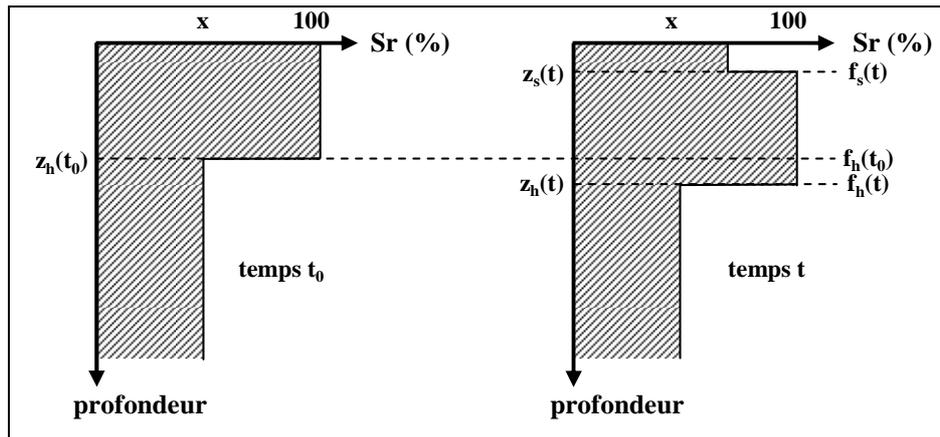


Figure 6.20 Évolution du front d'humidification (f_h) et du front de séchage (f_s)

b. Résultats et interprétation

Les résultats sont présentés sur la Figure 6.21 pour la zone « 2j ». Ils représentent l'évolution au cours du séchage de la résistivité électrique corrigée, en distinguant les deux dimensions de dispositif (Q5 et Q10). Les barres d'erreur représentent \pm un écart-type.

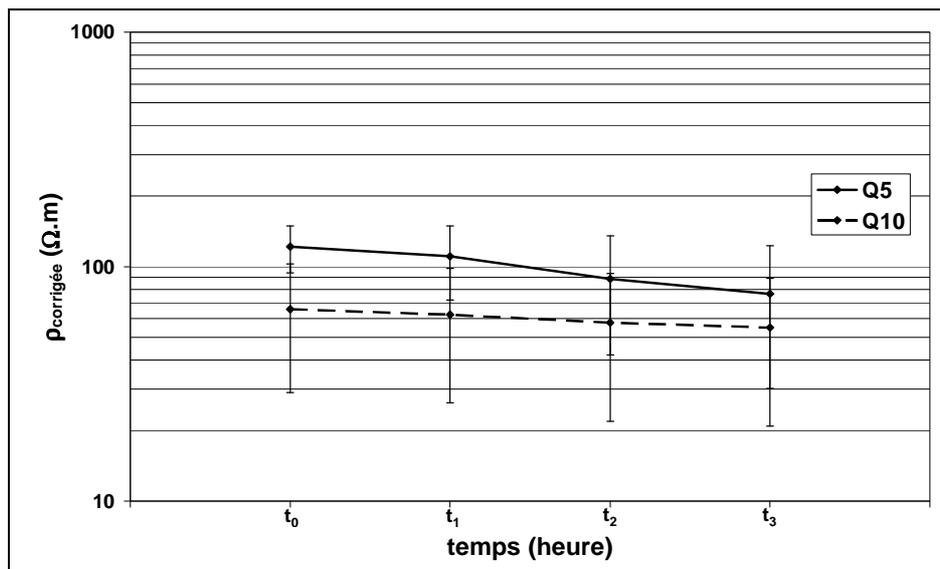


Figure 6.21 Cinétique de séchage sur la zone « 2j »

Pour la zone humidifiée pendant « 2j », la résistivité électrique diminue au cours du temps quel que soit le dispositif de mesure utilisé (Q5 ou Q10) : $\rho(t_0) > \rho(t_1) > \rho(t_2) > \rho(t_3)$. Ces résultats sont à relativiser compte tenu de la forte variabilité des mesures. Néanmoins, la tendance observée traduit vraisemblablement l'évolution de la profondeur du front d'humidification d'une part et d'un front de séchage d'autre part. Au cours du temps, même après une période d'humidification, l'humidité continue de progresser dans le béton sous l'effet de la gravité, de la diffusion et des forces capillaires. Ainsi, le volume d'investigation augmente. Comme la résistivité apparente diminue, l'influence de l'épaisseur saturée semble avoir une influence plus grande que celle de l'épaisseur humide en surface.

La notion de profondeur d'investigation est schématisée sur la Figure 6. 22. Il est important de bien comprendre que la profondeur d'investigation dépend de l'écartement des électrodes, mais également de la succession des couches dans le matériau. Ainsi, s'il existe une couche résistante en surface, les lignes de courant vont plus en profondeur afin d'atteindre une couche plus conductrice. Inversement, en présence d'une couche conductrice en surface, les lignes de courant se répartissent majoritairement dans l'épaisseur de cette couche, sans aller très profondément. Ainsi, entre un matériau sain et un matériau avec une couche résistante ou conductrice en surface, les volumes investigués sont différents pour un même écartement des électrodes.

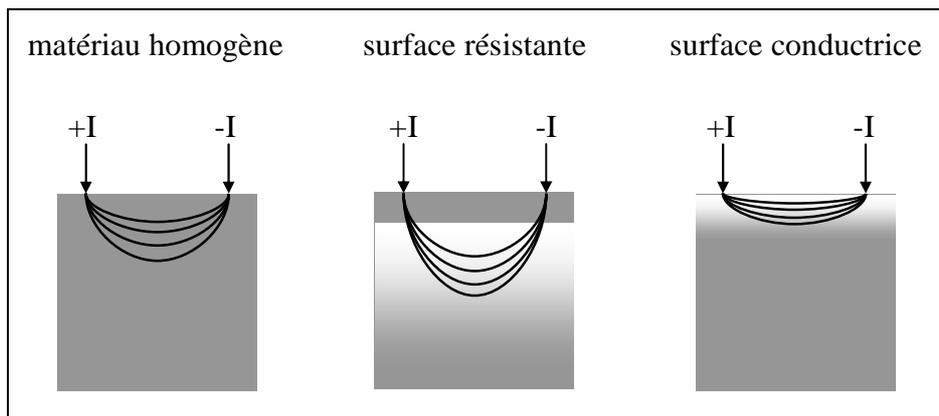


Figure 6. 22 Notion de profondeur d'investigation

Pour la zone « 6j », les résultats sont présentés sur la Figure 6. 23.

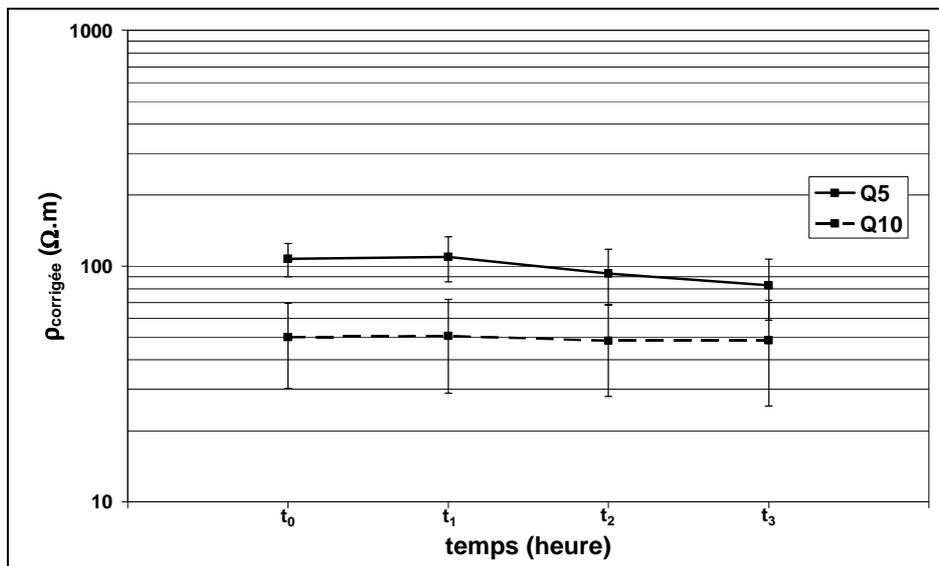


Figure 6. 23 Cinétique de séchage sur la zone « 6j »

Pour la zone « 6j », le phénomène mis en évidence ici est le même que pour la zone « 2j » (Figure 6. 21), même si les résultats sont à relativiser compte tenu de la forte variabilité des

mesures. La résistivité électrique diminue au cours du séchage quel que soit le dispositif de mesure utilisé (Q5 ou Q10). Cette baisse est cependant très peu prononcée pour Q10.

Pour la zone « 21j », où le béton est saturé, les résultats sont présentés sur la Figure 6. 24.

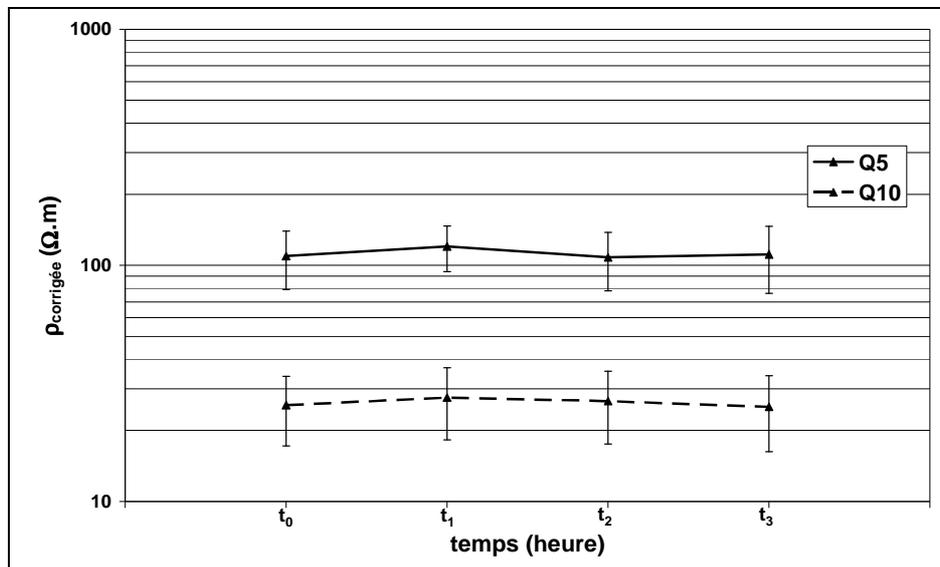


Figure 6. 24 Cinétique de séchage sur la zone « 21j »

Concernant les résultats de la zone «21j», la résistivité électrique n'évolue pas significativement au cours du temps, si l'on tient compte de la variabilité des mesures. Cela traduit vraisemblablement une quasi-immobilité du front de séchage d'une part et du front d'humidification d'autre part durant les trois heures de séchage.

c. Discussion

Plusieurs hypothèses peuvent expliquer la diminution de la résistivité électrique au cours du temps :

- les variations de conditions environnementales : les mesures sont effectuées dans un endroit clos où la température ambiante et l'humidité relative sont contrôlées. Ces deux paramètres n'évoluent pas sur la période de mesure considérée ;
- les variations de conditions de mesure : toutes les mesures sont réalisées avec le même protocole de façon à ne pas introduire de biais ;
- l'évolution d'un front humide : l'augmentation de l'épaisseur de la couche humide en surface entraîne une diminution de la résistivité électrique (voir paragraphe 4.3.1.3, page 84). Au-delà d'une certaine épaisseur humide (qui dépend du contraste de résistivité entre le béton saturé et le béton humide), la mesure n'est plus influencée par la profondeur du front humide. La propagation d'un liquide dans la matrice cimentaire est régie par les lois de diffusion. Ces équations expriment la profondeur atteinte par le liquide en fonction de la racine carrée du temps (McCarter *et al.* 1996) :

$$d = d_0 + S_a \cdot \sqrt{t}$$

d = la profondeur atteinte par le front (en mm),

- d_0 = la profondeur initiale (en mm),
- S_d = le coefficient d'absorption (en $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1/2}$),
- t = le temps (en h).

Pour interpréter les phénomènes mis en évidence lors de cette expérience, nous reprenons le modèle proposé en première approche par Lataste (2002) pour expliquer le phénomène de dérive de résistivité électrique liée à l'humidification de la surface d'un parement (Figure 6. 25) :

- l'humidification initiale du parement augmente la teneur en eau volumique dans la matrice. Cette augmentation est d'autant plus importante que le temps d'humidification est long. Cela se traduit par une diminution de la résistivité électrique avec le temps d'humidification. Au-delà d'une certaine épaisseur humide, la mesure de résistivité électrique n'est plus sensible à cette augmentation (voir paragraphe 4.3.1.3, page 84) ;
- au cours du séchage, l'humidité continue de progresser dans le béton et l'épaisseur de la zone humide augmente. Le volume d'investigation augmente et entraîne ainsi une baisse de la résistivité électrique apparente ;
- quelques heures plus tard, la surface commence à sécher visiblement. Le front d'humidification continue sa progression. Les résistivités électriques apparentes sont toujours décroissantes. Cela semble indiquer que la progression du front d'humidification est le phénomène prépondérant par rapport à la progression du front de séchage.

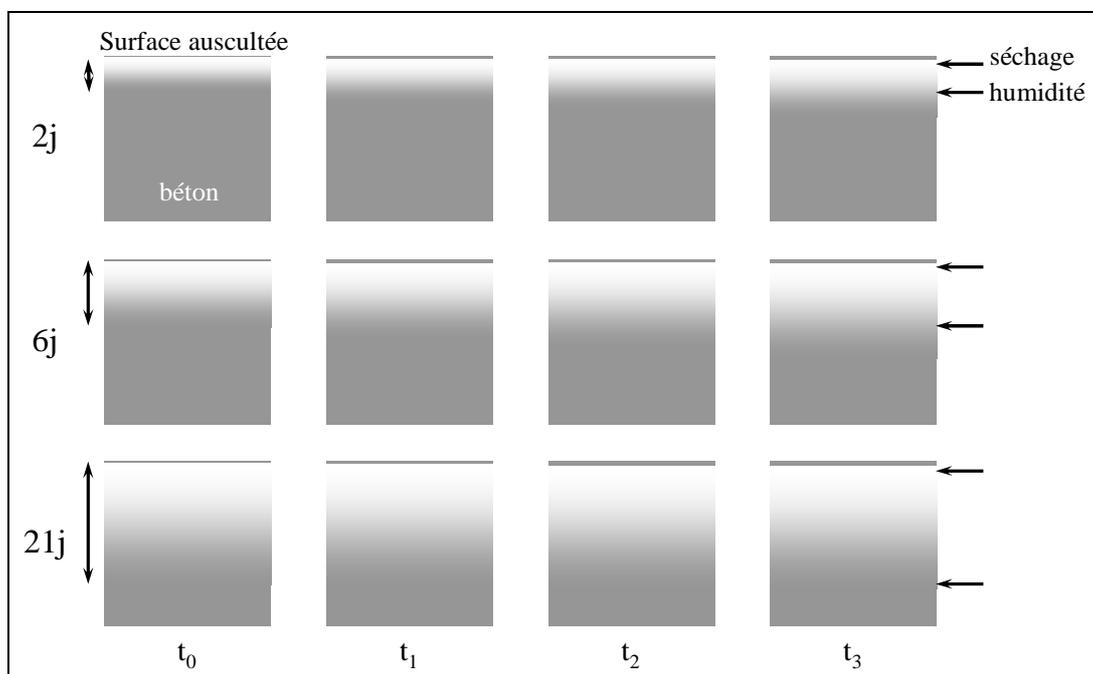


Figure 6. 25 Schéma de propagation du front d'humidification et du front de séchage dans le matériau, selon l'hypothèse proposée

6.3.5. RÉSULTATS ET ANALYSE DES MESURES PAR THERMOGRAPHIE INFRAROUGE PASSIVE

6.3.5.1. PROTOCOLE DE MESURE

L'auscultation a été effectuée à l'aide d'une caméra infrarouge (ThermaCam PM 575). La valeur du coefficient d'émissivité du béton utilisée pour les mesures est $\varepsilon = 0,94$. Les images thermiques sont prises à l'aplomb des dalles, à une distance d'environ 2 m. Au cours de chaque séance de mesure (t_0 , t_1 , t_2 et t_3), une image thermique de chaque zone est prise.

Les mesures sont effectuées dans un endroit clos où la température ambiante et l'humidité relative sont contrôlées.

6.3.5.2. ÉTUDE DE LA CINÉTIQUE DE SÉCHAGE

a. Traitement des données

Le traitement des images thermiques permet de constater que la température à la surface de la dalle est uniforme sur chaque zone humidifiée. Aucune anomalie thermique ni gradient ne sont visibles (Figure 6. 26). Ainsi, il est possible de calculer une température moyenne de la surface du béton pour chaque séance de mesure (t_0 , t_1 , t_2 et t_3).

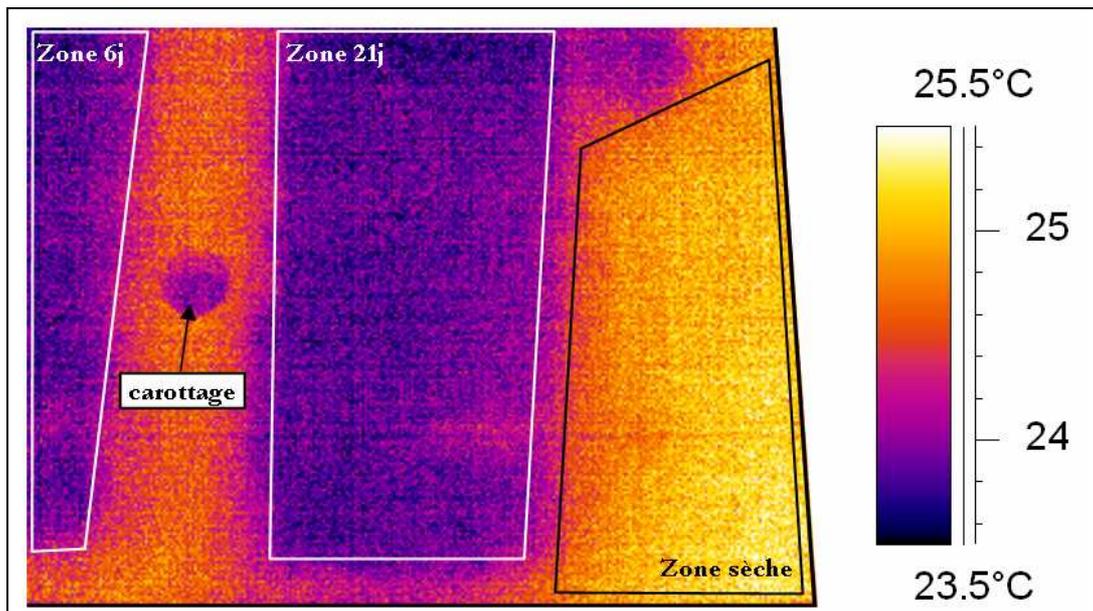


Figure 6. 26 Image thermique prise au temps t_2 d'une partie de la dalle

b. Résultats et interprétation

La Figure 6. 27 représente l'évolution de la température moyenne de la surface du béton pour chaque zone humidifiée au cours du séchage. Les barres d'erreur représentent \pm un écart-type. A partir de ces moyennes, il est possible de tracer une droite de régression afin d'obtenir une tendance sur le comportement thermique (l'inertie thermique) des différentes zones, à travers la pente de la droite.

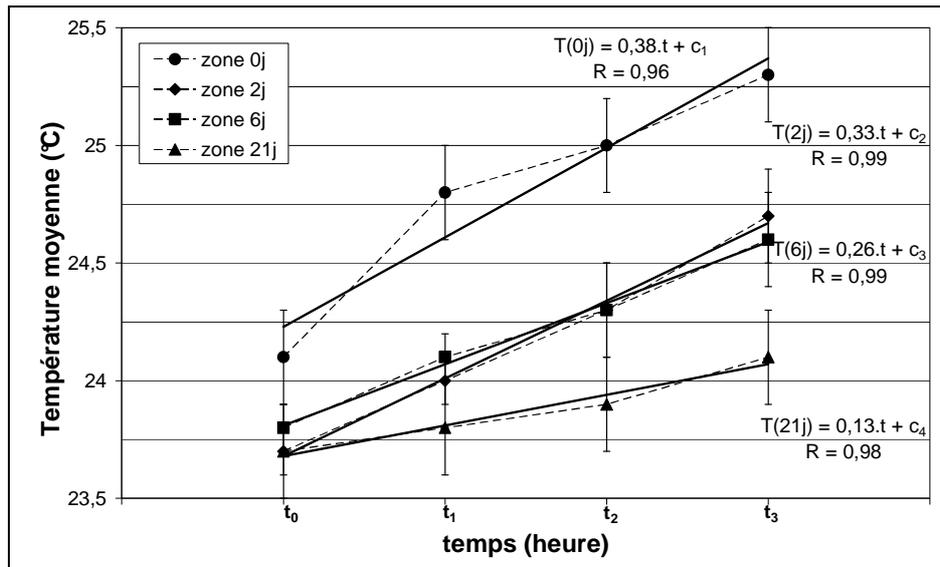


Figure 6.27 Évolution de la température de surface des différentes zones humidifiées

Nous pouvons constater que :

- la courbe de l'évolution de la zone « 0j » est très distincte des trois autres courbes qui concernent les zones humidifiées « 2j », « 6j » et « 21j » ;
- à t_0 , la température à la surface de la dalle pour les trois zones humidifiées est identique, autour de $23,7^\circ\text{C}$, alors qu'au même instant, la température de la zone « 0j » est de $24,2^\circ\text{C}$. La température plus froide à la surface des trois zones humidifiées est vraisemblablement due à la présence d'eau dans le matériau. A la surface de la zone « 0j », la température s'équilibre avec la température de l'air ambiant, plus chaud que l'eau contenue dans les bacs avant le début de l'expérience ;
- quantitativement, les pentes de la droite de régression permettent de classer les différentes zones : zone « 0j » > « 2j » > « 6j » > « 21j » (selon l'ordre croissant des pentes).

c. Discussion

La pente de la droite de régression permet de hiérarchiser les différentes zones : plus le béton est humidifié longtemps, plus l'évaporation à la surface du matériau est importante et plus la température de cette surface est faible. Cela se traduit par une pente plus faible de l'évolution de la température au cours du temps. En d'autres termes, plus la teneur en eau est élevée, plus la diffusivité thermique est faible et plus l'inertie thermique est grande.

Le temps d'humidification est à relié à l'épaisseur de la zone saturée, et la pente de la droite de régression à l'inertie thermique. En première approche, cette tendance est représentée sur la Figure 6. 28.

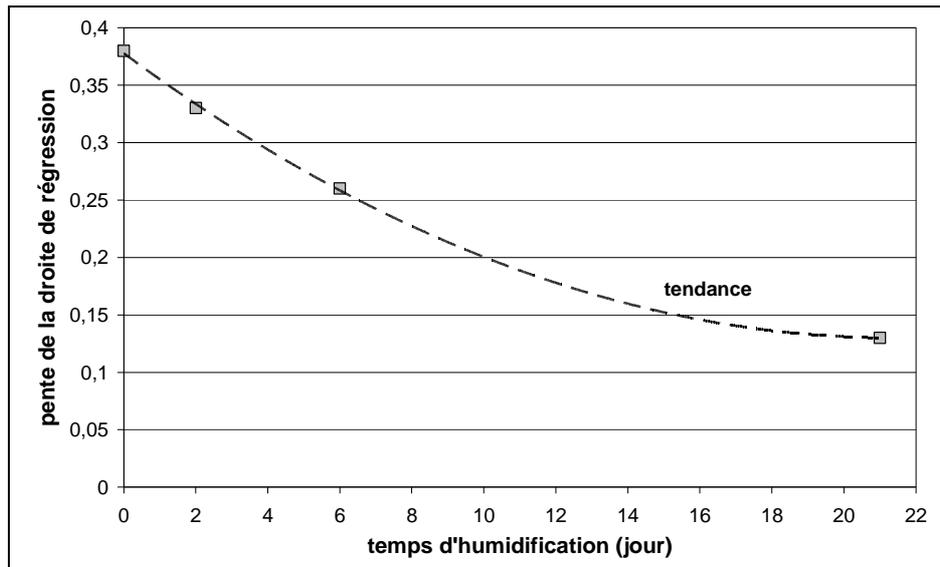


Figure 6. 28 Relation entre la pente de la droite de régression de la température et le temps d'humidification

Cette expérience met en évidence la sensibilité de la mesure par thermographie infrarouge passive à la teneur en eau volumique du matériau. Sur la base de ces travaux, il est possible d'envisager que la température de surface d'un parement puisse être un indicateur des conditions hydriques du matériau. En première approche, ces résultats sont satisfaisants et permettent d'envisager la poursuite des travaux dans ce sens.

6.3.6. CONCLUSION

Les propriétés électriques (la résistivité) et thermiques (l'inertie thermique) du béton sont fonction de la teneur en eau volumique.

En électrique, l'étude par deux dispositifs avec deux profondeurs d'investigation a permis de proposer un schéma de propagation du front d'humidification et du front de séchage dans le matériau.

Les résultats de l'étude des images thermiques prises au cours du temps met en évidence la sensibilité de la thermographie infrarouge à la cinétique de séchage. Selon le temps d'humidification et donc l'épaisseur de la zone saturée en surface, l'inertie thermique du matériau est différente.

6.4 ÉVALUATION DU PROFIL HYDRIQUE DANS UN OUVRAGE RÉEL

6.4.1. INTRODUCTION

Ce paragraphe présente les résultats de la campagne de mesures menée dans le cadre du « Projet de recherche sur la pathologie du béton de peau par méthodes non destructives », sur le conduit préfabriqué (OH 1483) sous l'autoroute A64 (La Pyrénéenne), section Tarbes Est-Lanespède. Cet ouvrage est géré par la Direction Régionale d'Exploitation de Biarritz, District de Saint-Gaudens.

Cinq méthodes ont été employées sur site par l'ensemble des partenaires du projet : l'acoustique, le radar, la capacimétrie, la résistivité électrique et la thermographie infrarouge passive. Seuls les résultats des trois dernières méthodes sont présentés ici. Les résultats complets de cette campagne d'auscultation sont développés dans un rapport (Naar *et al.* 2004).

6.4.2. PRÉSENTATION DE L'OUVRAGE

6.4.2.1. DESCRIPTIF DU CONDUIT

Construit en 1987 par la société SNC Matière, l'ouvrage est un conduit en béton de 165 m de long, composé de 55 tronçons préfabriqués de 3 m de long (Figure 6. 29). Chaque tronçon est armé et présente la même géométrie ovoïde. La hauteur est de 1,72 m au niveau de la clé de voûte (Figure 6. 30). L'épaisseur du béton est de l'ordre de 20 cm.

Ce conduit permet le passage d'un petit ruisseau, l'Ousse, qui coule dans le sens Nord-Est Sud-Ouest. Cette direction d'écoulement permet de définir un côté amont et aval de l'ouvrage, ainsi qu'un côté droit et un côté gauche par rapport à l'axe longitudinal du conduit et au sens d'écoulement du ruisseau.

Les défauts de surface recensés par la société GETEC (en charge de la gestion de l'ouvrage) sont essentiellement une densité de fissuration importante en clé de voûte avec formation d'éclats par endroit et présence de calcite dans les fissures (Figure 6. 29). Quelques venues d'eau sont également identifiées, surtout sur les parois latérales.

La classe IQOA (Image Qualité des Ouvrages d'Art) de l'ouvrage est 2E, c'est-à-dire que l'ouvrage nécessite « un entretien spécialisé urgent pour prévenir des désordres de la structure ». Une partie plus endommagée de l'ouvrage a été consolidée par projection de béton au niveau des tronçons 21, 22 et 23.



Figure 6. 29 Photographie de l'entrée Nord-Ouest du conduit (à gauche) et de la surface de l'ouvrage présentant de nombreuses fissures remplies de calcite (à droite)

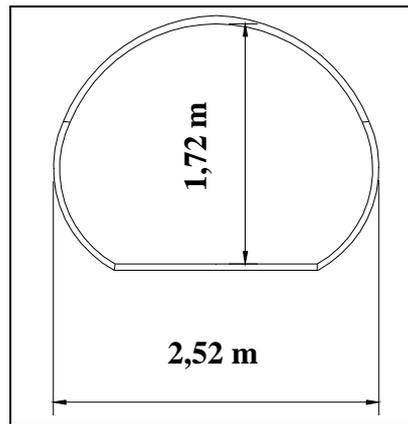


Figure 6. 30 Schéma de l'ouvrage (coupe transversale)

6.4.2.2. RÉALISATION DES MESURES

Des mesures de résistivité électrique et de thermographie infrarouge passive sont réalisées. La méthode capacitive (matériel LPC, 1^{ière} génération) est mise en œuvre par Xavier Derobert (LCPC-Nantes).

Il est important de remarquer que les mesures capacitives ont été réalisées en été 2004 (juin), alors que les mesures électriques et par thermographie infrarouge passive ont été réalisées en automne 2004 (septembre). Nous verrons dans l'exploitation des résultats que ces conditions environnementales vraisemblablement différentes (température et humidité) jouent sans doute un rôle important dans l'interprétation des résultats.

L'investigation est réalisée en clé de voûte sur 18 tronçons sélectionnés (tronçons proposés : 1, 3, 6, 9, 13, 16, 19, 22, 25, 28, 31, 34, 37, 41, 44, 48, 52 et 55). Le Tableau 6. 7 donne les coordonnées du début et de la fin du tronçon le long du linéaire, en commençant à l'entrée SO.

Tableau 6. 7 Coordonnées des éléments auscultés

Tronçon	Abscisse début (m)	Abscisse fin (m)
1	0	3
3	6	9
6	18	21
9	27	30
13	36	39
16	45	48
19	54	57
22	63	66
25	72	75
28	81	84
31	90	93
34	99	102
37	108	111
41	120	123
44	129	132
48	141	144
52	153	156
55	162	165

Il s'agit de comparer les résultats des différentes techniques afin de déterminer si les méthodes permettent de hiérarchiser les tronçons de la même manière vis-à-vis d'un paramètre tel que l'endommagement ou la teneur en eau du matériau.

6.4.2.3. CAHIER DES CHARGES PROPOSÉ PAR LE MAÎTRE D'OUVRAGE

En mai 2002, la société GETEC, chargée de la surveillance de cet ouvrage, a recensé différentes pathologies (Figure 6. 31) : fissures longitudinales, présence de calcite, fissures obliques...

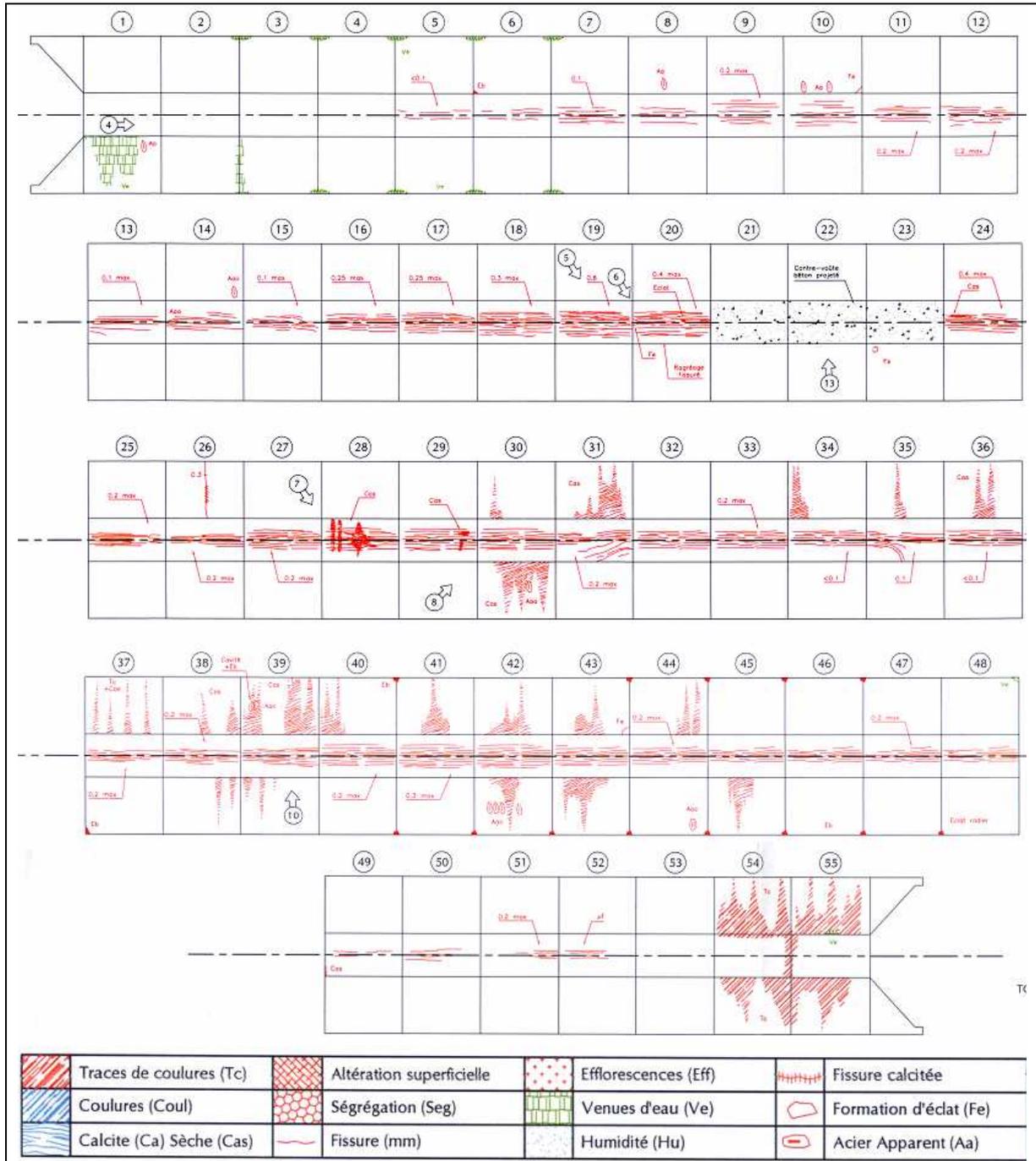


Figure 6. 31 Cartographie des pathologies recensées par la Société GETEC lors de l'inspection visuelle en mai 2002

A partir de ce schéma d'inspection visuelle, il est possible d'évaluer le nombre de fissures et la longueur de chacune d'entre elles. Comme en mécanique des roches (Gervais *et al.* 1993), j'ai cherché à quantifier la fracturation. Je me suis intéressé à la longueur totale de fissures par tronçon. La Figure 6. 32 représente la longueur totale de fissures le long de l'ouvrage mesurée sur le premier tiers et le dernier tiers des tronçons auscultés. Ainsi, deux valeurs sont données par tronçon.

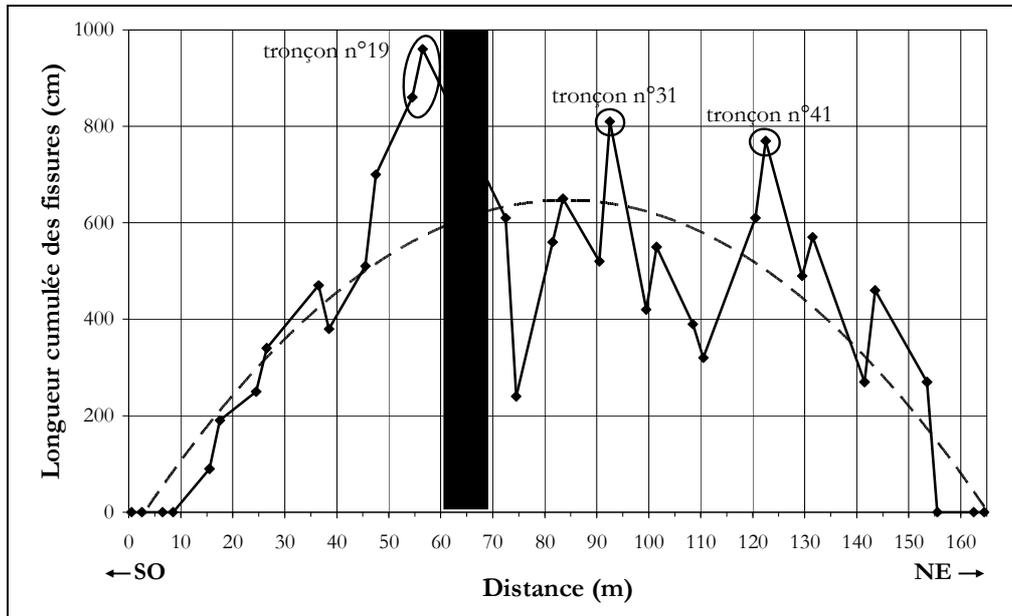


Figure 6. 32 Profil de la longueur totale de fissure visible en clé de voûte

Sur ce profil, les tronçons 19 (abscisse 55,5 m), 31 (abscisse 91,5 m) et 41 (abscisse 121,5 m) apparaissent comme ayant une longueur totale de fissure visible en clé de voûte importante : fissuration longitudinale importante, traces de coulure, présence de calcite humide dans les fissures... Sur les tronçons situés aux deux extrémités du conduit (tronçons 1, 3 et 55) aucun défaut n'est relevé.

6.4.3. AUSCULTATION PAR THERMOGRAPHIE INFRAROUGE PASSIVE

6.4.3.1. MISE EN PLACE

Les mesures par thermographie infrarouge sont effectuées sur les tronçons sélectionnés à l'aide de la caméra infrarouge (ThermaCAM® SC2000). La caméra infrarouge est fixée à un chariot de mesure permettant de réaliser les acquisitions de données rapidement et de garder une distance constante entre le dispositif de mesure et la scène thermique (Figure 6. 33).

Sur chaque tronçon, nous avons fait une mesure à chaque extrémité des tronçons sélectionnés. Au total 36 images sont acquises sur l'ensemble du conduit. La zone de mesure concerne la clé de voûte. La durée de cette auscultation est d'environ 1h pour deux personnes.



Figure 6. 33 Photographie du dispositif infrarouge

La distance entre la caméra et la zone auscultée est de 1,2 m. Par conséquent, compte tenu de l'ouverture de l'objectif de la caméra infrarouge ($18^\circ \times 22^\circ$), chaque image thermique représente une superficie d'environ $0,18 \text{ m}^2$ ($0,38 \times 0,46 \text{ m}$).

6.4.3.2. RÉSULTATS

La température moyenne de la surface du conduit et sa variabilité (l'écart-type) sont calculées à partir de chaque image thermique dont on a extrait les artefacts (Figure 6. 34).

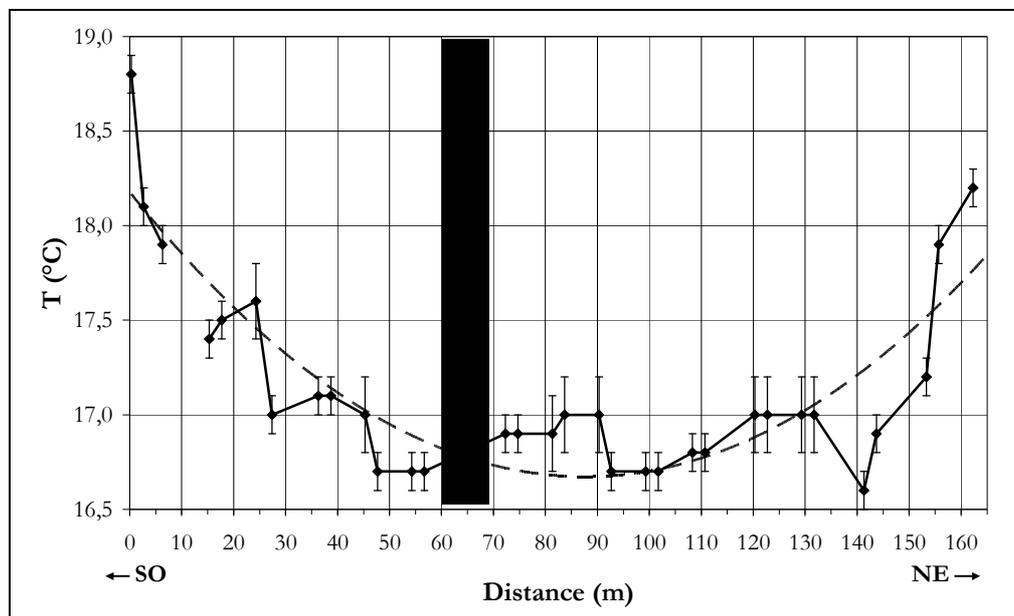


Figure 6. 34 Profil de la température moyenne

Les valeurs moyennes de température à la surface du béton dans le conduit varient très peu : de 16,6 à 18,8°C. De plus, le profil de température le long de l'ouvrage n'est pas symétrique : la température du parement de l'extrémité SO est plus élevée que celle de l'extrémité

NE. Au vu des températures à la surface du conduit, nous pouvons découper l'ouvrage en deux parties, à savoir les deux extrémités et la partie centrale :

- entre les tronçons 9 et 50 (respectivement 25 et 155 m), la température moyenne de la surface du béton est inférieure à 17,2°C. Dans cette partie du conduit, la température varie peu et une forte condensation sur toute la surface est visible en clé de voûte ;
- aux deux extrémités du conduit, avant le tronçon 9 (24 m) et après le 50 (150 m) la température est plus chaude et supérieure à 17,2°C. La température du parement aux deux extrémités du conduit est vraisemblablement influencée par les conditions environnementales de l'air extérieur.

6.4.4. AUSCULTATION PAR MESURES DE RÉSISTIVITÉ ÉLECTRIQUE

6.4.4.1. MISE EN PLACE

Les mesures électriques sont effectuées sur les 18 tronçons sélectionnés. Ces tronçons font l'objet de mesures avec le même protocole : compte tenu de l'humidité importante des parois à l'intérieur du conduit, aucune phase d'humidification n'est nécessaire. La seule préparation des surfaces a consisté à essuyer préalablement les gouttelettes présentes sur les parois (Figure 6. 29).

Sur chaque tronçon, des mesures du côté amont et du côté aval sont réalisées. Ces mesures sont effectuées au droit d'une armature transversale repérée au préalable par le pachomètre (configuration identique aux mesures effectuées en capacitif), et entre deux armatures longitudinales. Cette configuration minimise ainsi l'influence des armatures.

Pour chaque côté, des mesures en clé de voûte sont retenues. Pour chaque zone, trois points de mesure, espacés de 1 cm, sont positionnés le long d'une section transversale. Le dispositif quadripôle carré de 5 cm de côté est utilisé en considérant une injection du courant perpendiculaire à l'armature transversale.

6.4.4.2. RÉSULTATS

La Figure 6. 35 représente le profil de résistivité électrique apparente le long du conduit (avec \pm un écart-type). Chaque valeur de résistivité est une moyenne des trois mesures réalisées.

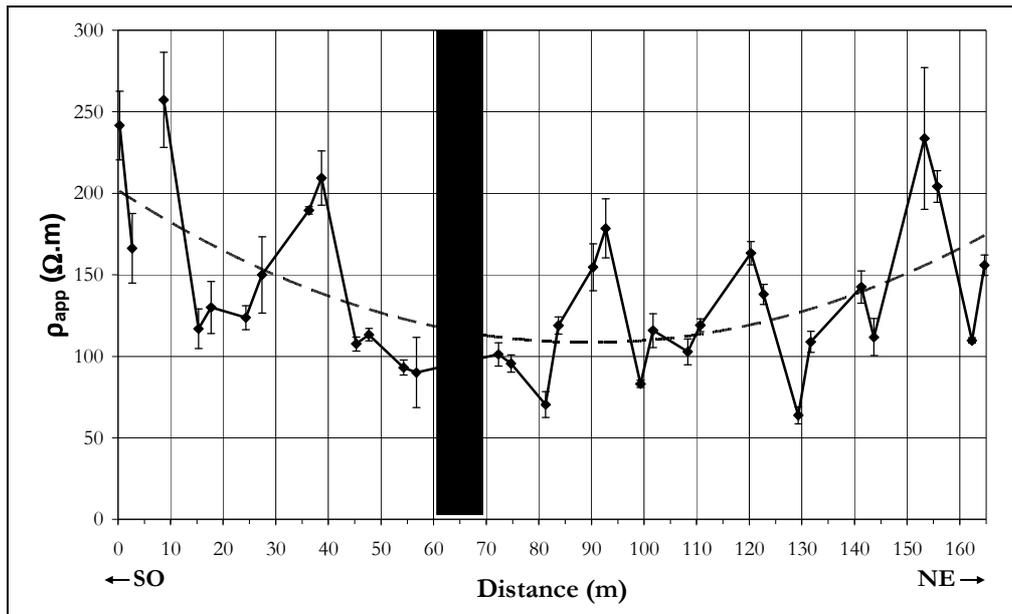


Figure 6.35 Profil électrique moyen

Les moyennes de résistivité électrique varient dans une gamme assez large : de 63,8 $\Omega.m$ (pour le tronçon 44) à 377,7 $\Omega.m$ (pour le tronçon 3). De plus, le profil de résistivité le long de l'ouvrage n'est pas symétrique.

6.4.5. AUSCULTATION PAR METHODE CAPACITIVE

6.4.5.1. MISE EN PLACE

Les mesures capacitives (réalisées par Xavier Derobert, LCPC-Nantes) sont effectuées sur 17 des 18 tronçons sélectionnés. Le tronçon 22 ayant été rénové par du béton projeté, sa surface est trop rugueuse pour pouvoir assurer un bon couplage matériau/appareil de mesure et ainsi réaliser des mesures.

Les tronçons font l'objet de mesures avec un même protocole. La dimension des électrodes utilisées est de 10 x 70 mm². Sur chaque tronçon, les mesures sont réalisées sur la partie amont et sur la partie aval, en clé de voûte, comme pour les deux autres méthodes.

Il est important de souligner que la méthode n'est pas sensible à la présence d'armatures métalliques dans le béton.

6.4.5.2. RESULTATS

Les résultats de l'auscultation par méthode capacitive sont représentés sous forme d'un profil de la fréquence (en réalité une différence de fréquence avec une mesure référence dans l'air) le long du conduit (Figure 6. 36). Chaque point ne représente qu'une seule mesure.

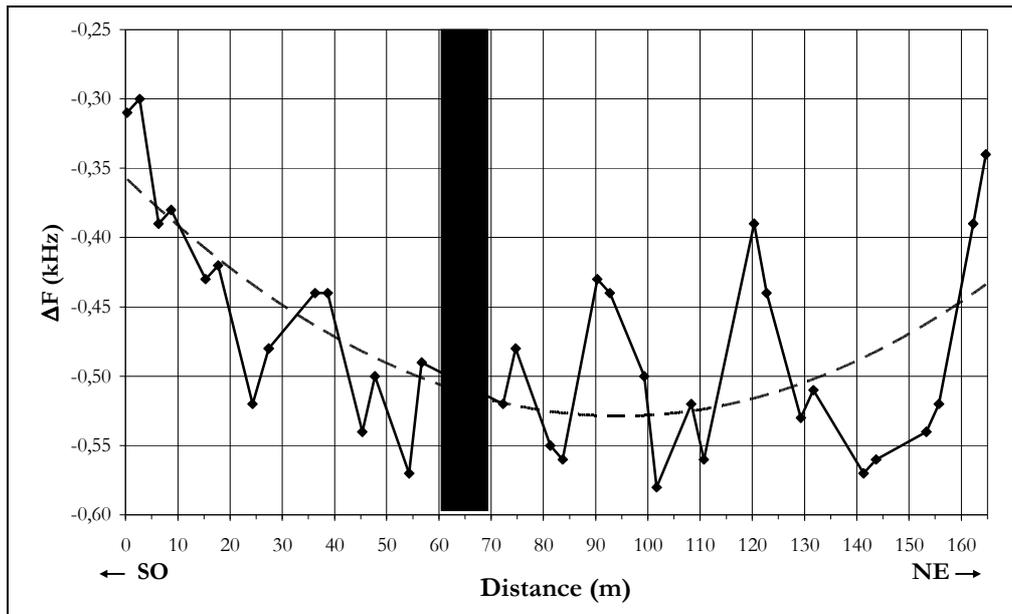


Figure 6.36 Résultats de l'auscultation par méthode capacitive

Comme pour les résultats des mesures précédentes (thermographie infrarouge et résistivité électrique), le profil n'est pas symétrique.

6.4.6. COUPLAGE DES MÉTHODES

Afin d'interpréter les variations mises en évidence sur les trois séries de mesures, nous avons cherché les éventuelles corrélations entre les différentes variables.

Ce travail s'effectue par l'étude des données indépendamment de leur position dans le conduit. La série statistique étudiée est composée de trois variables, notées T pour les valeurs de température, C pour les mesures capacitives et R pour les mesures de résistivité électrique. Les variables sont d'abord comparées deux à deux. Puis une Analyse en Composantes Principales (ACP) est réalisée.

6.4.6.1. VARIABLES COMPARÉES DEUX À DEUX

Trois couples de variables sont étudiés : (C,R), (T,R) et (T,C). Les nuages de points dans l'espace à deux dimensions sont représentés respectivement sur la Figure 6. 37, la Figure 6. 38 et la Figure 6. 39.

Sur ces figures, les abscisses et ordonnées correspondent à nos séries statistiques. La valeur notée à côté de chaque point est la position de la mesure dans le conduit (en m), avec l'abscisse 0 à l'entrée SO de l'ouvrage. La droite tracée est la courbe de régression linéaire calculée. La droite en pointillés sur la Figure 6. 38 et la Figure 6. 39 représente le seuil de température de 17,2°C (voir paragraphe 6.4.3.2, page 154).

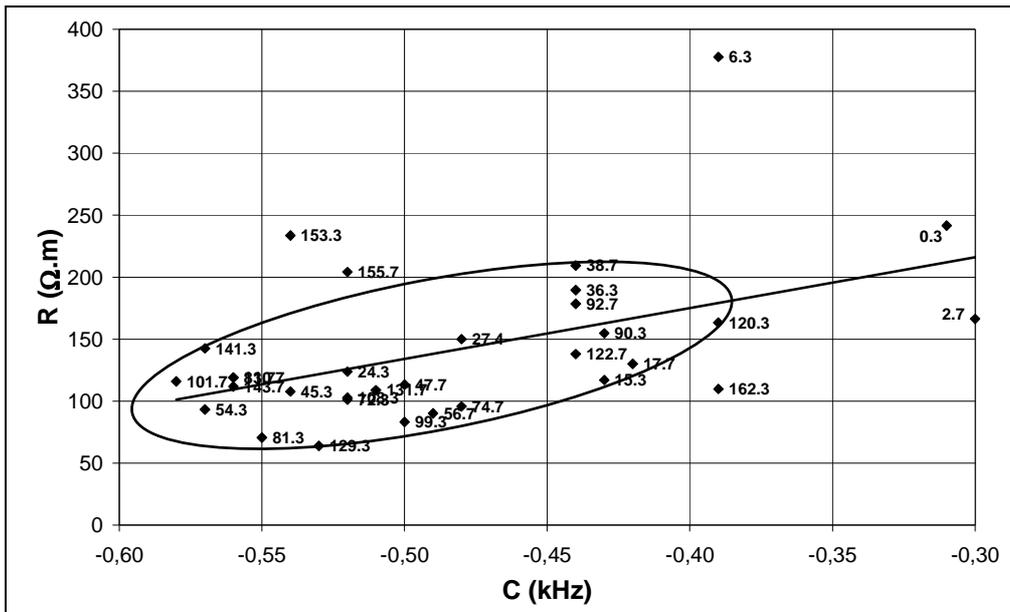


Figure 6. 37 Relation entre les mesures capacitatives (C) et électriques (R)

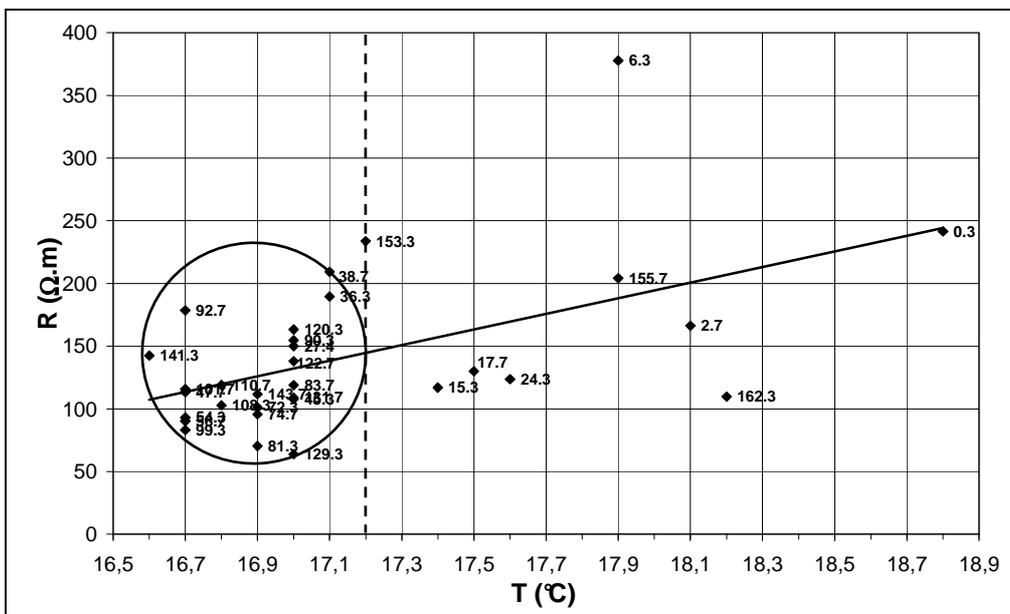


Figure 6. 38 Relation entre les mesures de température (T) et électriques (R)

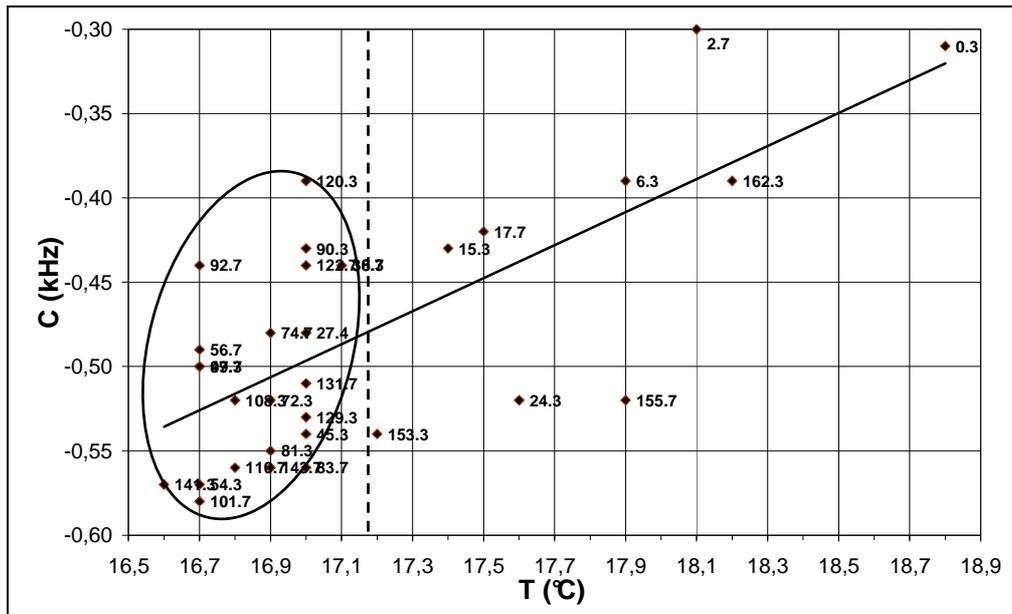


Figure 6.39 Relation entre les mesures de température (T) et capacitives (C)

Sur l'ensemble de ces graphiques, les individus ne forment pas un ensemble homogène. Il est possible de distinguer deux groupes d'individus : neuf individus ayant une position proche des deux extrémités du conduit (dont les positions sont 0,3 ; 2,7 ; 6,3 ; 15,3 ; 17,7 ; 24,3 ; 153,3 ; 155,7 et 162,3 m) et ceux proches du centre de la galerie. Ce découpage correspond à celui réalisé à partir des mesures de température (voir paragraphe 6.4.3.2, page 154).

6.4.6.2. ANALYSES EN COMPOSANTES PRINCIPALES (ACP)

L'application de l'ACP (Saporta 1990) a pour but de mettre en évidence des corrélations entre les différentes variables (T, C et R).

Les éventuelles corrélations entre les variables s'analysent au travers de la lecture de la Figure 6. 40. Cette dernière représente la projection des variables dans le plan F1-F2 des composantes principales, absorbant 89% de la variance totale. Sur cette figure, on remarque la bonne corrélation entre les variables T et C.

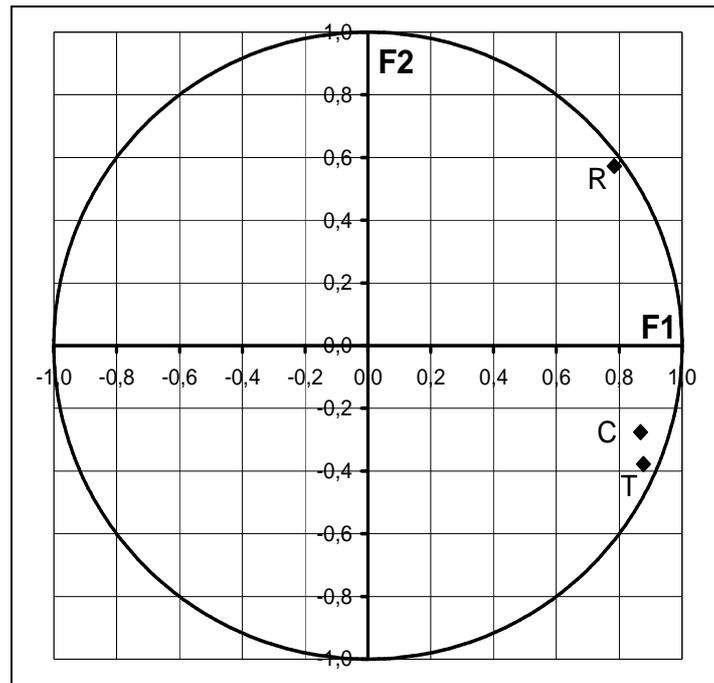


Figure 6. 40 Cercle des corrélations (plan F1-F2)

La représentation du nuage des individus (les points de mesure) dans le plan formé par les deux premiers axes factoriels (F1-F2) est donnée sur la Figure 6. 41. La valeur notée à côté de chaque point est la position de la mesure dans le conduit (en m), avec l'abscisse 0 à l'entrée SO de l'ouvrage. On constate que cette représentation ne semble pas classer les points de mesure de façon simple. Néanmoins cinq points se détachent de l'axe F1 (abscisse > 1), et un point de l'axe F2 (abscisse > 1). Ces six points de mesure correspondent aux extrémités du conduit.

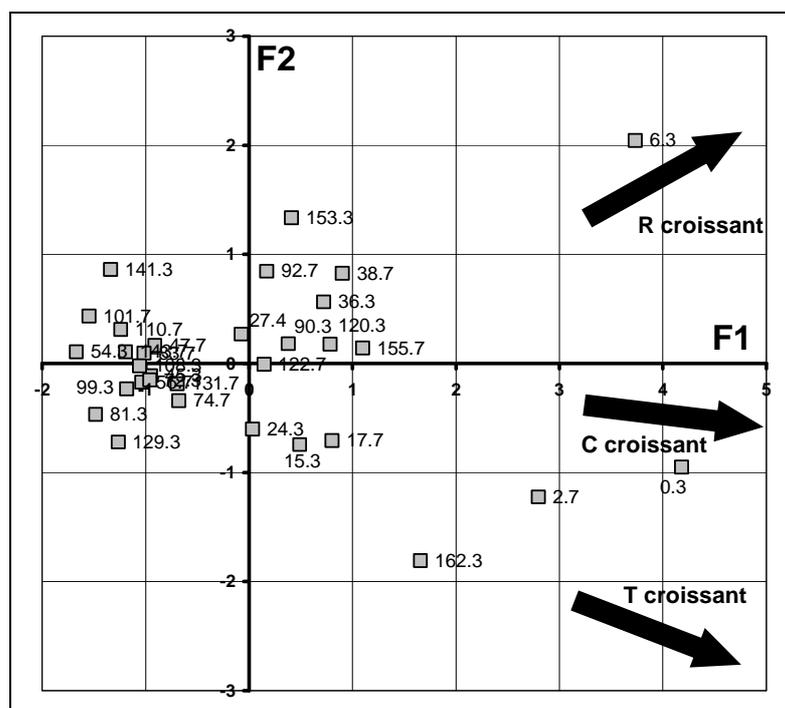


Figure 6. 41 Représentation des points de mesure dans l'espace des individus

6.4.6.3. CORRÉLATION DES VARIABLES

Afin d'expliquer les variations des différents paramètres dans le conduit, la corrélation entre les trois séries de mesure est étudiée. Les résultats des tests statistiques sont présentés dans le Tableau 6. 8. Il est à signaler que l'étude porte sur l'ensemble des individus (sans faire la distinction entre les deux groupes). En tenant compte des deux groupes d'individus, l'élimination des mesures effectuées aux extrémités amène à des conclusions semblables.

Tableau 6. 8 Indépendance statistique et corrélation des couples de variable

	(C,R)	(T,R)	(T,C)
Test de l'indépendance des variables	rejetée de façon hautement significative	rejetée de façon hautement significative	rejetée de façon très hautement significative
Coefficient de corrélation	0,49	0,52	0,69

A l'issue de cette étude, l'hypothèse de l'indépendance des variables prises deux par deux doit être rejetée de façon au moins hautement significative (risque de 1%) pour les 3 couples (C,R), (T,R) et (T,C), en considérant un modèle linéaire. Les coefficients de corrélation pour ce même modèle sont respectivement de 0,49, 0,52 et 0,69.

Plusieurs hypothèses d'interprétation physique des résultats sont possibles :

- l'effet de la température de l'air : la température de l'air ambiant décroît de façon régulière de 17 à 13°C, de l'extrémité SO vers l'extrémité NE du conduit. Or les trois variables augmentent du centre du conduit vers ses extrémités. Cette hypothèse ne peut être retenue ;
- l'effet du matériau : le conduit ayant été conçu avec des éléments préfabriqués, tous les tronçons sont théoriquement similaires en termes de géométrie et de propriétés physiques, au moment de sa mise en place. Cette hypothèse est également rejetée ;
- l'effet d'un paramètre commun : les trois grandeurs mesurées (température, fréquence et résistivité électrique) sont sensibles à un paramètre physique commun. Les observations faites sur le terrain conduisent à identifier la teneur en eau volumique comme étant ce paramètre commun. Celle-ci varie avec le degré d'endommagement et l'humidité de l'air (non mesurée lors des inspections). De plus les mesures électriques et capacitatives varient avec la teneur en eau volumique du béton.

Les variations des mesures peuvent donc être interprétées comme des variations des conditions hydriques le long du conduit.

6.4.7. ESTIMATION DU PROFIL DE DEGRÉ DE SATURATION

A partir des mesures capacitatives et électriques, nous avons cherché à estimer le profil de degré de saturation en eau du béton (voir paragraphe 6.2.3.2 et 6.2.6, respectivement page 130 et 132).

Une courbe de régression (polynôme de deuxième ordre) est calculée à partir des deux séries de données, mesures électriques (Figure 6. 43) et mesures capacitives (Figure 6. 42). En première approche, ces modèles permettent d'évaluer la tendance générale le long de l'ouvrage. Les mesures représentent alors des variations locales autour de la tendance générale.

Sur ces deux modèles, nous faisons l'hypothèse que la valeur de résistivité électrique calculée la plus faible (104,2 Ω .m) et la mesure capacitive minimale calculée (-0,53 kHz), correspondent à un degré de saturation de 1. Ces deux minima correspondent à la même abscisse $X = 92,7$ m (tronçon 31). Ces deux valeurs servent ensuite à caler les relations établies entre le paramètre mesuré (fréquence ou résistivité) et le degré de saturation.

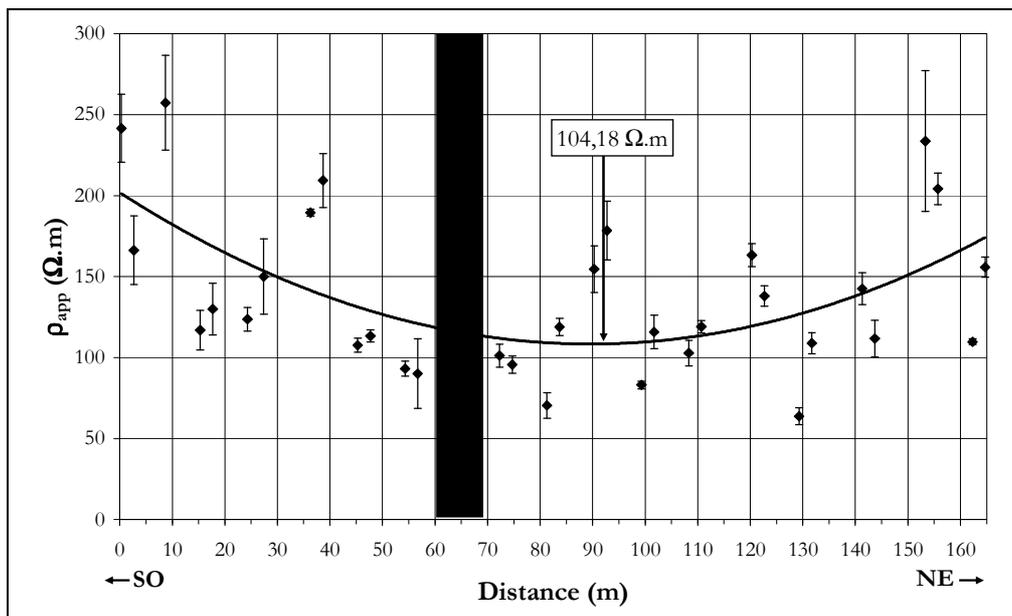


Figure 6. 42 Modèle issu des mesures électriques

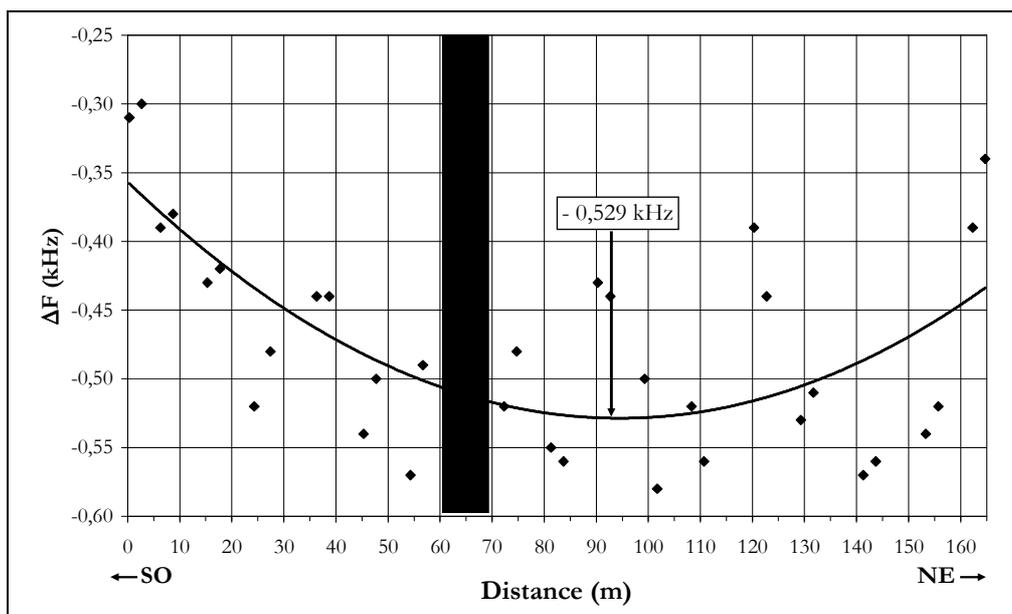


Figure 6. 43 Modèle issu des mesures capacitives

6.4.7.1. A PARTIR DES MESURES ÉLECTRIQUES

En prenant comme hypothèse que le béton du conduit a des caractéristiques proches de celui utilisé dans la conception des corps d'épreuve testés en laboratoire à teneur en eau contrôlée, il est possible d'exploiter les mesures de résistivité électrique apparente ρ_{app} (en $\Omega.m$) en niveaux de degré de saturation Sr.

Les résultats de la campagne de mesures électriques sont les suivants :

$$\rho_{app} = cte.Sr^{-2,43} \quad \text{avec } R = -0,98$$

La présence de condensation importante en surface des éléments sur une grande partie de l'ouvrage, indique que le béton est sans doute très proche de la saturation. C'est pourquoi, en première approche, le béton est considéré comme saturé pour la valeur électrique minimale calculée à partir du modèle. Ainsi :

$$\rho_{app} = 104,2.Sr^{-2,43}$$

Le profil de degré de saturation obtenu (Figure 6. 44) est issu des mesures de résistivité électrique réalisées lors de l'auscultation du conduit au mois de septembre 2004. Des valeurs de Sr voisines de 75% se retrouvent en amont du conduit, et des valeurs de l'ordre de 85% en aval. Vers le milieu du conduit, les valeurs sont plus élevées.

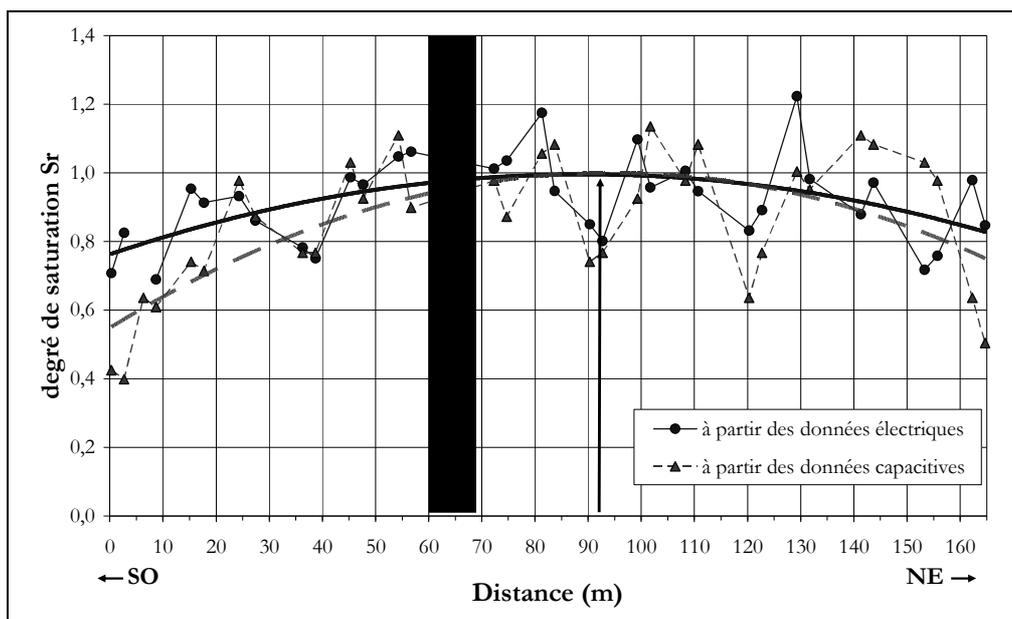


Figure 6. 44 Estimation du profil de degré de saturation le long du conduit

6.4.7.2. A PARTIR DES MESURES CAPACITIVES

Comme pour les mesures électriques, il est possible d'exploiter les mesures fréquentielles Δf (en kHz) en fonction du degré de saturation Sr. Les résultats de la campagne de mesures capacitives sont les suivants, pour les électrodes $10 \times 70 \text{ mm}^2$:

$$\Delta f = - 0,38.Sr - cte \quad \text{avec } R = -0,99$$

La présence de condensation importante en surface des tronçons sur une grande partie de l'ouvrage, indique que le béton est vraisemblablement proche de la saturation. C'est pourquoi, en

première approche, le béton est considéré comme saturé pour la valeur capacitive minimale calculée à partir du modèle. Ainsi :

$$\Delta f = -0,38.Sr - (cte - 0,38) \quad \text{avec } cte = -0,53$$

D'où :

$$\Delta f = -0,38.Sr - 0,15$$

La Figure 6. 44 représente le profil de degré de saturation le long du conduit calculé à partir des mesures capacitives : en amont du conduit les valeurs sont proches de 55% alors qu'en aval, les valeurs sont de l'ordre de 75%. Vers le milieu du conduit, de fortes valeurs du degré de saturation se retrouvent.

Pour les deux profils estimés, le maximum de degré de saturation est situé au niveau du tronçon 31 (vers 90 m).

Les valeurs de degré de saturation obtenues à partir des mesures électriques sont plus élevées que celles obtenues à partir des mesures capacitives. Les conditions environnementales différentes entre les deux séries de mesures peuvent expliquer ces différences.

6.4.7.3. CONCLUSION

Les mesures réalisées sur plusieurs corps d'épreuve testés en laboratoire à teneur en eau contrôlée, ont permis de suggérer des relations entre les mesures capacitives et le degré de saturation d'une part et entre la résistivité électrique et le degré de saturation d'autre part. Ainsi il est possible d'exploiter ces deux séries de mesures en termes de degré de saturation.

Les équations établies en laboratoire sur deux jeux d'éprouvettes ont été appliquées à des mesures sur ouvrage. Ce travail montre que les résultats en première approche sont satisfaisants et permettent d'envisager la poursuite des travaux dans ce sens.

6.4.8. CORRÉLATION DES RÉSULTATS AVEC LE PROFIL DE FISSURATION

Afin d'expliquer les variations des conditions hydriques dans le conduit, nous avons cherché à étudier la corrélation entre les trois séries de mesures (C, T et R) et le profil de fissuration (variable notée F). Les résultats des tests d'indépendance statistiques sur les quatre variables prises deux à deux sont présentés dans le Tableau 6. 9.

Tableau 6. 9 Résultats des tests statistiques sur les variables prises deux par deux

	(C,F)	(T,F)	(R,F)
Test d'indépendance des variables	rejetée de façon significative	rejetée de façon très hautement significative	rejetée de façon significative
Coefficient de corrélation	0,39	0,74	0,37

A l'issue de cette étude, l'hypothèse de l'indépendance des variables prises deux par deux doit être rejetée de façon significative (risque de 5%) pour les deux couples (C,F) et (R,F), et de façon très hautement significative (risque de 0,1%) pour le couple (T,F), en considérant un modèle linéaire. Les coefficients de corrélation pour ce même modèle sont respectivement de 0,39, 0,74 et 0,37.

A la lumière de ces résultats, il est maintenant possible d'attribuer les variations de mesures de capacimétrie, de température et de résistivité électrique à des variations de teneur en eau volumique, en faisant l'hypothèse qu'elle est reliée à la longueur de fissuration visible à la surface du conduit.

6.4.9. CONCLUSION DE L'ÉTUDE

Les trois techniques d'auscultation non destructive utilisées sur cet ouvrage (mesures de résistivité électrique, thermographie infrarouge passive et capacimétrie) donnent des résultats qualitativement identiques. De plus le couplage des différentes méthodes permet d'interpréter les variations des mesures. Il permet de mettre en évidence la corrélation entre les différentes séries de mesures et un paramètre physique commun, la longueur de fissuration.

A partir de mesures réalisées sur plusieurs corps d'épreuve testés en laboratoire à teneur en eau contrôlée et des relations établies, nous avons exploité les mesures capacitives et de résistivité électrique en terme de degré de saturation.

6.5 SYNTHÈSE

L'influence de l'eau sur les propriétés électrique et thermique est déjà connue. La quantification de ce paramètre est une phase importante dans le diagnostic des ouvrages en Génie Civil, que l'eau soit le vecteur de l'altération, ou que sa présence soit le signe de pathologie.

A l'issue de deux études indépendantes, nous proposons une application de la **formule d'Archie**, établie en 1942, et qui relie la mesure de résistivité électrique du matériau (ρ en $\Omega.m$) à la résistivité électrique du fluide interstitiel (ρ_w en $\Omega.m$), la porosité (Φ) et le degré de saturation (S_r). Cette formule s'écrit comme suit :

$$\rho = a.\rho_w.\Phi^{-m}.S_r^{-n}$$

Dans cette expression, a, m et n sont trois paramètres définis empiriquement :

- « a » caractérise la lithologie. Ce paramètre prend des valeurs de 0,6 à 2 pour les roches. Dans le cas du béton, nous proposons des valeurs qui varient de 0,1 à 0,8 ;
- « m » est le facteur de cimentation. Ce paramètre prend des valeurs de 1,3 à 2,2 pour les matériaux géologiques. Pour le béton, nous trouvons une valeur de 4,6 ;
- « n » ≈ 2 pour les roches. Pour le béton, cette valeur est d'environ 2,43.

Aux regards des valeurs connues pour les roches, ces valeurs ne sont pas aberrantes. Mais les résultats restent basés sur une étude empirique et réduite. Ils demandent encore à être validés par d'autres expérimentations, notamment en utilisant des bétons de formulations différentes.

Dans un deuxième temps, cette formule établie sur deux séries de corps d'épreuve a été **appliquée à des mesures sur ouvrage**. Cette étude montre que les résultats obtenus en première approche sont satisfaisants et permettent d'envisager la poursuite des travaux dans ce sens.

Une approche originale menée lors de l'analyse des données avec **l'étude des corrélations** entre les différentes séries de mesures permet de consolider la pertinence des résultats. La mise en évidence de la corrélation des mesures avec un paramètre physique commun (la longueur de fissuration) permet de valider l'interprétation des variations de résistivité électrique et de température à la surface de l'ouvrage : ces variations dues à des conditions hydriques différentes dans le béton s'expliquent par l'évolution de la densité de fissuration le long de l'ouvrage.

Un mode de **couplage** est illustré dans cette étude : l'utilisation de deux méthodes d'auscultation permet la confrontation des résultats pour confirmer les mesures et leurs variations relatives (mode 1). Si les résultats se confirment, le mode 2 du couplage peut être envisagé : l'utilisation de deux méthodes d'auscultation permet d'affiner l'interprétation des variations, de réduire les effets de biais et ainsi de renforcer la qualité de l'évaluation.

En ce qui concerne l'évaluation des variations hydriques par méthode non destructive, la mesure de la température de surface obtenue par thermographie infrarouge passive est plus rapide que la mesure de résistivité électrique. En ce sens l'établissement d'une **relation entre le degré de saturation et la température de surface** est une piste de développement de la méthode, notamment avec l'étude de l'inertie thermique.

Par ailleurs, une étude en laboratoire a permis de mettre en évidence la relation entre la **cinétique de séchage** et la température de surface d'une part, et la mesure de résistivité électrique d'autre part. Plus il y a d'évaporation à la surface du béton, plus la température de surface est faible et plus la résistivité électrique diminue.

L'utilisation très spécifique des deux méthodes présentée dans ce chapitre nécessite encore des études complémentaires avant d'être généralisée. Toutefois, les résultats obtenus constituent une base de développement des méthodes et de leur utilisation combinée.

CHAPITRE 7 : AIDE AU DIAGNOSTIC DE L'ENDOMMAGEMENT CRÉÉ PAR LA RÉACTION ALCALIS-GRANULATS

La Réaction Alcalis-Granulats (RAG) est un endommagement du béton dont les conséquences sont très importantes pour les ouvrages (gonflement, fissuration...). Les travaux de recherche en cours sont axés sur la prédiction de l'évolution du gonflement et des dégradations des ouvrages déjà atteints. Pour enrichir ces modèles, il est nécessaire d'évaluer le degré d'avancement de la RAG.

Avant d'étudier l'influence de cette pathologie sur les propriétés électriques et thermiques du béton, il convient de définir la réaction et ses principales conséquences. Une revue bibliographique établit ensuite les principaux facteurs influençant la RAG ainsi que les différentes méthodes d'END utilisées aujourd'hui pour estimer son endommagement.

Des mesures de résistivité électrique et par thermographie infrarouge passive sont réalisées sur des corps d'épreuve, à la fois en laboratoire et sur site. Les résultats permettent de dégager des indicateurs de l'endommagement créé par la RAG dans le cadre du diagnostic des ouvrages en béton.

7.1 INTRODUCTION

Il existe deux types de Réaction Alcalis-Granulats (RAG) : la réaction alcalis-silice (la plus courante des réactions alcalis-granulats) et la réaction alcalis-carbonate (Grattan-Bellew *et al.* 2002). La Réaction Alcalis-Silice (RAS) est de loin la plus répandue à travers le monde.

7.1.1. DÉFINITION

La RAS est une réaction chimique nuisible qui se produit entre certaines phases solides siliceuses des granulats et les hydroxydes alcalins de la solution interstitielle du béton provenant principalement du ciment (Rivard 2002). Le produit formé est un gel siliceux contenant principalement du sodium, du potassium et du calcium. Ces composants sont présents en quantité très variable (Lombardi *et al.* 1996). Ce gel possède la propriété d'absorber l'eau et d'augmenter ainsi de volume. Lorsque les pressions de gonflement ne peuvent être dissipées ou contraintes à l'intérieur du béton, celui-ci gonfle et se fissure. Généralement, un motif de fissuration polygonal apparaît à la surface du béton (Bérubé *et al.* 2000) : soit des faïençages correspondant à des réseaux de mailles étroites (maille de 5 à 10 cm) avec des fissures de faible

profondeur (quelques centimètres), soit des réseaux plus importants (maille de 30 à 40 cm) pour lesquels la profondeur des fissures est plus grande (> 10 cm). Elle est souvent accompagnée d'exsudation de gel de silice blanchâtre de sels de calcium et de sulfate (lorsque les fissures sont suffisamment développées ou âgées). Cette fissuration est très importante et isotrope excepté dans les cas où il existe des contraintes majeures ou des armatures dans le béton (Houle 1998) : la fissuration est alors orientée (anisotropie).

Le premier cas de structure en béton atteinte par la RAG a été identifié en 1940. Il s'agit d'un barrage situé en Californie aux Etats-Unis (Stanton 1940). Aujourd'hui, au Québec, en raison de l'utilisation historique de granulats réactifs provenant des roches présentes sur le territoire (Rivard *et al.* 2002) et de ciments à haute teneur en alcalis, de nombreux ouvrages en béton sont affectés de RAG (Fournier *et al.* 2000^a, Bérubé *et al.* 2000). C'est notamment le cas des grands barrages et des écluses de la Voie Maritime du Saint-Laurent (Gaudreault 2000). En Belgique, 136 structures en béton plus ou moins touchées par la RAG ont été recensées en 2001 (Desmyter *et al.* 2001). En France, le nombre d'ouvrages recensés est plus restreint. Le barrage du Chambon (Isère) construit dans les années 30, est devenu un cas d'école pour les spécialistes. La région du Nord est particulièrement touchée par ce phénomène, à la suite de l'utilisation de granulats belges particulièrement riches en silice réactive (Klysz *et al.* 2006).

7.1.2. CONSÉQUENCES DE L'ENDOMMAGEMENT

Les conséquences du gonflement causé par la RAG, quel que soit le type de réaction, peuvent se manifester à différentes échelles (Jones *et al.* 1998) :

- à l'échelle microscopique : microfissuration, décollement des granulats de la pâte de ciment et fluage de la pâte de ciment ;
- à l'échelle de l'ouvrage : gonflement massif, développement de contraintes importantes, apparition de la fissuration et la délamination du béton.

Le gonflement du béton, dont l'origine est encore discutée (Bulteel 2000), est l'une des principales conséquences de la RAG et les désordres observables sont nombreux : on peut recenser par exemple l'éclatement de joints de dilatation, la déformation du béton (distorsion, gonflement...), le blocage de la machinerie (turbines, portes d'écluse...) engendrant des coûts importants de réhabilitation. Pour la gestion de quatre écluses de la Voie Maritime du Saint-Laurent (Québec), en 20 ans, d'exploitation il a été estimé qu'environ 1,7 milliard d'euros ont été dépensés dans le réalignement des machines et la réparation de la structure affectée par la RAG (Gaudreault 2000).

7.1.3. FACTEURS D'INFLUENCE

Les principaux facteurs qui influencent le développement des RAG sont :

- la nature minéralogique et la réactivité du granulat : Bérard *et al.* (1986) ont mis en relation la nature du granulat et l'ampleur des dommages occasionnés. Depuis, de nombreuses recherches confirment ce phénomène ;

- le degré d'humidité du béton : sans eau, la réaction ne peut être initiée et ne peut avoir lieu. Un degré élevé d'humidité relative (80 à 85%) est nécessaire pour que la réaction puisse éventuellement se développer et se maintenir (Olafsson 1987) ;
- la teneur en alcalis du béton : une augmentation du contenu en alcalis dans le béton accélère le taux d'expansion (Rogers 1988) ;
- la température : comme toutes les réactions chimiques, la RAG est sensible à la température (Olafsson 1987). En première approximation, la vitesse de réaction (loi d'Arrhenius) semble doubler pour chaque augmentation de 10°C (Larive 1997). Pour une température de l'ordre de 40°C, un niveau d'expansion maximal est atteint ;
- la porosité du béton : si le milieu dans lequel la réaction a lieu est de porosité élevée, les produits de la réaction s'y accumulent et peuvent gonfler librement sans créer de pressions importantes à l'intérieur du béton ;
- la pression de confinement : de nombreuses études ont montré que le confinement du béton réduit de façon significative le gonflement généré par la réaction (Ballivy *et al.* 2000). La charge critique sous laquelle aucune expansion n'est enregistrée varie de 1 à 10 MPa selon les auteurs ;
- rôle des armatures : Houle (1998) montre que le confinement lié aux armatures exerce un effet très significatif sur le développement de la réaction.

7.2 LA RAG ET LE CND

Plus d'une cinquantaine d'années de recherche ont permis de connaître suffisamment bien les mécanismes réactionnels et les causes exactes de la réaction alcalis-granulats (Mather 1999). Aujourd'hui, de nombreux essais de détermination de la réactivité potentielle des granulats existent (CAN/ASN A23.2-14A 1994, ASTM C1260-94 1994, Mather 1999, Fournier *et al.* 2000, Rivard *et al.* 2000, Rivard *et al.* 2002...). Il est possible de prévenir tout risque de réaction dans les bétons et éviter ainsi tout désordre. En revanche, il faut gérer un parc important d'ouvrages déjà atteints et pour lesquels, dans la majorité des cas, il n'y a aucun moyen de stopper la réaction et sa progression. Leur entretien et leur réparation sont très difficiles : ils se limitent la plupart du temps à traiter les effets de la dégradation et à limiter les transferts hydriques entre le milieu extérieur et le béton. Dans certains cas, sur de petits éléments, des traitements imperméabilisants ou bien au lithium ont réussi à freiner les dommages.

Du fait de l'ampleur du phénomène et de ses conséquences, on cherche actuellement à prédire l'évolution future du gonflement et des dégradations sur les ouvrages atteints (Capra *et al.* 1998, Bazant *et al.* 2000, Li 2002, Poyet 2003). Pour nourrir les modèles numériques, il est nécessaire d'acquérir des données sur les ouvrages concernés. Or les inspections visuelles ne donnent que des informations trop superficielles. Du fait de la forte fissuration du béton affecté par la réaction, l'étude de carottes de forages donne des résultats trop dispersés (Design Manual for Roads and Bridges 1994).

C'est seulement depuis une vingtaine d'années que l'on commence à s'intéresser à la possibilité d'ausculter le béton atteint de RAG par des méthodes non destructives. La majorité

des études recensées dans la littérature font référence à l'utilisation des méthodes acoustiques et ultrasoniques (Blight *et al.* 1983, Albert *et al.* 1986, Akashi *et al.* 1986, Pleau *et al.* 1989, Alexander *et al.* 1992, Saint-Pierre *et al.* 2004, Kodjo *et al.* 2005). Les résultats sont assez contradictoires d'une étude à l'autre dans l'état actuel des choses. A ce jour, il n'existe aucune méthode de CND qui permette d'évaluer correctement le degré d'avancement de la réaction.

7.2.1. LA RAG ET LA MESURE ÉLECTRIQUE

Une seule étude faisant état de l'influence de la RAG sur les propriétés électriques du matériau a été recensée (Tashiro *et al.* 1989). Il s'agit d'un travail sur quatre types de mortiers dont deux sont enrichis en alcalins de façon à provoquer la réaction. Sur les deux éprouvettes réactives, seule une réagit réellement (taux d'expansion remarquable). La résistivité électrique mesurée grâce à des électrodes coulées dans le béton, augmente au cours des 30 premiers jours de cure (Figure 7. 1). Cette augmentation de résistivité électrique est beaucoup plus marquée pour l'éprouvette réactive. Tashiro *et al.* (1989) relie cette hausse à l'expansion des éprouvettes de mortier résultant de la réaction. A l'issue de cette étude, les auteurs proposent d'utiliser la résistivité électrique comme indicateur du degré d'avancement de la réaction.

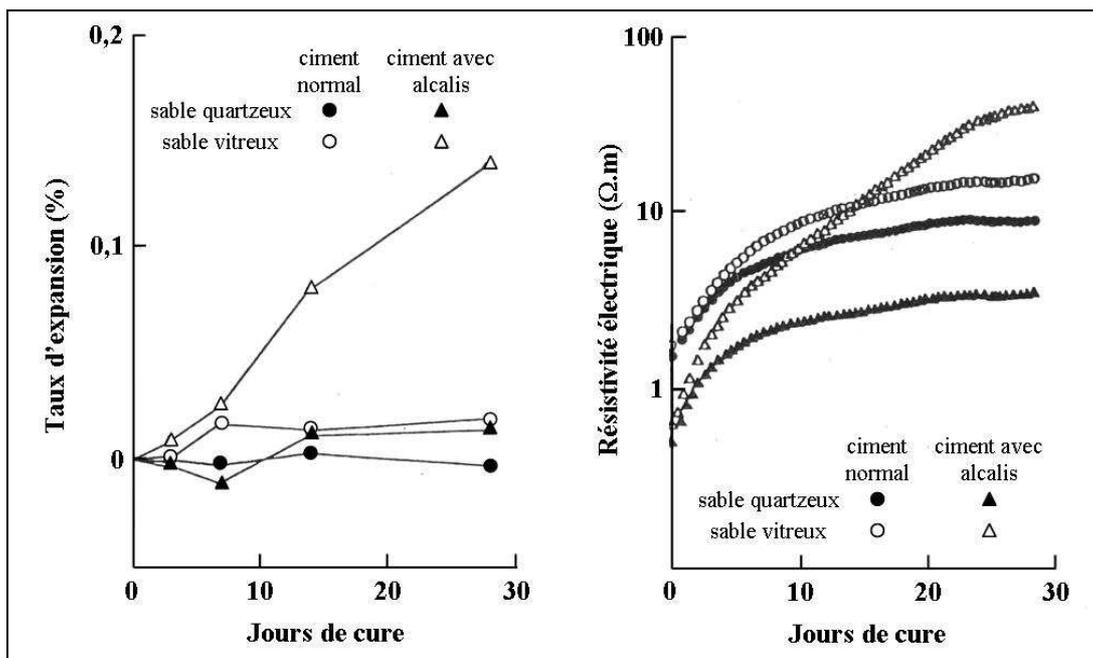


Figure 7. 1 Taux d'expansion et résistivité électrique de mortiers atteints par la RAG (d'après Tashiro *et al.* 1989)

La résistivité électrique d'un matériau est fortement influencée par la nature de la solution interstitielle et par la teneur en eau. Bulteel (2002) a montré que la teneur en alcalis présents dans la solution interstitielle diminue avec l'avancement de la réaction. A partir des résultats d'essais réalisés en laboratoire, Rivard (2002) attribue une partie de cette diminution au lessivage. Par conséquent, on peut s'attendre à ce que la RAG fasse augmenter la résistivité électrique des bétons du fait de l'appauvrissement en ions de la solution interstitielle.

7.2.2. LA RAG ET LA MESURE THERMIQUE

La présence d'eau dans le matériau, la fissuration de la surface et la production de gel de silice modifie la conduction de la chaleur à l'intérieur du béton. Selon la nature du fluide présent dans la porosité du béton, les propriétés thermiques évoluent de façon différente :

- avec l'augmentation du degré de saturation, la conductivité thermique augmente ;
- avec le remplacement de l'eau par de l'air dans la porosité, la conductivité thermique diminue.

Ces deux paramètres ont des effets opposés. A ceux-ci, il faut ajouter l'influence possible de la présence de gel de silice dans les vides. Comment les propriétés thermiques du béton sont-elles influencées finalement par ces différents facteurs ? Et quelles sont les propriétés thermiques du gel produit par la réaction ?

Des premiers essais ont été réalisés en laboratoire, à l'Université de Sherbrooke (essais non publiés). L'utilisation de la méthode du fil chauffant sur des éprouvettes cylindriques vise à estimer les propriétés thermiques du béton atteint par la RAG. Les premiers résultats indiquent que la conductivité thermique et la diffusivité thermique ne sont pas significativement différentes de celles d'un béton sain.

7.2.3. BILAN

Une seule étude, à notre connaissance, fait état de mesures électriques sur des mortiers atteints par la RAG (Tashiro *et al.* 1989) : sur la base de cette expérience, la **résistivité électrique** du mortier **augmente** avec la teneur en alcalis contenus au départ dans le ciment.

Concernant l'influence de la RAG sur les propriétés thermiques du béton, les premiers résultats ne semblent pas encourageants.

7.3 ÉTUDE EN CONDITIONS ENVIRONNEMENTALES CONTRÔLÉES

7.3.1. PRÉSENTATION DE L'ÉTUDE

Lors de cette étude en laboratoire, seules des mesures de résistivité électrique sont réalisées sur deux dalles. Les deux corps d'épreuve servant en parallèle à d'autres expérimentations, il n'a pas été possible de réaliser des mesures par thermographie infrarouge passive. Ce paragraphe ne présente que les résultats de mesures électriques.

7.3.1.1. DESCRIPTION DES CORPS D'ÉPREUVE

Coulées en novembre 2002 dans le laboratoire de l'Université de Sherbrooke (Québec, Canada), deux dalles sont préparées afin d'étudier les relations entre les propriétés mécaniques et physiques du béton atteint par la RAG. Leurs dimensions sont identiques 1 x 1 x 0,26 m et elles sont non armées. Elles sont référencées B2 et B4.

Afin de suivre l'évolution de la RAG et de ses effets, ces deux formulations contiennent des granulats réactifs (un mélange de calcaire Spratt et de graviers du Nouveau-Mexique) et ont une teneur en alcalis rehaussée (Rivard 2003).

7.3.1.2. FORMULATIONS ET PROPRIÉTÉS

La formulation des dalles ainsi que leurs principales propriétés à l'état frais et à l'état durci (à 28 jours) sont données dans le Tableau 7. 1.

Tableau 7. 1 Formulations et propriétés des dalles B2 et B4 (d'après Rivard 2003)

	B2	B4
Date de fabrication	nov. 2002	nov. 2002
E/C	0,66	0,75
Formulation		
Ciment (kg.m ⁻³)	390	210
Eau (kg.m ⁻³)	258	158
Granulat (kg.m ⁻³)	1140	705
Sable (kg.m ⁻³)	720	1133
Entraîneur d'air (mL.L ⁻¹)	0,1	0,1
Ajout de NaOH	Oui	Oui
Na ₂ O _{eq} (kg.m ⁻³)	5,25	5,25
Propriétés à l'état frais		
Air occlus (%)	2,1	4,1
Masse volumique (kg.m ⁻³)	2326	2223
Affaissement (mm)	190	120
Propriétés à l'état durci		
Porosité efficace (%)	13,7	16,9
f _c à 28jours (MPa)	29,2	12,5
E à 28 jours (GPa)	28,8	24

Les principales différences entre les deux formulations se retrouvent à plusieurs niveaux :

- paramètres de formulation (rapport E/C) et porosité efficace : l'échantillon B2 à un rapport E/C (0,66) et une porosité efficace (13,7%) plus faible que l'échantillon B4 (E/C = 0,75 ; porosité efficace de 16,9%) ;
- propriétés à l'état frais (air occlus et affaissement) : l'échantillon B2 contient moins d'air occlus que l'échantillon B4 (respectivement 2,1 et 4,1%). L'affaissement de l'échantillon B2 est plus important que celui de l'échantillon B4 (respectivement 190 et 120 mm) ;
- propriétés à l'état durci (f_c à 28 jours) : la résistance en compression de l'échantillon B2 est deux fois plus élevée que celle de l'échantillon B4 (respectivement 29,2 et 12,5 MPa). Cette différence est très significative.

Ces trois paramètres tendent à faire augmenter la porosité totale qui joue un rôle très important dans la conduction du courant électrique à l'intérieur du béton.

7.3.1.3. CONDITIONNEMENT

Les deux dalles sont enveloppées dans un tissu humide arrosé régulièrement afin de maintenir un degré d'humidité suffisant pour le développement de la RAG (Figure 7. 2). De ce fait, les corps d'épreuve ont une teneur en eau élevée.

La température n'est pas contrôlée et varie en fonction de celle du laboratoire, entre 18°C et 25°C. Les dalles sont équipées par un capteur à fibre optique permettant de mesurer l'allongement des corps d'épreuve, et par un thermocouple.

Une simple observation visuelle permet de constater que les deux dalles sont réactives. En effet, la surface des dalles est fissurée de manière caractéristique (fissuration polygonale) et du gel, produit par la RAG, suinte à travers les fissures.



Figure 7. 2 Photographie de la surface de la dalle B2

7.3.1.4. MESURE D'ALLONGEMENT

Afin de vérifier la réactivité des dalles vis-à-vis de la RAG, des mesures d'allongement sont réalisées sur chaque dalle de façon régulière depuis leur fabrication en novembre 2002 (semaine 0) et jusqu'à la réalisation des mesures électriques en juillet 2004 (semaine 89). La Figure 7. 3 représente l'évolution de l'expansion moyenne (en %) des deux dalles au cours du temps, depuis leur fabrication jusqu'à la date des mesures électriques. Chaque valeur d'allongement est une moyenne de trois mesures. Les barres d'erreur représentent $\pm 1/2$ écart-type.

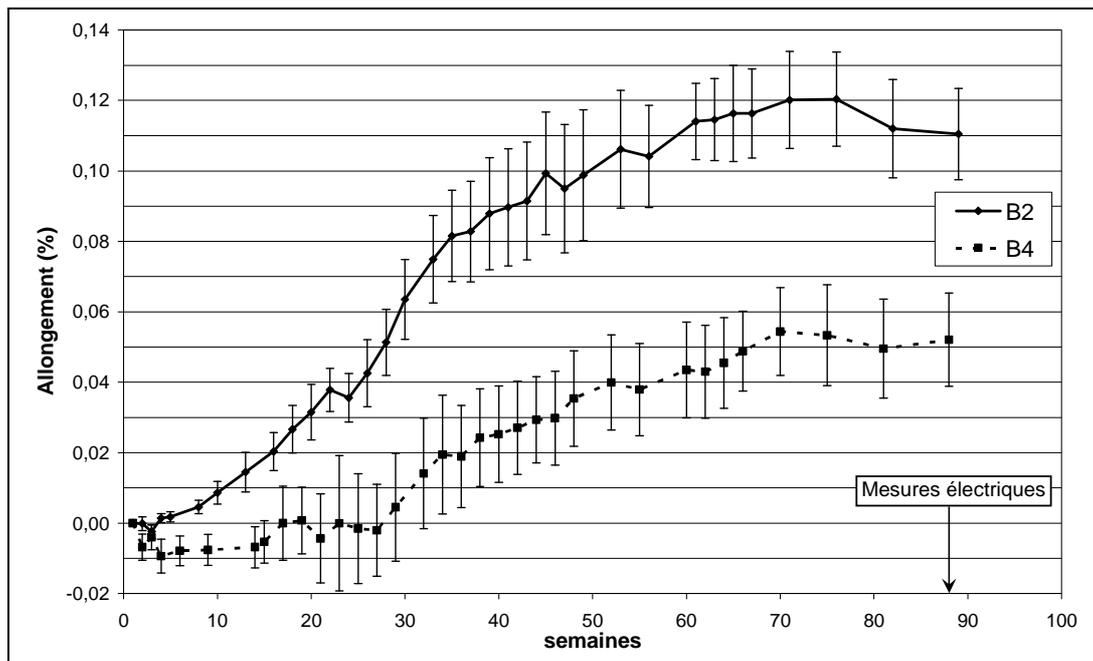


Figure 7.3 Évolution de l'expansion moyenne des dalles B2 et B4

L'expansion de la dalle B2 est deux fois plus rapide que celle de la dalle B4. Cela se traduit par un taux de fissuration plus important, traduisant une alcali-réaction plus importante.

7.3.1.5. BILAN

Les deux corps d'épreuve référencés B2 et B4 sont significativement différents du point de vue de leur formulation (rapport E/C), des propriétés rhéologiques (air occlus et affaissement) et des propriétés à l'état durci à 28 jours (et résistance en compression).

Au vu de l'évolution temporelle des mesures d'expansion, les deux dalles en béton B2 et B4 ont réagi de façon significativement différente à l'endommagement créé par la RAG. Le mélange B2 est nettement plus réactif que le mélange B4.

7.3.2. MESURES DE RÉSISTIVITÉ ÉLECTRIQUE

7.3.2.1. PRÉSENTATION DES MESURES

Le protocole de mesure est le même sur les deux corps d'épreuve. Les dalles font 20 cm d'épaisseur et sont non-armées (aucune correction des effets de bord et de fond n'est nécessaire).

Des mesures de résistivité électrique par quadripôle carré sont réalisées avec les deux dimensions du dispositif (Q5 et Q10, respectivement avec un écartement de 5 et 10 cm entre les électrodes) et avec les deux configurations d'injection du courant électrique (α et β). Sur chaque dalle, 16 points de mesure sont positionnés selon un maillage de 20 x 20 cm (Figure 7. 4).

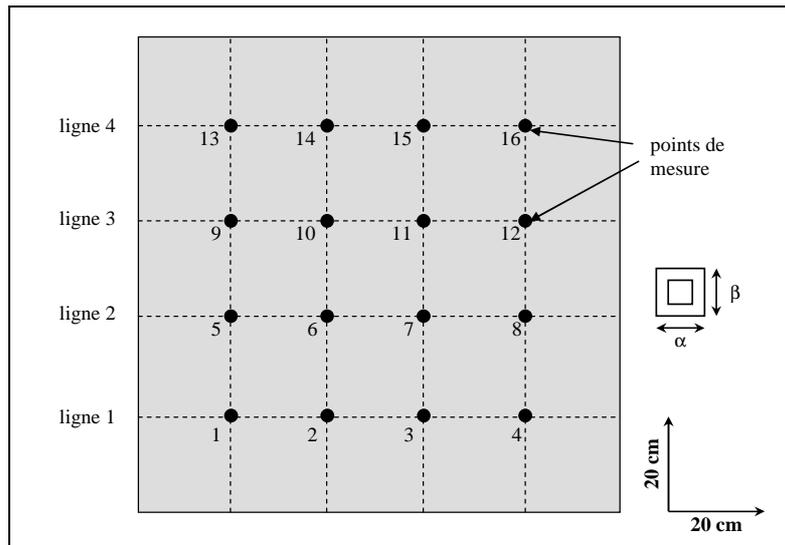


Figure 7.4 Schématisation des points de mesure

La dalle est découverte de son linge humide ligne par ligne. Ainsi, les conditions de mesures, en terme d'humidité à la surface de la dalle, sont identiques pour chaque point de mesure. Pour chaque ligne, les mesures sont réalisées en effectuant un profil aller-retour afin d'évaluer la dérive et de multiplier le nombre de points. Lors du traitement des données, aucune dérive n'a été observée. La mesure située en début de ligne est répétée 4 à 5 fois afin d'étudier la répétabilité. Ainsi, pour la ligne 2, les mesures sont effectuées dans l'ordre suivant : 5, 6, 7, 8, 7, 6, 5, 5, 5 et 5.

Le béton étant suffisamment humide en surface, aucun protocole d'humidification n'est nécessaire pour la réalisation des mesures électriques sur ces deux dalles.

7.3.2.2. VARIATIONS DE RÉSISTIVITÉ ÉLECTRIQUE

a. Résultats

Le positionnement du dispositif à la surface des dalles ne tient pas compte du patron de fissuration (isotrope). La comparaison des résistivités apparentes mesurées dans le cas de la configuration α et celles mesurées dans la configuration β illustre le fait que l'orientation du dispositif a peu d'influence sur la valeur de la résistivité apparente (Figure 7. 5 et Figure 7. 6) : la distribution des points se fait de part et d'autre de l'axe $\rho_\alpha = \rho_\beta$, symbolisant l'isotropie du matériau. Dans le traitement des données, la prise en compte du sens d'injection du courant n'est pas nécessaire.

De plus, lors du calcul des valeurs moyennes et des coefficients de variations de résistivité, certaines mesures sont à écarter : à partir de l'étude de la fonction de répartition, seules les valeurs comprises dans les ellipses dessinées sur les Figure 7. 5 et Figure 7. 6 sont conservées. Les quelques valeurs aberrantes ainsi écartées n'ont pas de signification particulière.

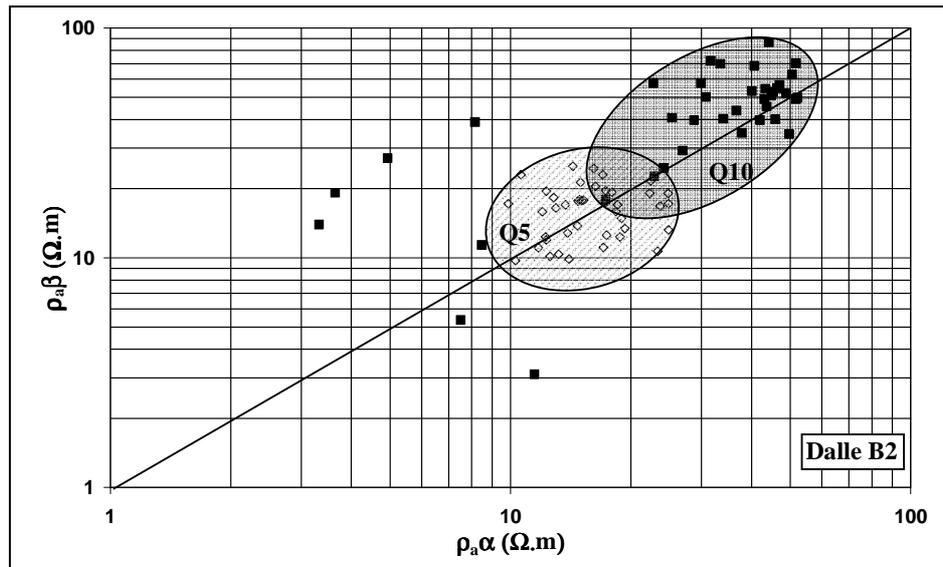


Figure 7.5 Résistivités apparentes mesurées selon le sens d'injection du courant pour la dalle B2

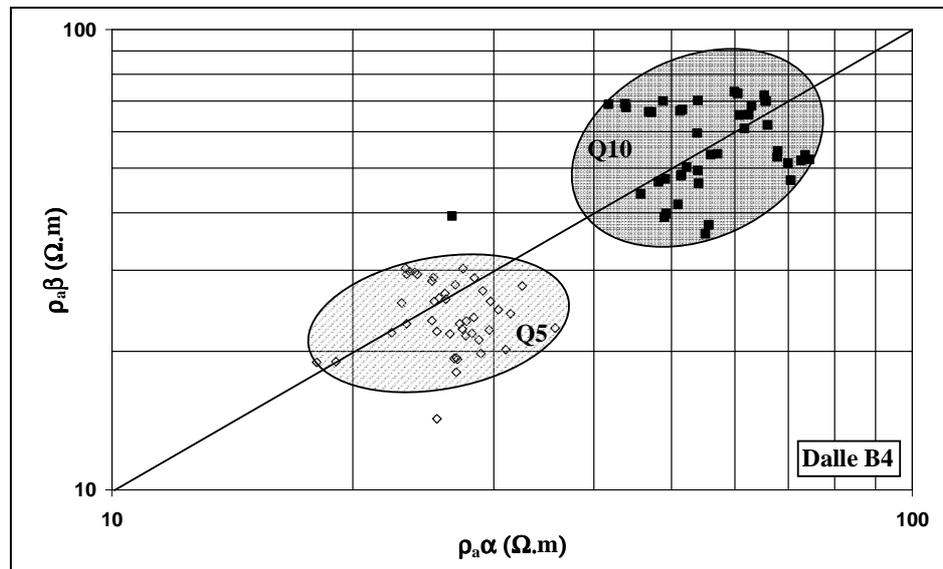


Figure 7.6 Résistivités apparentes mesurées selon le sens d'injection du courant pour la dalle B4

Les résultats des mesures électriques sont donnés dans le Tableau 7. 2. Pour chaque dalle, une valeur moyenne (moyenne arithmétique) de la résistivité est calculée pour chaque dimension du dispositif (Q5 et Q10). Le coefficient de variation de la résistivité est représentatif de la variabilité de la mesure.

Tableau 7.2 Résistivités électriques mesurées sur les dalles B2 et B4

Résistivité apparente <i>nombre de valeurs retenues</i>	B2		B4	
	Q5	Q10	Q5	Q10
<i>moyenne (Ω.m)</i>	16,3	44,2	25,7	57,0
<i>CV (%)</i>	25,4	30,7	14,3	17,6

Quel que soit le dispositif de mesure (Q5 ou Q10), la valeur moyenne de résistivité est supérieure pour l'échantillon B4 par rapport à l'échantillon B2. En ce qui concerne les coefficients de variation de la résistivité, ils sont supérieurs dans le cas de l'échantillon B2 par rapport à ceux de l'échantillon B4.

D'autre part, il apparaît un gradient de résistivité en fonction de la profondeur pour les deux échantillons : les valeurs en Q5 sont plus faibles que les valeurs en Q10.

Sur la base de cette expérience, la mesure de résistivité est sensible à l'endommagement créé par la RAG.

b. Interprétation

Les deux corps d'épreuve peuvent être considérés comme saturés (le degré de saturation S_r est proche de 1). L'échantillon B2 est moins poreux que l'échantillon B4. Or la porosité efficace joue un rôle très important sur la conduction électrique dans le béton. La résistivité électrique mesurée sur l'échantillon B2 doit être supérieure à celle mesurée pour B4.

Par ailleurs, en conditions humides (S_r proche de 1), l'augmentation de la fissuration (et donc de la porosité) tend à faire augmenter la résistivité électrique. La résistivité électrique mesurée sur l'échantillon B2 doit être supérieure à celle mesurée pour B4.

Les résultats obtenus sur cette expérience montrent que la valeur de la résistivité électrique de l'échantillon B2 est inférieure à celle de l'échantillon B4. Ces résultats sont en désaccord avec ceux de Tashiro *et al.* (1989). L'effet du degré de saturation et de la porosité est masquée par un autre paramètre qui fait diminuer très fortement la résistivité du béton. Je propose donc d'attribuer cette diminution de la valeur de résistivité électrique, à la présence de gel de silice dans les microfissures. Par conséquent, en conditions humides, le **gel de silice produit par la RAG semble être électriquement conducteur**.

La résistivité électrique mesurée étant plus importante en profondeur qu'en surface, il apparaît un gradient de résistivité, qui ne peut être le résultat du lessivage, tel que proposé par Bulteel (2002) et Rivard (2002) : cet effet, s'il était prépondérant, aurait tendance à faire augmenter la résistivité. Plus on se rapproche de la surface du matériau, et plus les fissures sont ouvertes et remplies de gel de silice. Une nouvelle fois, la présence de gel de silice semble être une hypothèse qui permet d'expliquer cette augmentation de la valeur de résistivité électrique avec la profondeur, en considérant ce gel électriquement conducteur.

Deux indicateurs de l'endommagement créé par la RAG se dégagent des résultats obtenus : la valeur moyenne et le coefficient de variation de la résistivité électrique. Le second indicateur représente la variabilité des mesures qui augmente avec le taux de fissuration.

7.3.2.3. VARIATIONS DE L'ANISOTROPIE ÉLECTRIQUE

a. Résultats

L'anisotropie électrique du matériau est une information obtenue en calculant le rapport des résistivités apparentes pour les deux directions d'injection du courant. Pratiquement, nous utilisons le logarithme décimal de l'anisotropie ($\text{Log}_{10}A_n$), afin d'éviter tout biais lié au sens choisi pour le rapport des résistivités :

$$\log_{10} An = \log_{10} \left(\frac{\rho_{\alpha}}{\rho_{\beta}} \right)$$

De cette manière, le $\text{Log}_{10}An$ d'un matériau isotrope est nul. Pour un matériau anisotrope, il varie entre ± 1 .

La **valeur moyenne du $\text{Log}_{10}An$** , notée m_{An} , traduit alors l'anisotropie à l'échelle de l'éprouvette. Si le matériau est isotrope, cette valeur est nulle.

Un autre indicateur est utilisé : la **moyenne de la valeur absolue du $\text{Log}_{10}An$** , notée $m_{|An|}$, qui représente l'anisotropie à l'échelle de la mesure. Pour chacune des moyennes de la valeur absolue du $\text{Log}_{10}An$, le coefficient de variation peut être calculé.

Les résultats sont présentés dans le Tableau 7. 3, en faisant la distinction entre les deux dimensions du dispositif (Q5 et Q10). La représentativité des résultats est à prendre avec précaution compte tenu des forts coefficients de variation calculés.

Tableau 7. 3 Anisotropies électriques calculées sur les dalles B2 et B4

	B2		B4	
	Q5	Q10	Q5	Q10
Anisotropie <i>nombre de valeurs retenues</i>	84	68	80	86
m_{An}	0,00	0,10	0,05	0,00
$m_{ An }$	0,12	0,12	0,09	0,09
CV (%)	72,3	93,6	69,4	71,8

La position des points de mesure ne tient pas compte du patron de fissuration visible à la surface des échantillons.

Quel que soit le dispositif de mesure (Q5 ou Q10), la valeur moyenne du $\text{Log}_{10}An$ (m_{An}) est très proche de 0 pour les quatre valeurs calculées. Les moyennes de la valeur absolue du $\text{Log}_{10}An$ ($m_{|An|}$) sont très faibles mais différentes entre les deux dalles : elles sont supérieures pour l'échantillon B2 par rapport à l'échantillon B4. En ce qui concerne les coefficients de variation de l'anisotropie électrique, les valeurs sont très proches les unes des autres et il est difficile, sur cette expérience, de tirer plus de conclusion sur ces résultats.

b. Interprétation

A l'échelle de l'échantillon, le calcul de la valeur moyenne du $\text{Log}_{10}An$ (m_{An}) traduit l'isotropie du patron de fissuration visible à la surface des dalles.

A l'échelle de la mesure, l'étude des variations des moyennes de la valeur absolue du $\text{Log}_{10}An$ ($m_{|An|}$) semble indiquer que ce paramètre traduit l'intensité de la fissuration.

7.3.3. BILAN

Les résultats des mesures électriques réalisées sur les deux corps d'épreuve sont synthétisés dans le Tableau 7. 4 :

Tableau 7.4 Synthèse des résultats obtenus en laboratoire sur l'influence de l'endommagement créé par la RAG sur la mesure de résistivité électrique

	B2	B4
<i>E/C</i>	<	
<i>porosité</i>	<	
<i>f'c (28 jours)</i>	>	
RAG		
<i>expansion</i>	>	
<i>fissuration</i>	>	
<i>gel de silice</i>	>	
Résistivité électrique		
<i>moyenne</i>	<	
<i>CV</i>	>	
Anisotropie électrique		
<i>m_{An}</i>	>	

Sur la base des résultats obtenus lors de cette expérience sur deux formulations de béton, nous pouvons retenir que :

- la mesure de résistivité électrique est **sensible** à l'endommagement créé par la RAG ;
- la moyenne et le coefficient de variation de la résistivité électrique, ainsi que la moyenne de la valeur absolue du $\text{Log}_{10} An$ ($m_{|An|}$) sont trois indicateurs de l'endommagement créé par la RAG ;
- le **gel de silice** produit par la RAG et contenu dans les fissures est électriquement conducteur dans des conditions humides. Sa présence implique une baisse de la résistivité électrique du béton.

Afin de valider l'ensemble de ces résultats et ainsi de confirmer l'influence de la RAG sur les mesures de résistivité, il serait nécessaire de suivre l'évolution de la résistivité en fonction de l'expansion dès la fabrication des corps d'épreuves.

7.4 ÉTUDE EN CONDITIONS ENVIRONNEMENTALES NON CONTRÔLÉES

7.4.1. PRÉSENTATION DE L'ÉTUDE

Cette étude a pu être réalisée grâce à la collaboration de Monsieur Benoit Fournier, du laboratoire de la technologie des matériaux de CANMET (CANadian, Materials, Energy Technology) d'Ottawa (Ontario, Canada). En plus de me permettre d'accéder au complexe gouvernemental de Bells Corner, il m'a fourni les formulations des bétons et leurs expansions.

7.4.1.1. DESCRIPTION ET CONDITIONNEMENT DES CORPS D'ÉPREUVES

En 1991, le laboratoire CANMET a mis sur pied un programme de recherche visant à évaluer l'efficacité de différents ajouts minéraux (fumées de silice, laitiers...) afin d'inhiber les

effets de la RAG. Dans ce but, plusieurs mélanges de béton contenant divers types de granulats et différentes teneurs en alcalis ont été conçus.

Pour chacune des seize formulations proposées, deux blocs de 40 x 40 x 70 cm et une dalle de 70 x 70 x 15 cm ont été fabriqués. Pour chaque formulation, trois degrés d'endommagement ont été visés en ajoutant des concentrations différentes en alcalis dans l'eau de gâchage.

Depuis leur fabrication, les corps d'épreuves sont conservés à l'extérieur sur le complexe Bells Corner dans la région d'Ottawa (Figure 7. 7).



Figure 7. 7 Site expérimental de Bells Corner

Le seul suivi effectué sur ces blocs et ces dalles est la réalisation de mesures d'expansion. Les essais par des méthodes non destructives (mesures électriques, thermographie infrarouge, radar et impact-écho) sont les premiers réalisés depuis leur fabrication (Rivard *et al.* 2005). D'un point de vue pratique, seuls certains blocs ont été auscultés par les différentes méthodes.

7.4.1.2. FORMULATIONS ET PROPRIÉTÉS DES CORPS D'ÉPREUVES

Parmi les seize mélanges proposés, six ont fait l'objet de cette étude. Ceux-ci ont été sélectionnés parce qu'ils présentent la plus grande variabilité d'expansion parmi l'ensemble des mélanges (Figure 7. 9). Leurs formulations et leurs propriétés à l'état durci sont indiquées dans le Tableau 7. 5.

Les seuls paramètres qui varient de façon significative sont le type de granulat et la teneur en alcalis qui est ici fonction du type de ciment utilisé et de l'ajout de NaOH dans l'eau de gâchage du béton. Le rapport E/C, les dosages en ciment, en granulat et en sable, la masse volumique et la résistance en compression ont des variations très peu significatives.

Il est à noter que la présence d'entraîneur d'air permet de limiter les dégradations liées aux cycles gel-dégel.

Ainsi, il est possible de classer les blocs en trois familles selon le potentiel réactif des granulats vis-à-vis de la RAG (ligne « réactivité » dans le Tableau 7. 5).

Tableau 7.5 Formulations des bétons

	M1	M2	M3	M111	M115	M116
Granulats						
provenance	New-Brunswick			New-Mexique	Québec	
type de roche	grès			gravier volcanique	granite	
réactivité	haute			très haute	non réactif	
Formulation						
ciment	BTA ⁽⁹⁾	Type 10	Type 10	Type 10	BTA	Type 10
E/C	0,42	0,42	0,42	0,40	0,41	0,41
dosage en ciment (kg.m ⁻³)	423	423	425	431	429	431
dosage en granulat (kg.m ⁻³)	1021	1021	1026	1028	1035	1042
dosage en sable (kg.m ⁻³)	683	683	686	685	690	695
Na ₂ O _{éq} (kg.m ⁻³) ⁽¹⁰⁾	1,69	3,81	5,31	3,88	1,72	5,39
masse volumique (kg.m ⁻³)	2303	2303	2317	2317	2331	2345
Propriétés à l'état durci						
f _c à 28 jours	33,9	37,6	36,0	38,3	36,0	29,0

7.4.1.3. MESURE D'ALLONGEMENT

Des plots métalliques ont été fixés sur les blocs au moment de leur fabrication afin de prendre des mesures d'expansion au cours du temps (Figure 7. 8).

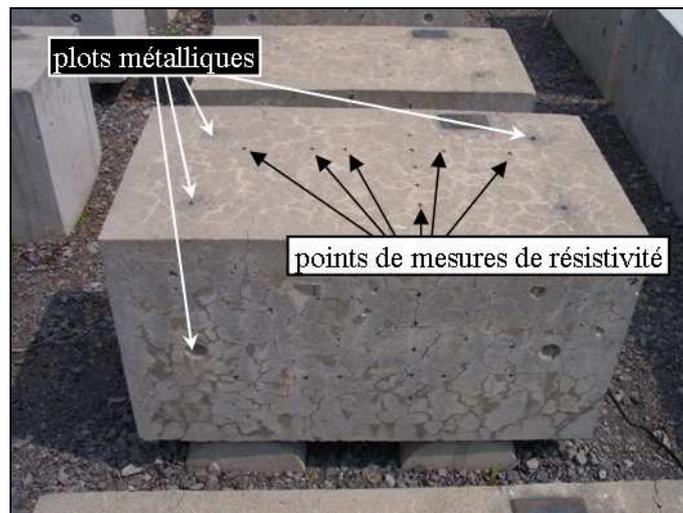


Figure 7.8 Photographie d'un bloc très endommagé par la RAG

Les mesures d'expansion ont été prises à la fois sur la surface du bloc et sur les côtés. L'évolution de l'expansion moyenne des différents blocs étudiés est représentée sur la Figure 7. 9.

⁽⁹⁾ BTA : ciment à Basse Teneur en Alcalis.

⁽¹⁰⁾ Na₂O_{éq} correspond à la teneur en alcalis totaux exprimée en oxyde, en considérant que les seuls alcalis contenus dans le béton sont le sodium et le potassium : Na₂O_{éq}= Na₂O + 0,658.K₂O.

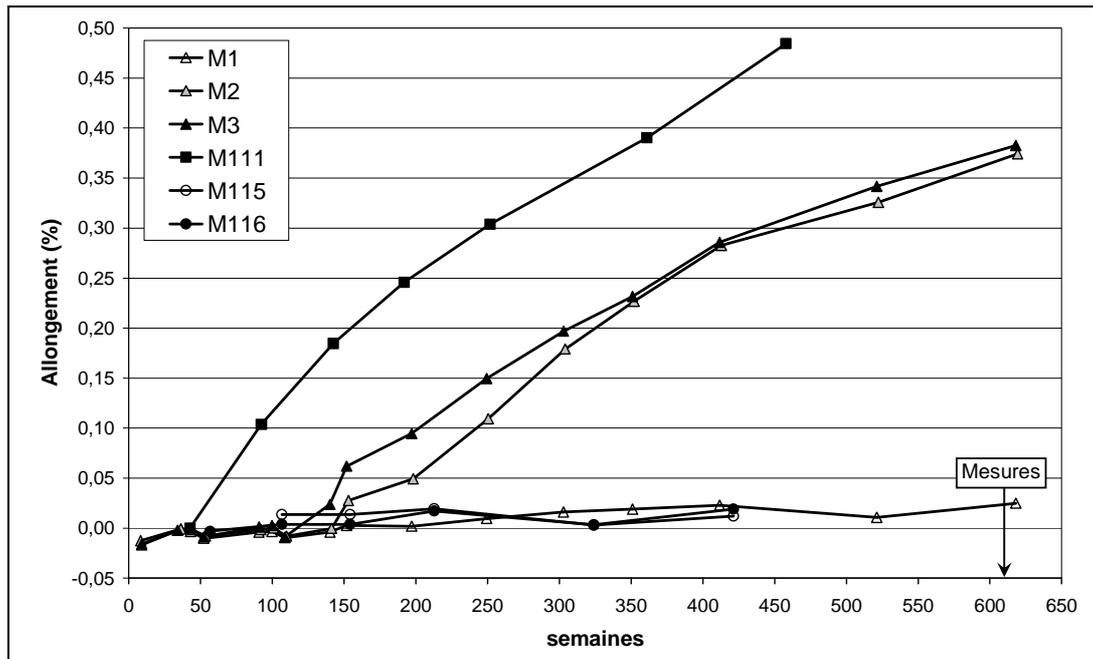


Figure 7.9 Évolution de l'expansion moyenne des blocs depuis leur fabrication

Sur ce graphique, trois familles de blocs peuvent être mises en évidence :

- trois éléments n'ont pas réagi (de ce fait, les mesures d'expansion sur ces blocs ne sont pas prises aussi régulièrement que sur les blocs réactifs) : M115, M116 et M1. Les mélanges M115 et M116 contiennent tous les deux des granulats non-réactifs. Malgré l'ajout de NaOH dans les deux mélanges, ils n'ont pas réagi. Le mélange M1, quant à lui, contient des granulats peu réactifs, et aucun ajout de NaOH n'a été effectué. Pour ces trois mélanges, la très faible expansion mesurée toutefois sur ces blocs ($< 0,025\%$) est probablement due au phénomène de gel/dégel : en effet, les blocs sont conservés depuis une dizaine d'années en extérieur où pendant l'hiver canadien les températures sont excessivement basses ;
- deux éléments ont réagi de façon modérée (M2 et M3). Ces mélanges contiennent des granulats potentiellement réactifs. L'ajout de NaOH dans l'eau de gâchage au moment de leur fabrication favorise le développement de la RAG ;
- un bloc a très fortement réagi (M111). Ce mélange contient des granulats très réactifs et une teneur en alcalis rehaussée.

Les mesures d'expansion sont représentatives du taux de fissuration visible à la surface des blocs. A titre qualitatif et afin d'illustrer notre propos, nous avons représenté sur la Figure 7. 10, dans les cercles grisés, les fissures visibles à la surface des blocs.

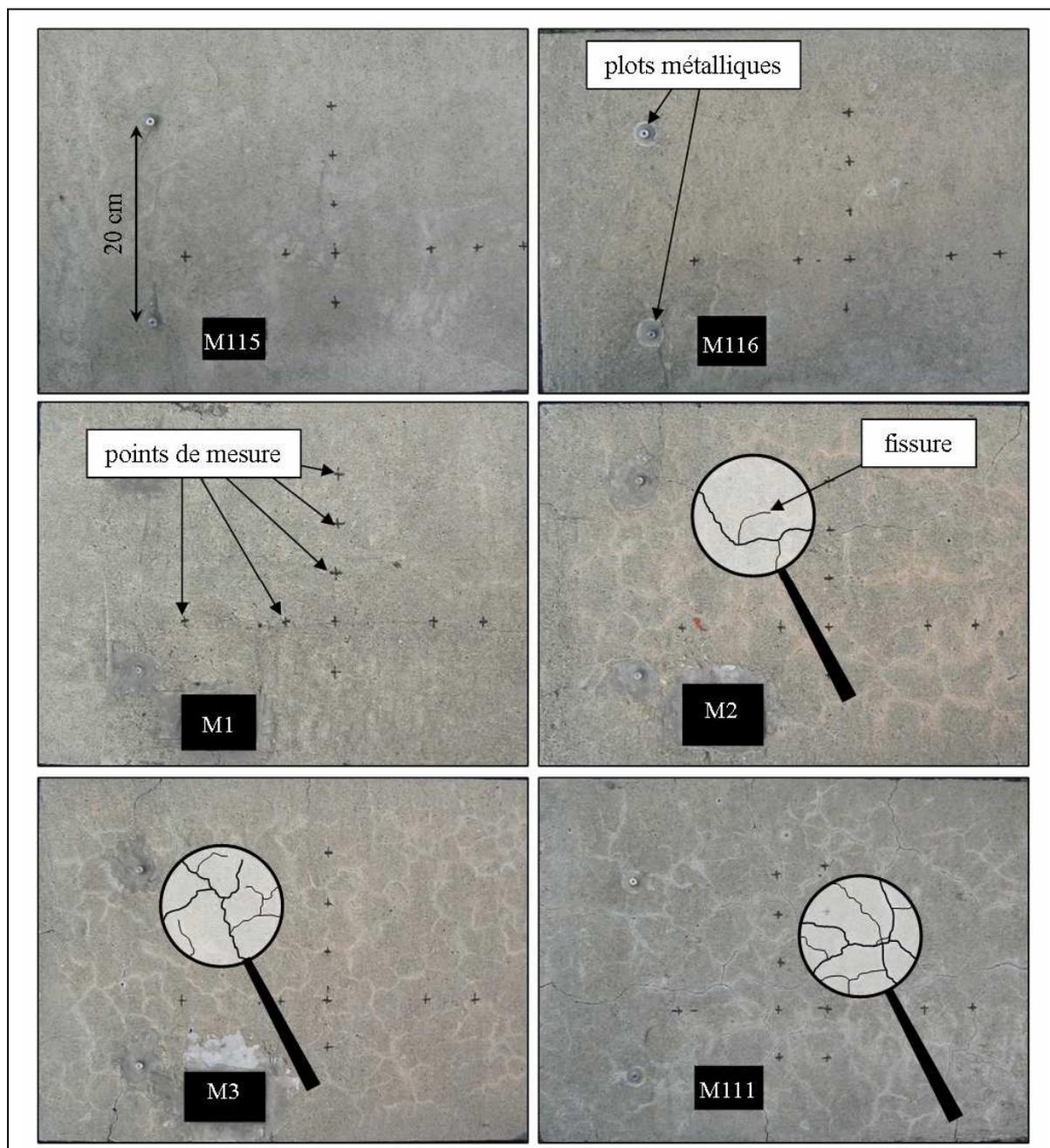


Figure 7.10 Photographie de la surface des blocs auscultés

Ainsi, les blocs M115, M116 et M1, qui n'ont pas réagi, ne présentent pas de fissure à leur surface, alors que le bloc M111 apparaît visiblement comme étant le plus fissuré.

Le classement obtenu à la suite des mesures d'expansion se retrouve par simple observation visuelle de la fissuration présente à la surface du béton. Avec l'expansion, la fissuration est un autre indicateur du degré d'endommagement créé par la RAG.

7.4.1.4. BILAN

Six corps d'épreuve sont auscultés. Les formulations réalisées permettent d'avoir des mélanges atteints par la RAG à des degrés d'endommagement différents. Ainsi, trois mélanges (M115, M116 et M1) servent de référence : aucune expansion n'est mesurée, aucune fissuration

n'est visible à la surface. Un mélange (M111) est au contraire très endommagé : l'expansion est élevée et la fissuration est importante.

Pour chaque mélange, deux blocs sont auscultés (sauf pour le mélange M1) afin, d'une part de vérifier la similitude des deux éléments, et d'autre part de multiplier les points de mesures.

7.4.2. MESURES DE RÉSISTIVITÉ ÉLECTRIQUE

7.4.2.1. PRÉSENTATION DES MESURES

Cinq points de mesure sont positionnés sur une face latérale des blocs. Les deux dimensions du dispositif quadripolaire carré sont utilisées (Q5 et Q10). Les mesures sont effectuées dans deux directions d'injection du courant électrique (α et β) comme indiqué sur la Figure 7. 11. Ainsi, 24 mesures sont réalisées par bloc pour chaque dimension du dispositif et chaque sens d'injection du courant.

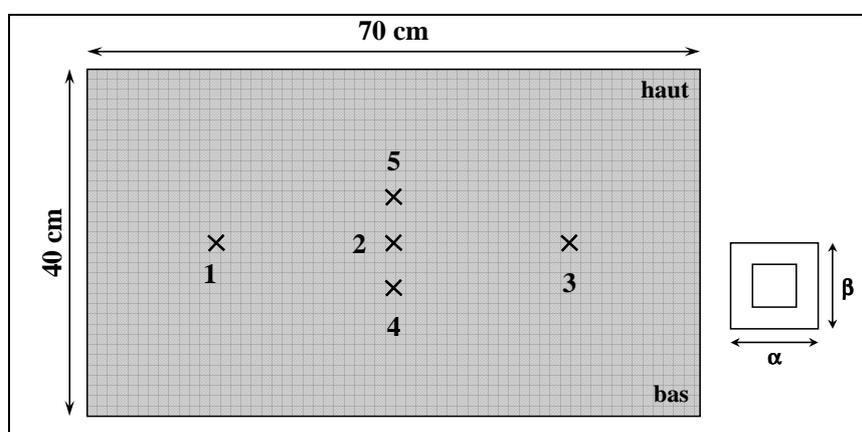


Figure 7. 11 Schématisation du protocole de mesure

Tous les éléments auscultés sont dépourvus d'armatures. Compte tenu de leur taille (40 x 70 x 40 cm) et de la position des points de mesure, les effets dus à leur géométrie (bords et fond) sont négligeables.

Pour chaque bloc, les mesures sont réalisées selon l'ordre des points suivant : 1, 2, 3, 4, 5, 4, 3, 2, 1, 1, 1 et 1. Cela permet d'étudier la dérive et la répétabilité mais également de multiplier les points de mesure et d'augmenter le rapport signal/bruit).

Le protocole d'humidification retenu pour l'auscultation électrique est identique pour tous les blocs. Il a été mis au point sur l'élément a priori le plus résistif. Il se décompose de la façon suivante :

- humidification de la surface pendant 5 min à l'aide d'une brosse humide ;
- séchage à l'air libre pendant 1 min, le temps de laisser l'eau pénétrer dans le bloc.

La Figure 7. 12 représente le résultat des mesures électriques réalisées suivant un profil aller-retour sur l'un des deux blocs M115. Il permet de valider le choix du protocole d'humidification, puisque qu'aucune dérive n'est observée.

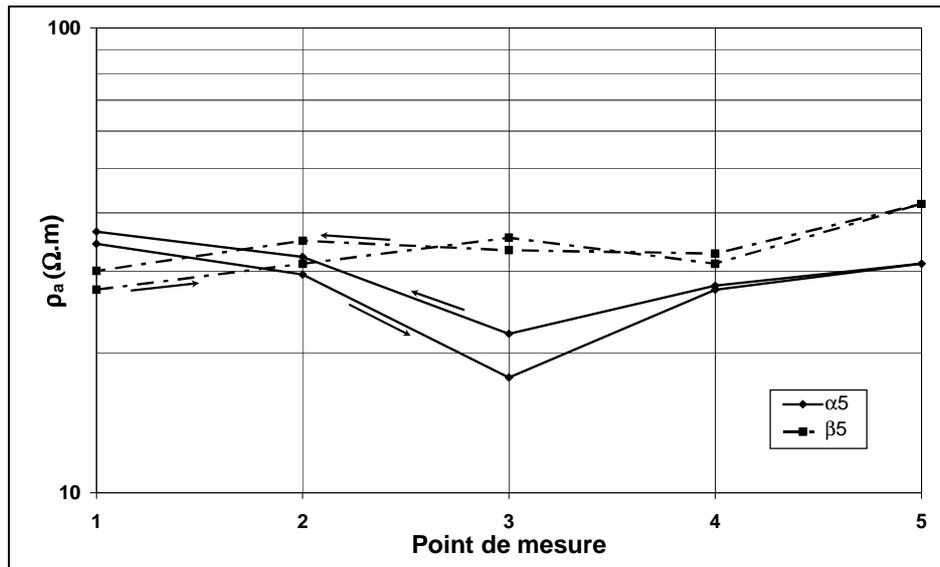


Figure 7.12 Profil aller-retour effectué sur l'un des deux blocs M115 avec le dispositif Q5

L'application de ces protocoles de mesures et d'humidification nécessite environ 15 min par bloc. L'auscultation des 11 blocs nécessite environ 3h de mesure pour une personne.



Figure 7.13 Mesures électriques sur les blocs

7.4.2.2. VARIATIONS DE RÉSISTIVITÉ ÉLECTRIQUE

a. Résultats

La moyenne de la résistivité électrique de chaque bloc a été calculée, en prenant soin d'éliminer par traitements statistiques des données, quelques mesures aberrantes. Associé à cette valeur, le coefficient de variation de la résistivité électrique est calculé. Les résultats sont donnés dans le Tableau 7. 6 pour les mesures effectuées avec le quadripôle de 5 cm de côté et dans le Tableau 7. 7 pour les mesures effectuées avec le quadripôle de 10 cm de côté.

Tableau 7.6 Résistivités électriques mesurées avec le dispositif Q5

Résistivité électrique	M115	M116	M1	M2	M3	M111
nombre de valeurs retenues	48	48	24	48	48	48
moyenne ($\Omega.m$)	34,1	28,7	42,9	25,0	30,7	24,9
CV (%)	28,6	20,7	28,7	34,5	38,9	50,0
Expansion à 450 semaines (%)	< 0,025	< 0,025	< 0,025	$\approx 0,3$	$\approx 0,3$	$\approx 0,5$

Tableau 7.7 Résistivités électriques mesurées avec le dispositif Q10

Résistivité électrique	M115	M116	M1	M2	M3	M111
nombre de valeurs retenues	48	48	22	44	45	46
moyenne ($\Omega.m$)	67,8	76,6	109,4	66,2	144,6	73,5
CV (%)	115,6	58,4	56,8	65,4	135,7	83,8
Expansion à 450 semaines (%)	< 0,025	< 0,025	< 0,025	$\approx 0,3$	$\approx 0,3$	$\approx 0,5$

Les moyennes de résistivité les plus élevées correspondent aux mélanges M115 et M1. Les coefficients de variation de résistivité les plus faibles correspondent aux mélanges M115, M116 et M1. Par ailleurs, la valeur la plus faible de résistivité électrique correspond au mélange M111, et le coefficient de variation le plus élevé correspond à ce même mélange. Ces deux indicateurs, la moyenne de la résistivité et le coefficient de variation associé, ont déjà été utilisés lors de l'étude en laboratoire.

Par ailleurs il est à noter que la totalité des 264 mesures de résistivité électrique effectuées sur les onze blocs avec le dispositif Q5, et quelle que soit l'orientation du dispositif, a des valeurs comprises entre 15 et 70 $\Omega.m$ (Figure 7. 14). Graphiquement les mesures les plus dispersées correspondent au béton M111, mélange le plus réactif (figurés en carrés noirs).

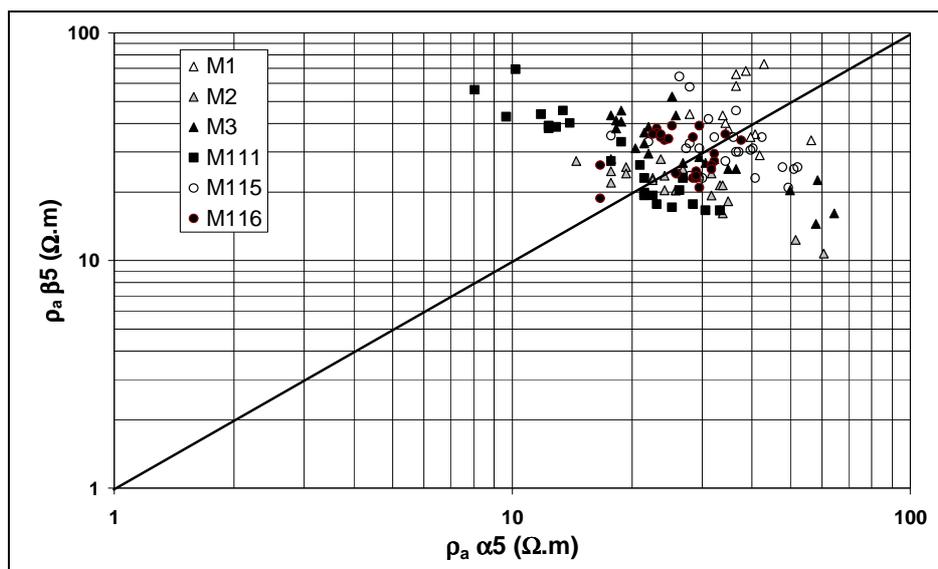


Figure 7.14 Ensemble des mesures réalisées avec le dispositif Q5

Concernant les résultats obtenus avec le dispositif Q10, ni la valeur moyenne de la résistivité électrique ni le coefficient de variation ne semblent être des critères de classification des

différents mélanges. Il est à noter que les coefficients de variation très élevés traduisent une variabilité très importante des mesures (Figure 7. 15).

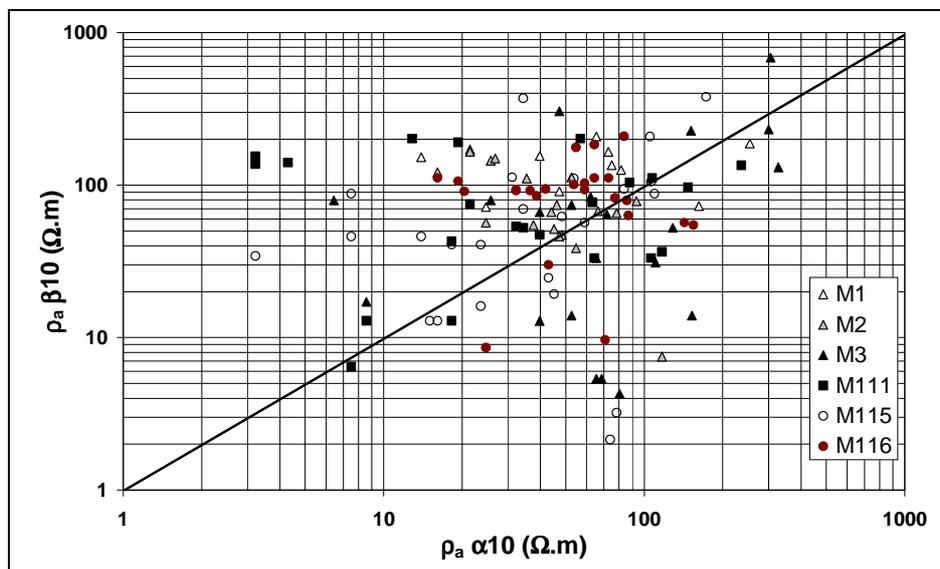


Figure 7. 15 Ensemble des mesures réalisées avec le dispositif Q10

b. Interprétation

Les paramètres de formulation et les mesures du taux d'expansion des blocs permettent de classer les différents mélanges en trois classes : mélanges non réactifs vis-à-vis de la RAG, mélanges réactifs et mélanges très réactifs.

Sur cette expérience, les résultats des mesures de résistivité électrique obtenus pour le dispositif Q5, montrent que la moyenne de la résistivité est la plus faible pour le béton le plus réactif (M111). Cette valeur peut être attribuée à la présence de gel de silice dans les microfissures, cause du gonflement des échantillons. Le coefficient de variation de la résistivité représente la variabilité des mesures. Ainsi la forte valeur de ce coefficient pour le mélange M111 peu être attribuée à l'augmentation de la densité de fissuration.

Les résultats obtenus avec le dispositif Q10 sont trop bruités pour être interprétés.

7.4.2.3. VARIATIONS DE L'ANISOTROPIE ÉLECTRIQUE

a. Résultats

Nous reprenons ici les différentes grandeurs définies lors de l'étude en laboratoire (voir paragraphe 7.3.2.3, page 179) : valeur moyenne du $\text{Log}_{10}An$ (m_{An}), la moyenne de la valeur absolue du $\text{Log}_{10}An$ ($m_{|An|}$), le coefficient de variation de $m_{|An|}$.

Les résultats des variations d'anisotropie sont présentés dans le Tableau 7. 8 pour les mesures effectuées avec le dispositif Q5 et dans le Tableau 7. 9 pour Q10.

Tableau 7. 8 Anisotropie électrique pour le dispositif Q5

Anisotropie électrique	M115	M116	M1	M2	M3	M111
<i>nombre de valeurs retenues</i>	24	24	12	24	24	24
m_{An}	0,03	- 0,04	- 0,07	0,11	- 0,04	- 0,19
$m_{ An }$	0,16	0,12	0,20	0,18	0,25	0,31
CV (%)	72,8	53,0	46,1	123,0	67,1	83,3
Expansion à 450 semaines (%)	< 0,025	< 0,025	< 0,025	≈ 0,3	≈ 0,3	≈ 0,5

Tableau 7. 9 Anisotropie électrique pour le dispositif Q10

Anisotropie électrique	M115	M116	M1	M2	M3	M111
<i>nombre de valeurs retenues</i>	24	24	10	19	21	24
m_{An}	- 0,13	- 0,18	- 0,32	- 0,19	0,14	- 0,34
$m_{ An }$	0,46	0,39	0,47	0,38	0,53	0,47
CV (%)	97,3	58,4	72,8	98,9	71,4	113,3
Expansion à 450 semaines (%)	< 0,025	< 0,025	< 0,025	≈ 0,3	≈ 0,3	≈ 0,5

Pour le dispositif Q5, toutes les valeurs de la moyenne du $\text{Log}_{10}An$ (m_{An}) sont inférieures au seuil de $\pm 0,3$ qui permet la détection des particularités présentant un allongement particulier. La moyenne de la valeur absolue de l'anisotropie électrique ($m_{|An|}$) est faible pour les mélanges M115 et M116 (respectivement 0,16 et 0,12), et forte valeur pour le mélange M111 (0,31).

Concernant les résultats obtenus avec le dispositif Q10, les résultats sont une nouvelle fois très bruités.

b. Interprétation

La moyenne de l'anisotropie électrique (m_{An}) traduit l'anisotropie du matériau à l'échelle d'un échantillon.

Pour les mélanges M115, M116 et M1, non fissurés à la surface, cette valeur est inférieure au seuil de $\pm 0,3$ pour le dispositif Q5. Pour les mélanges M2, M3 et M111, la fissuration étant isotrope à l'échelle de l'échantillon, la moyenne de l'anisotropie électrique (m_{An}) est également inférieure au seuil de $\pm 0,3$.

La moyenne de la valeur absolue de l'anisotropie électrique ($m_{|An|}$) pour le dispositif Q5 permet de classer les différents mélanges : les mélanges non réactifs M115 et M116 ont les plus faibles valeurs d'anisotropie, alors que le mélange M111 a la plus forte valeur. Comme lors des mesures en laboratoire, cette moyenne peut servir d'indicateur de l'endommagement créé par la RAG : plus la réaction est avancée, plus il y a de fissures à la surface du bloc, plus l'expansion est grande, plus la moyenne de la valeur absolue de l'anisotropie électrique ($m_{|An|}$) est élevée.

7.4.2.4. CONCLUSION

La Figure 7. 16 et la Figure 7. 17 illustrent la relation entre la moyenne de résistivité électrique et la moyenne de la valeur absolue de l'anisotropie électrique ($m_{|An|}$) en fonction du niveau d'expansion des différents blocs. Ces graphiques permettent de visualiser l'influence de la RAG (représentée par l'expansion) et la mesure électrique (résistivité ou anisotropie calculée avec Q5). Etablir une corrélation entre ces différents paramètres est très difficile étant donné le peu de

points et les différentes compositions du béton. Néanmoins, il semble se dessiner une tendance sur les deux graphiques : avec l'expansion, la résistivité électrique diminue et l'anisotropie augmente. Ces résultats demandent encore à être confirmés par d'autres expériences, notamment en utilisant plusieurs éprouvettes de même formulation mais atteintes à divers degrés d'endommagement.

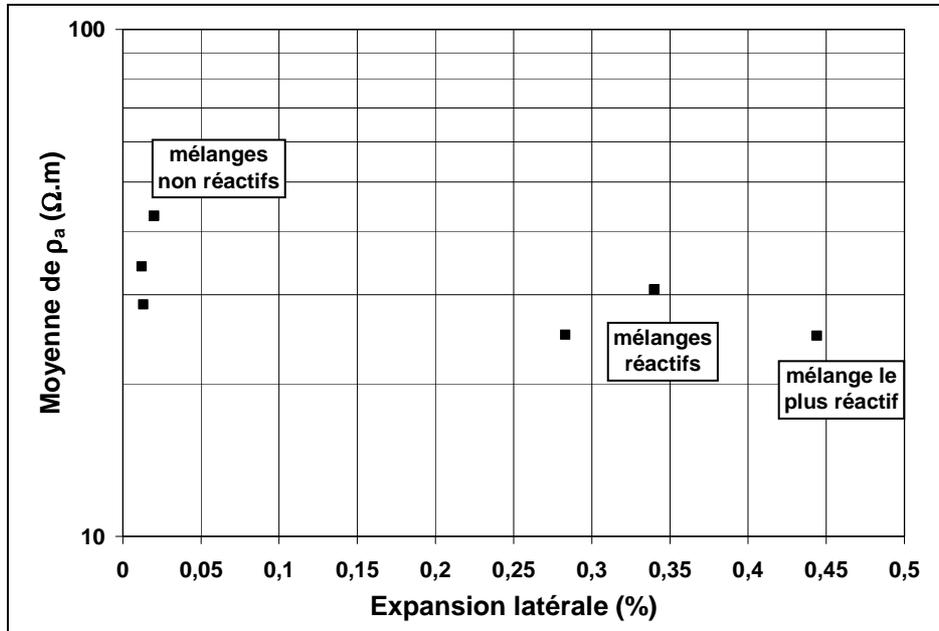


Figure 7. 16 Moyenne de la résistivité électrique mesurée avec le dispositif Q5 en fonction de l'expansion latérale des blocs

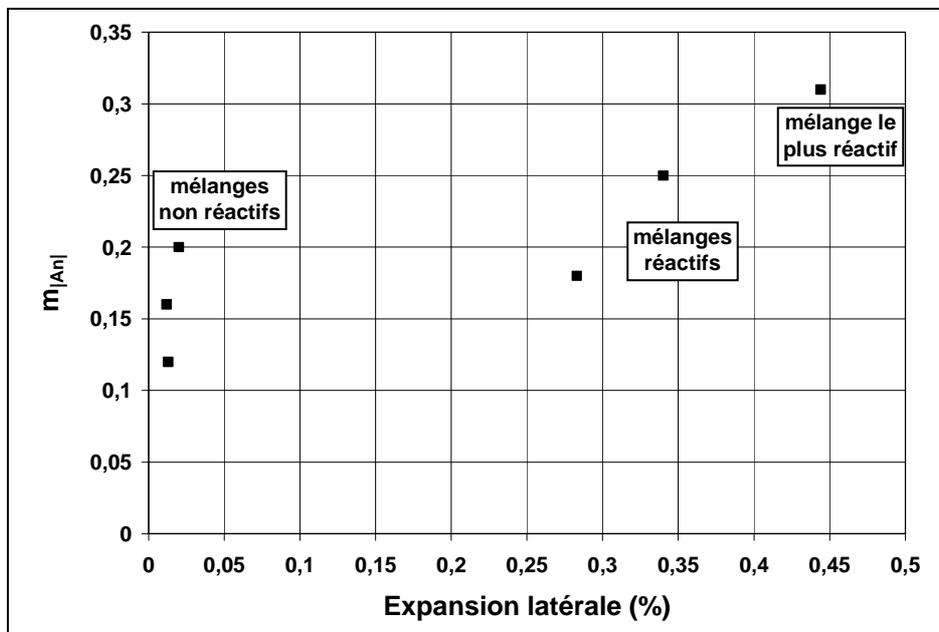


Figure 7. 17 Moyenne de la valeur absolue de l'anisotropie électrique mesurée avec le dispositif Q5 en fonction de l'expansion latérale des blocs

7.4.3. MESURES PAR THERMOGRAPHIE INFRAROUGE PASSIVE

Les mesures par thermographie infrarouge passive sont réalisées sur les six blocs déjà auscultés en électrique.

7.4.3.1. PROTOCOLE DE MESURE

L'auscultation est effectuée à l'aide de la caméra infrarouge ThermaCam PM 575 (FLIR Systems). Les images thermiques sont prises à une hauteur de 1,5 m de la surface auscultée. A cette distance de la cible et avec une ouverture standard de l'objectif de la caméra, la dimension des images est de 0,65 x 0,50 m. La valeur du coefficient d'émissivité du béton utilisée pour les mesures ($\epsilon = 0,94$). Ainsi, la température apparente de surface lue sur les images thermiques est proche de la température vraie avec une précision de $\pm 2\%$ et une résolution thermique de $0,2^\circ\text{C}$.



Figure 7. 18 Mesures par thermographie infrarouge passive

Trois séries de mesures sont réalisées au cours de la journée sur les surfaces supérieures de chaque blocs : à 9h30, 12h30 et 16h00. Le comportement thermique du béton est suivi au cours du temps.

Deux images thermiques sont nécessaires pour couvrir la totalité de la surface de chaque bloc. Une tige métallique positionnée au milieu du bloc permet d'avoir un repère thermique. Les plots utilisés pour les mesures d'expansion sont également repérables (Figure 7. 19).

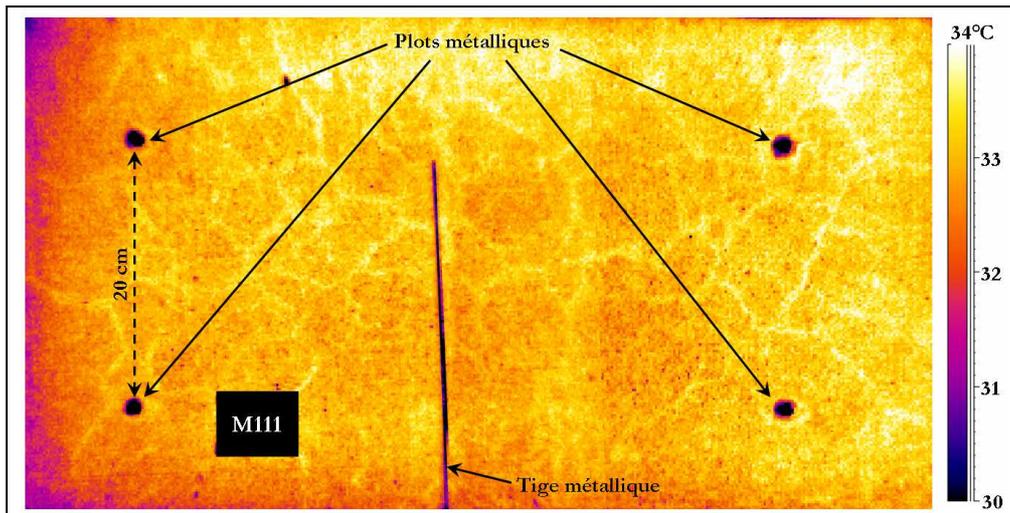


Figure 7.19 Image thermique de la surface du bloc M111, le plus fissuré

7.4.3.2. CONDITIONS ENVIRONNEMENTALES

Afin d'interpréter correctement les mesures par thermographie infrarouge, il est nécessaire d'enregistrer les paramètres environnementaux. La Figure 7.20 représente l'évolution de la température de l'air et de l'humidité relative de l'air au cours de la journée de mesure. Ces paramètres sont enregistrés en continu à l'aide d'un capteur, placé à l'ombre.

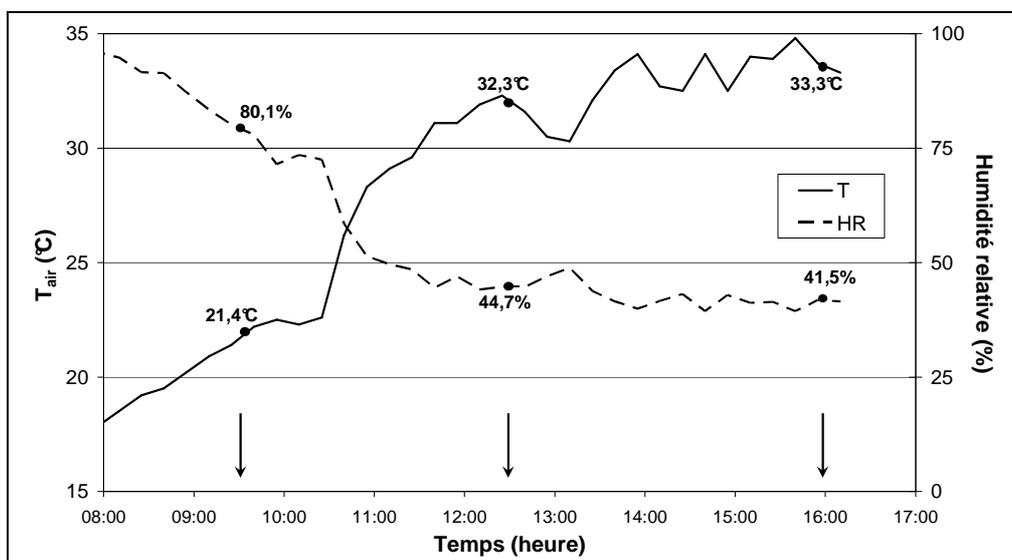


Figure 7.20 Évolution de la température de l'air et de l'humidité relative

7.4.3.3. RÉSULTATS ET INTERPRÉTATION

L'objectif des mesures par thermographie infrarouge passive est d'estimer la sensibilité de la méthode vis-à-vis de l'endommagement créé par la RAG. La forte présence d'eau dans le béton, la formation de micro et macro fissures et la présence de gel de silice, sont autant de paramètres susceptibles de modifier les propriétés thermiques du béton.

Nous nous intéressons ici à la température moyenne de surface des corps d'épreuve auscultés. Cette moyenne est calculée sur l'ensemble de la surface des blocs, sans tenir compte du

patron de fissuration. Les objets métalliques ne sont également pas pris en compte dans le calcul. D'autres traitements des images thermiques sont en cours dans le cadre d'un travail plus spécifique à l'étude de la fissuration créée par la RAG et notamment la « reconnaissance des patrons de dégradation des ouvrages en béton par analyse texturale » (Kabir 2005).

Les résultats des mesures par thermographie infrarouge passive sont donnés dans le Tableau 7. 10. La moyenne de température ainsi que l'écart-type sont donnés pour chaque bloc et pour chaque séance de mesure.

La Figure 7. 21 représente l'évolution de la température moyenne de la surface des blocs.

Tableau 7. 10 Résultats des mesures par thermographie infrarouge

T (°C)	Air ambiant	M115	M116	M1	M2	M3	M111
9h30	21,4	24,9 ±0,3	25,0 ±0,2	26,3 ±0,3	25,5 ±0,4	25,2 ±0,4	20,7 ±0,2 ⁽¹¹⁾
12h30	32,3	31,7 ±0,3	32,7 ±0,3	32,7 ±0,3	31,7 ±0,3	33,0 ±0,4	31,3 ±0,3
16h00	33,3	33,6 ±0,3	34,0 ±0,3	33,7 ±0,3	33,1 ±0,3	33,0 ±0,3	33,0 ±0,3
Expansion à 450 semaines (%)		< 0,025	< 0,025	< 0,025	≈ 0,3	≈ 0,3	≈ 0,5

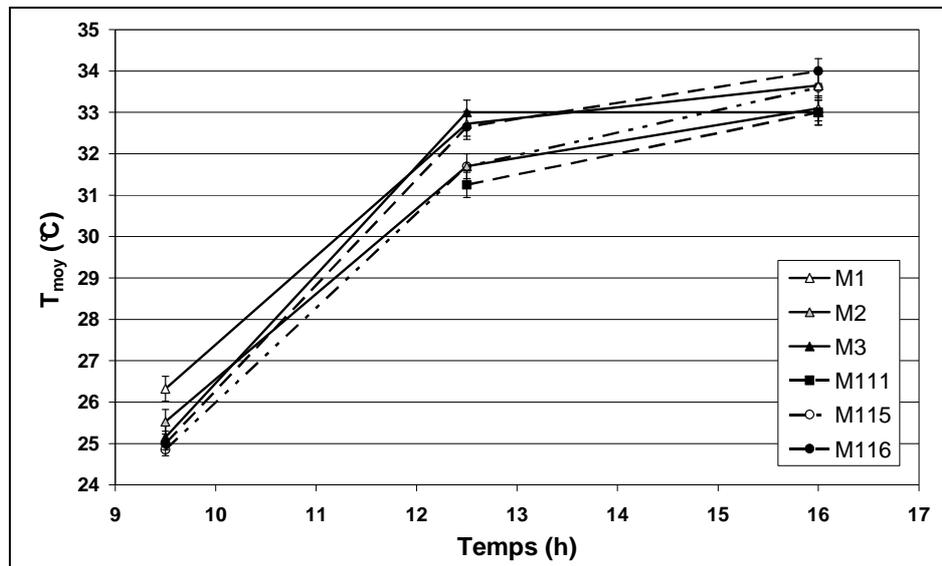


Figure 7. 21 Évolution de la température moyenne de la surface des blocs

Au vu des résultats présentés dans le Tableau 7. 10 et sur la Figure 7. 21, un béton atteint par la RAG n'a pas un comportement thermique significativement différent d'un béton sain. En se basant sur l'étude de l'inertie thermique des bétons, il semble difficile d'utiliser la thermographie infrarouge passive comme outil d'évaluation de l'endommagement créé par la RAG.

Les premiers résultats obtenus par thermographie infrarouge passive concordent avec ceux obtenus en laboratoire : les propriétés thermiques d'un béton endommagé par la RAG ne sont pas significativement différentes de celles d'un béton sain.

Plusieurs pistes d'interprétation peuvent être proposées :

⁽¹¹⁾ A 9h30, le bloc est à l'ombre d'un arbre. La température de surface de ce bloc n'est pas représentative.

- les fissures sont très petites et de très faible ouverture par rapport au volume total de l'échantillon ausculté ;
- les propriétés thermiques du gel de silice sont peu différentes de celle du béton, et sa proportion est très faible par rapport au volume de béton ;
- les effets de la fissuration, de la présence de gel et d'eau s'annulent entre eux.

7.4.3.4. CONCLUSION

Ce chapitre vise à montrer l'intérêt de l'utilisation de la thermographie infrarouge passive comme outil d'évaluation de l'endommagement du béton créé par la RAG. L'étude du comportement thermique global du matériau ne semble pas être sensible à cet endommagement. En effet, l'inertie thermique d'un béton endommagé n'est pas significativement différente de celle d'un béton sain. La méthode reste néanmoins très efficace pour l'étude du patron de fissuration du béton.

7.5 SYNTHÈSE

Du fait de l'ampleur de l'endommagement créé par la **réaction alcalis-granulats** (RAG) et de ses conséquences, on cherche actuellement à prédire l'évolution future du gonflement et des dégradations sur les ouvrages atteints. Pour cela, il est nécessaire de pouvoir évaluer le degré d'avancement de cette pathologie. Dans le domaine du CND, son diagnostic est surtout tourné vers l'utilisation des méthodes ultrasoniques, mais sans véritable succès. Il n'existe aujourd'hui aucune méthode qui permette d'évaluer le degré d'avancement de la réaction.

Dans un premier temps, une étude de la **sensibilité des méthodes** est réalisée. Les mesures d'allongement permettent de vérifier la réactivité des éprouvettes vis-à-vis de la RAG. La **moyenne de la résistivité**, le **coefficient de variation de la résistivité**, et la **moyenne de la valeur absolue de l'anisotropie électrique** sont des indicateurs de l'endommagement généré par la réaction : avec l'avancement de la réaction, la moyenne de la résistivité diminue, le coefficient de variation augmente et la moyenne de la valeur absolue de l'anisotropie augmente. Les variations des propriétés électriques s'expliquent par le développement d'un réseau de fissures isotrope à l'échelle de l'ouvrage, mais anisotrope à l'échelle de la mesure. De plus, les propriétés du gel de silice présent dans les fissures contribuent à ces variations.

Dans un second temps, l'**application sur site** permet de valider certaines hypothèses faites quant à la sensibilité de la méthode électrique, mais également d'étudier pour la première fois le comportement thermique de bétons atteints par la RAG. Cette étude est réalisée sur six formulations différentes de béton.

En ce qui concerne les **mesures électriques**, les conclusions suivantes sont obtenues pour le petit dispositif quadripolaire (5 cm de côté) :

- la **moyenne de la résistivité** est un critère non suffisant pour distinguer les différents corps d'épreuve testés, même si la valeur la plus faible correspond à l'échantillon le plus endommagé, comme dans l'étude en laboratoire ;
- le **coefficient de variation de la résistivité** dépasse le seuil de 30% pour tous les corps d'épreuve réactifs. En deçà de cette valeur, les corps d'épreuve testés apparaissent comme étant non réactifs. Cette variabilité de la mesure s'explique par la présence des fissures sur la surface auscultée ;
- la **moyenne de l'anisotropie électrique** est proche de zéro pour tous les corps d'épreuves. Cette valeur traduit l'isotropie du matériau à l'échelle de l'élément ;
- la **moyenne de la valeur absolue de l'anisotropie électrique** est beaucoup plus élevée pour les éléments réactifs que pour les éléments sains. Cette valeur traduit l'anisotropie du matériau à l'échelle de la mesure ;
- les résultats obtenus avec le grand dispositif quadripolaire (10 cm de côté) sont plus bruités (coefficients de variation élevés) et donc plus difficilement interprétables que les mesures réalisées avec le petit dispositif (5 cm de côté).

En ce qui concerne les mesures par **thermographie infrarouge** passive, le comportement thermique des différents corps d'épreuve testés n'est pas révélateur de l'endommagement créé par la RAG. En effet les **variations de température** de surface mesurées au cours de la journée, et donc l'inertie thermique du béton, sont trop proches les unes des autres. Ce paramètre ne permet pas de classer les échantillons. Ces résultats confirment ceux obtenus en laboratoire (par la méthode du fil chauffant).

Les premiers résultats obtenus par mesures de résistivité électrique laissent penser que la méthode permet une évaluation des variations relatives à la surface d'un ouvrage (Klysz *et al.* 2006). L'utilisation de cette méthode permet alors de zoner l'ouvrage, et de différencier les zones saines des zones plus ou moins atteintes par la RAG. Concernant les mesures thermiques, les résultats obtenus montrent une faible sensibilité des propriétés thermiques vis-à-vis de la RAG.

Pour la poursuite des travaux en électrique, je suggère d'exploiter seulement les mesures obtenues avec le petit dispositif quadripolaire carré (Q5) : les résultats obtenus avec le dispositif Q10 ne sont pas concluants. Dans la méthodologie d'exploitation des données, trois indicateurs de l'endommagement créé par la RAG peuvent être calculés : la moyenne de la résistivité, le coefficient de variation de la résistivité et la moyenne de la valeur absolue de l'anisotropie électrique.

Enfin, l'ensemble des résultats demandent à être confirmés par d'autres expérimentations, en utilisant notamment un seul type de béton atteint à différents degrés d'endommagement par la RAG.

CHAPITRE 8 : AIDE À LA CARACTÉRISATION DE LA FISSURATION ET DE LA DÉLAMINATION

Ce chapitre vise à mettre en évidence la sensibilité des deux méthodes (thermographie infrarouge passive et mesures de résistivité électrique) vis-à-vis de la fissuration et de la délamination. Pour cela, des essais sont réalisés sur site.

8.1 INTRODUCTION

La fissuration (ou la délamination) présente à la surface (ou au sein) d'un ouvrage de génie civil témoigne généralement d'un endommagement ou d'une faiblesse mécanique de cet élément (à l'exception des fissures de retrait). Elle nécessite donc une attention toute particulière. Sa détection et sa caractérisation (densité, ouverture, profondeur, évolution) ont été identifiées comme des besoins importants de la part des maîtres d'ouvrages (OECD-NEA 1998). Or, actuellement il n'existe pas de méthode unique capable de fournir toutes les informations recherchées. La solution réside donc dans le développement et le couplage de différentes techniques (Lataste *et al.* 2003).

8.1.1. DÉFINITIONS

8.1.1.1. LA FISSURATION

La fissuration dans le béton est l'un des phénomènes qui affecte le plus sa détérioration (Büyüköztürk 1998). Ses causes peuvent être d'origine structurale (surcharge, chocs, séismes...), thermique (changements de température, action du gel-dégel...), chimique (RAG, attaques par les ions sulfates ...), dues à la corrosion des armatures (carbonatation...), ou encore au retrait du béton.

Elle peut être à l'origine d'altérations du matériau. A l'échelle du matériau, le rôle de l'enrobage est essentiellement d'assurer une protection des armatures : cette barrière ralentit, voire empêche, la progression d'agents extérieurs susceptibles de les corroder, et elle maintient autour de l'acier des conditions favorables à sa passivation (Raharinaivo *et al.* 1998). Or, la présence d'une fissure crée localement une augmentation préjudiciable de la perméabilité du béton, l'enrobage ne jouant plus alors sa fonction d'étanchéité face aux liquides ou aux gaz. La fissure peut alors initier ou accélérer le processus de pollution du béton et de la corrosion des armatures. De plus, elle constitue un chemin d'accès privilégié des éléments agressifs vers le cœur

du béton (Laurencet *et al.* 2000). Dans tous les cas, c'est un facteur aggravant de l'endommagement des structures en béton qui nécessite une attention particulière.

Pour l'étude de la fissuration des ouvrages, plusieurs degrés d'information sont possibles (Lataste *et al.* 2002) : sa détection et son identification, sa localisation et la définition de son étendue, sa typologie (fissure traversante, délamination...), sa géométrie (profondeur, ouverture...), son intensité (densité de fissuration...), son remplissage et son évolution temporelle.

Le Tableau 8. 1 rappelle les principales techniques d'auscultation appropriées à l'étude des fissures in situ.

Tableau 8.1 Principales techniques non destructives d'étude de la fissuration et de la délamination (adapté de OECD-NEA 1998)

méthodes	détection	localisation	anomalie distinguée	caractérisation
inspection visuelle	partielle	partielle	fissures débouchantes en surface	orientation, état d'humidité, ouverture
acoustique	oui	oui	fissures débouchantes en surface délaminations	profondeur des délaminations, suivi de propagation
thermographie infrarouge	oui	oui	fissures débouchantes en surface et actives délaminations	extensions latérales
résistivité électrique	oui	oui	fissures débouchantes en surface délaminations	orientation, état d'humidité
interférométrie	oui	oui	fissures débouchantes en surface délaminations	orientation
chaîne et marteau	oui	oui	délaminations	

8.1.1.2. LA DÉLAMINATION

La délamination est une forme particulière de fissuration. Bursanescu (2003) en distingue deux types :

- la délamination : dans le cas d'un béton armé, c'est une discontinuité au sein du matériau parallèle à la surface se situant généralement au niveau du plan des barres d'armature (Figure 8. 1). Elle est souvent une conséquence de la corrosion des armatures (Figure 8. 2) ;
- le décollement : dans le cas d'une route, c'est la séparation entre l'enrobé bitumineux et la dalle de béton.



Figure 8.1 Photographie d'une délamination due à la corrosion de l'armature

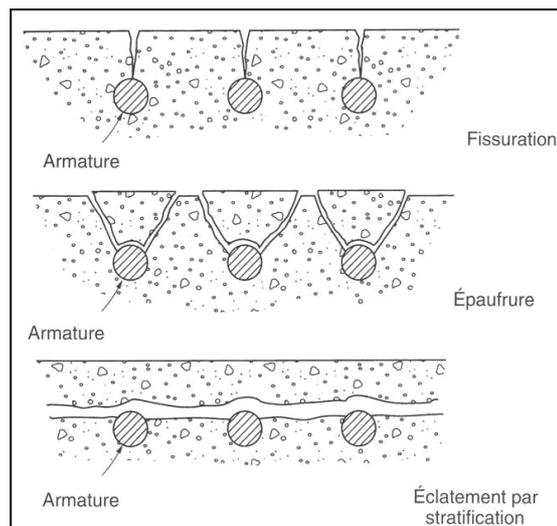


Figure 8.2 Représentation schématique des désordres provoqués par la corrosion des barres d'armature (d'après Neville 2000)

Dans les deux cas, il n'y a bien souvent pas de symptôme visible à l'œil. En général, on utilise la méthode dite « du marteau et de la chaîne ». Mais cette méthode est très lente. Il est donc nécessaire d'avoir recours aux méthodes d'auscultation telles que la thermographie infrarouge pour déceler ce type d'altération (Tableau 8. 1).

8.1.2. L'END

8.1.2.1. LA MESURE ÉLECTRIQUE

Lataste (2002) a étudié l'influence de la **fissuration** sur la mesure de résistivité électrique. Numériquement, il a montré que les paramètres tels que la résistivité de la fissure (fissure conductrice ou isolante⁽¹²⁾) et l'orientation du dispositif quadripolaire carré (injection parallèle ou perpendiculaire à la fissure) influent sur la mesure de résistivité apparente. Dans le cas d'une injection du courant perpendiculairement à une fissure conductrice, celle-ci n'est pas détectée. Les fissures isolantes sont détectées pour des contrastes de résistivité plus faibles que les fissures conductrices. De plus, la technique est sensible à la profondeur des fissures. Les mesures réalisées sur corps d'épreuve, appuyées par les modélisations numériques, montrent une relation entre la profondeur de fissuration et la résistivité électrique. Les variations de l'anisotropie électrique mesurées à l'aplomb d'une fissure sont d'autant plus importantes que la fissure est profonde. Enfin, la technique est sensible à l'ouverture de la fissure. Relativement aux résultats obtenus sur un matériau sain, plus l'ouverture de la fissure est grande, plus les variations de résistivité ou de l'anisotropie électriques sont importantes.

En ce qui concerne la **délamination**, Lataste (2002) a montré, à travers une étude sur site, que les variations de résistivités apparentes confirment la sensibilité de la méthode à la présence

⁽¹²⁾ On considère une fissure sèche, a priori inactive, comme isolante, et une fissure humide, voire saturée, comme conductrice.

d'une zone de délamination. Ce type d'altération est détecté et localisé par la mesure électrique, mais à ce stade de la recherche, sa profondeur n'est qu'estimée.

On comprend alors à travers cette étude la complémentarité des mesures pour les deux configurations du dispositif qui souligne l'intérêt du choix initial de la géométrie carrée.

8.1.2.2. LA MESURE PAR THERMOGRAPHIE INFRAROUGE

L'eau et l'air ont des valeurs faibles de conductivité thermique par rapport au béton (1,5 à $3 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$), respectivement de $0,597 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ et $0,0257 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$. Cela explique que la présence d'un vide rempli d'air ou d'eau puisse affecter la distribution de la température de surface lorsqu'il existe un flux de chaleur à travers le béton (Figure 8. 3). En fait, la présence d'un vide dans une dalle a un effet isolant localement, ce qui se remarque au niveau du transfert de chaleur et de la température à la surface. Selon que le transfert de chaleur s'effectue de l'extérieur vers la dalle ou de la dalle vers l'extérieur, le vide crée un point chaud ou un point froid à sa surface.

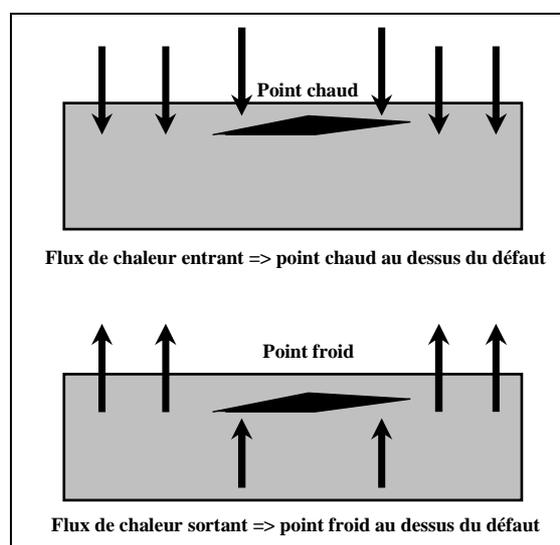


Figure 8. 3 Effet d'un vide sur la propagation de la chaleur d'une dalle en béton (d'après Carino 2003)

Ces deux cas de figure se rencontrent naturellement : ils correspondent au rayonnement diurne et au refroidissement nocturne. La thermographie infrarouge peut alors être utilisée selon deux démarches :

- une étude instantanée (Weil *et al.* 1998, Moropoulou *et al.* 2001, Stimolo 2003) : l'inspection est réalisée à un instant donné et permet de mettre en évidence des gradients thermiques entre deux zones ;
- une étude multi-temporelle : les thermogrammes d'une même scène thermique sont pris à différents moments de la journée de telle façon que les conditions climatiques entraînent l'inversion des phénomènes thermiques en surface. On étudie alors les variations de la température des thermogrammes pris à des instants différents. Cela

permet de mettre en évidence des zones avec des propriétés thermo-physiques différentes à partir des changements de gradients thermiques constatés.

En 1988, l'American Society for Testing and Materials (ASTM) a publié une norme (ASTM D 4788-88) concernant les conditions de l'utilisation de la thermographie infrarouge comme outil de détection et de localisation des zones de délamination pour des dalles en béton de tabliers de pont. Il y est notamment précisé que la surface doit être exempte de tout débris et que les mesures doivent être effectuées par un ciel dégagé au moins 24h après des précipitations.

Au stade de la recherche actuelle, la thermographie infrarouge passive ne permet pas de déterminer la profondeur et l'épaisseur de la zone delaminée.

8.2 ETUDE SUR SITE

8.2.1. PRÉSENTATION DE L'OUVRAGE

Les investigations sont menées sur le Pont de la Poudrerie (Figure 8. 4), l'un des trois ponts d'Empalot, près de Toulouse (31). Cet ouvrage a été ausculté dans le cadre des activités du projet RGC&U et avec le soutien logistique du LRPC de Toulouse.

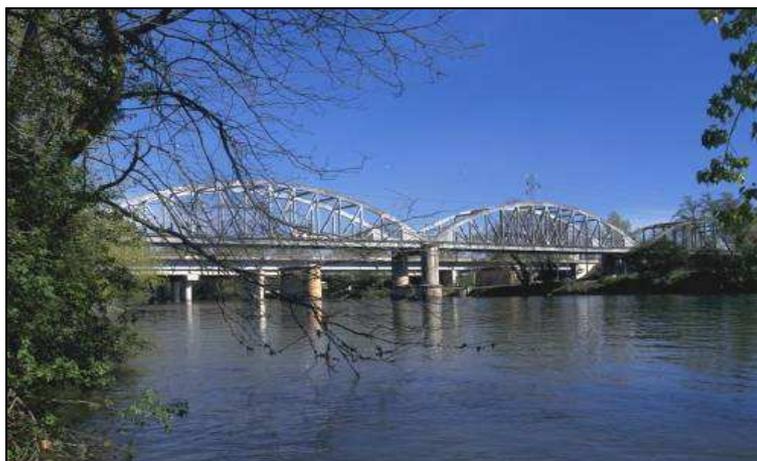


Figure 8. 4 Vue de la rive gauche, côté amont, du pont de la Poudrerie à Empalot

Ce pont en béton armé, à Bow-string, comporte quatre travées pour une longueur totale de 170 m. La travée 4 (rive droite), détruite lors d'un bombardement en 1944 puis reconstruite en 1952, est située au dessus d'une route, la travée 1 (rive gauche) partiellement sur une route et sur la Garonne, les autres travées enjambant la Garonne. La travée 1 a été naturellement retenue du fait de son accessibilité aisée et des pathologies reconnue sur ce secteur.

Les désordres observés, outre divers problèmes de fonctionnement et de sous-dimensionnement, sont : éclatements du béton avec aciers corrodés apparents, suspentes et diagonales fortement dégradées, très faible enrobage des aciers, fissuration, défauts d'étanchéité du hourdi et venues d'eau sur les culées.

Deux zones d'étude sont retenues au niveau de la travée 1 : des mesures en sous face des dalles 5 et 6, côté amont d'une part, et coté aval d'autre part. Ces deux zones présentent des états différents d'altération (Figure 8. 5).

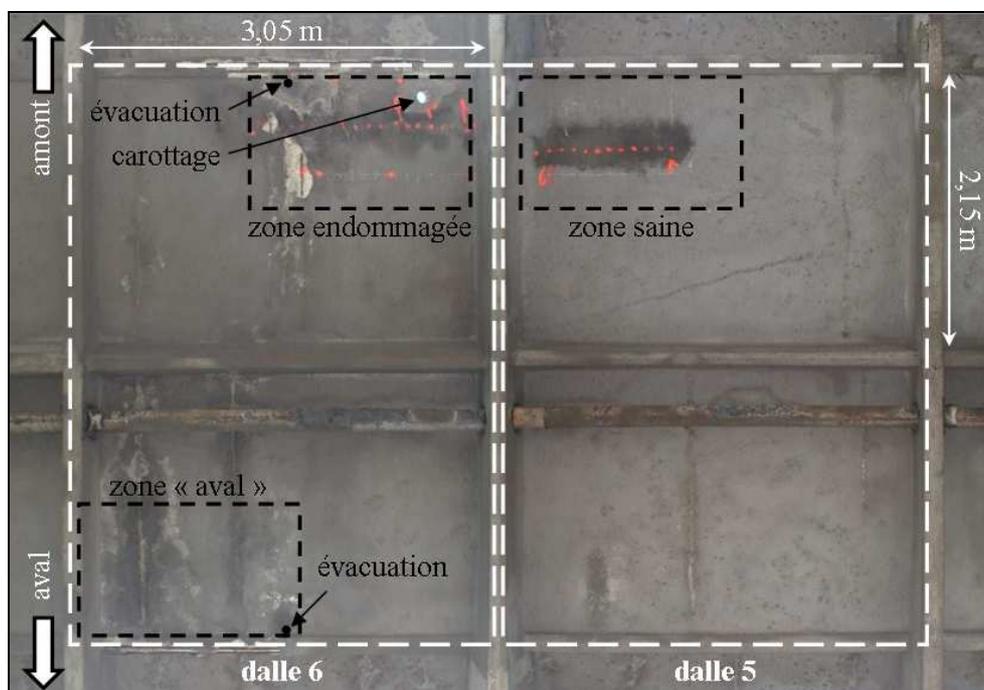


Figure 8. 5 Photographie de l'intrados du Pont d'Empalot

8.2.2. MESURES EN SOUS FACE, COTÉ AMONT

Il s'agit de zoner deux secteurs qui présentent visiblement des états d'altération très différents : du côté amont, la dalle 5 apparaît saine, alors que la dalle 6 présente des variations d'altérations et d'humidité visibles à sa surface (Figure 8. 5).

8.2.2.1. MESURES PAR THERMOGRAPHIE INFRAROUGE

A l'aide de la caméra infrarouge ThermaCAMTM SC 2000, des images thermiques sont réalisées. La caméra est placée au sol sur un trépied, à une distance de 4,5 m de la scène thermique (Figure 8. 6). Cette distance est mesurée avant chaque prise par distancemètre laser. La taille de l'image est d'environ 1,4 x 1,9 m². L'émissivité du béton est considérée égale à 0,95.



Figure 8. 6 Mise en place du dispositif

Deux séances de mesures sont réalisées : une première séance le matin, entre 10h et 11h et une seconde en fin d'après-midi, entre 17h30 et 18h. La température ambiante est de 16°C lors de la première séance de mesure et 12,5°C lors de la seconde.

Au cours des deux séances de mesure, la température à la surface de la dalle 5 est homogène : avec une valeur moyenne de 14,1°C pour la séance du matin et de 16,2°C pour la séance de l'après midi. Cette homogénéité thermique confirme les observations visuelles faites sur cette dalle qui apparaît comme saine.

Concernant la dalle 6, l'étude des images thermiques, pour les deux séances de mesures montre que la température de la surface n'est pas homogène (Figure 8. 7).

Sur ces images, les zones homogènes ont une température moyenne de 14,1°C et 16,2°C, respectivement pour les mesures du matin et celles de l'après-midi. Au vu des résultats de la dalle voisine, ces zones sont considérées comme saines. Il est alors possible de calculer la différence de température ΔT entre ces zones saines et les anomalies thermiques mises en évidence : il apparaît deux zones plus chaudes que leur environnement (béton sain dont la température moyenne de surface est identique à celle de la dalle 5), sur les images thermiques du matin, et plus froides sur celles de l'après-midi. Il y a ici, inversion des contrastes thermiques entre le béton sain et les différentes anomalies thermiques repérées (voir Figure 3. 4, page 55).

Après vérification au marteau, ces deux zones correspondent à des délaminations. Les images thermiques permettent alors de délimiter très précisément ces zones.

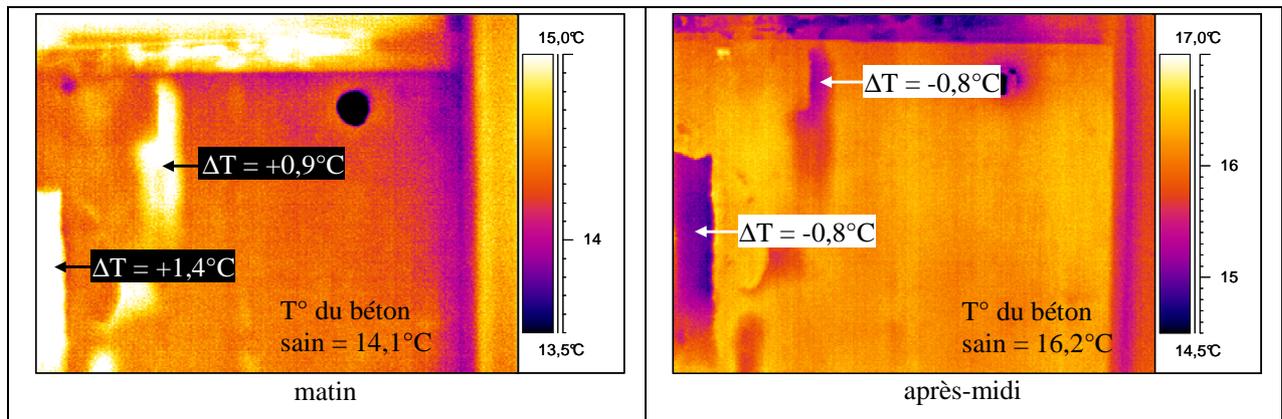
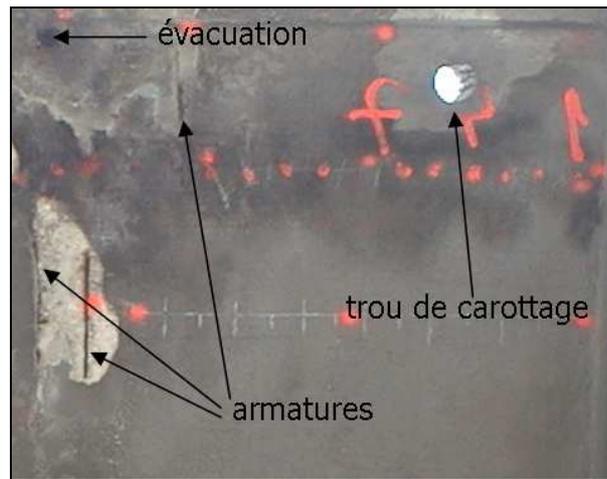


Figure 8.7 Images visible et thermique de l'intrados des dalles 6, côté amont

8.2.2.2. MESURES DE RÉSISTIVITÉ ÉLECTRIQUE

L'utilisation du pachomètre permet la localisation des armatures dans les deux zones d'étude (Figure 8. 8). Les points de mesures de résistivité électrique sont alors positionnés au centre des mailles formées par les armatures, de telle sorte que la valeur de résistivité soit le moins influencée par la présence des barres d'aciers. Ainsi, six points de mesures sont déterminés sur la dalle 5, et huit sur la dalle 6.

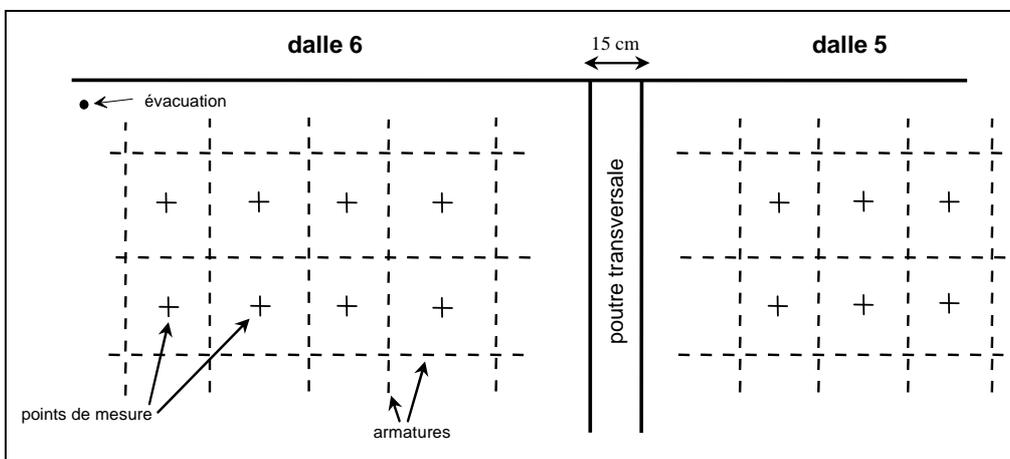


Figure 8.8 Repérage des armatures à l'intrados des dalles 5 et 6, côté amont

Les mesures sont réalisées avec le quadripôle carré pour les deux écartements entre électrodes (5 et 10 cm) et avec les deux directions d'injection du courant électrique (α et β). Après l'analyse des données, cela permet d'obtenir une valeur moyenne de résistivité pour chaque maille et pour un écartement donné.

Le protocole de mesure a consisté en une humidification avec un brumisateur, pendant 30 min en continu. Les mesures sont réalisées immédiatement après.

Les résultats sont présentés sur la Figure 8. 9.

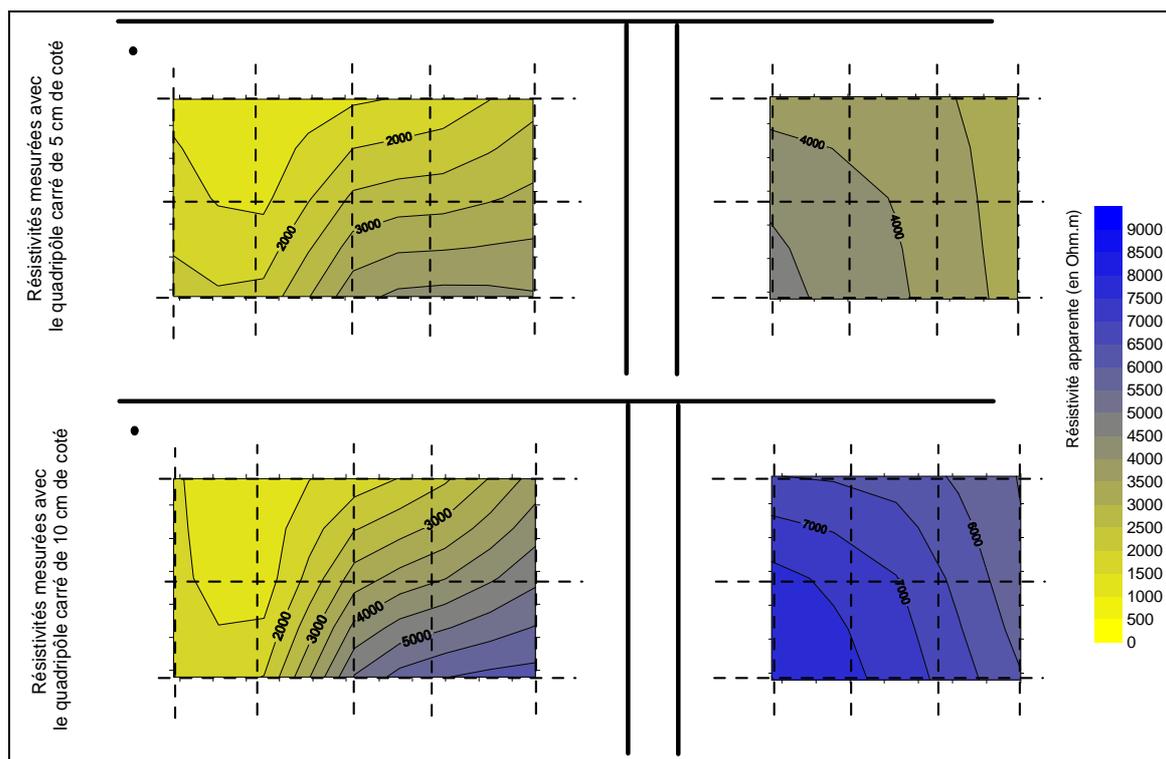


Figure 8. 9 Résultats du zonage par mesures de résistivité électrique à l'intrados des dalles 5 et 6, du côté amont

On note tout d'abord la différence des gammes des résistivités entre la dalle 5 saine et la 6 présumée altérée, pour les deux écartements entre électrodes. Il apparaît également que le béton est plus résistant en profondeur (mesures avec Q10) qu'en surface (mesures avec Q5), sauf au droit du secteur le plus conducteur de la dalle 6, qui est visiblement très altéré, et qui présente les mêmes valeurs de résistivité quelle que soit la taille du dispositif (entre 1000 et 1500 Ω .m).

La concordance des résultats de résistivité électrique avec les mesures capacitives réalisées sur la même zone confirme que la technique donne une image des variations de l'humidité du béton (RGC&U 2003).

8.2.2.3. CONCLUSION

Lors de cette étude, la mesure par thermographie infrarouge a permis de mettre en évidence deux zones de délamination à la surface des dalles auscultées. Ces zones sont invisibles à

l'œil. Par ailleurs, la mesure de résistivité électrique donne une image des variations de l'humidité à la surface du béton.

Les deux techniques utilisées ici donnent deux informations différentes mais complémentaires.

8.2.3. MESURES EN SOUS FACE, COTÉ AVAL

La deuxième étude porte sur l'intrados de la dalle 6, côté aval du pont. Parcourue par deux grandes fissures transversales, cette dalle apparaît visiblement très endommagée (Figure 8. 10). La zone d'étude représente plus spécifiquement le quart de la dalle dans lequel les deux fissures sont visibles.

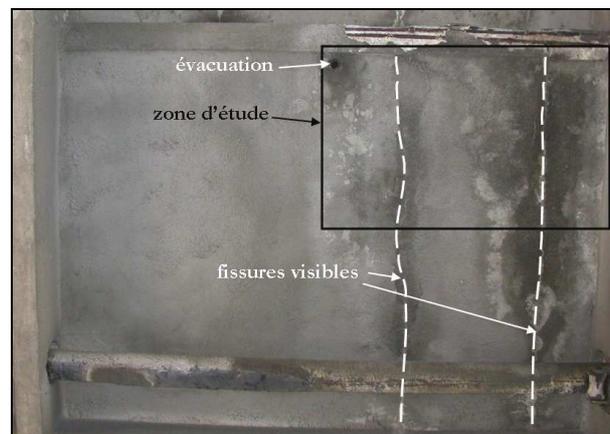


Figure 8. 10 Photographie de l'intrados de la dalle 6

8.2.3.1. MESURES PAR THERMOGRAPHIE INFRAROUGE

Le protocole de mesure est le même que pour l'auscultation des dalles 5 et 6 côté amont (voir paragraphe 8.2.2.1, page 204).

La présence de la gouttière d'évacuation d'eau dans le coin supérieur gauche des images, ainsi que de la poutre transversale à droite de l'image permettent un repérage spatial facile des différentes anomalies thermiques. La distance entre l'évacuation et le bord de la poutre transversale est de 1,55 m (Figure 8. 11).

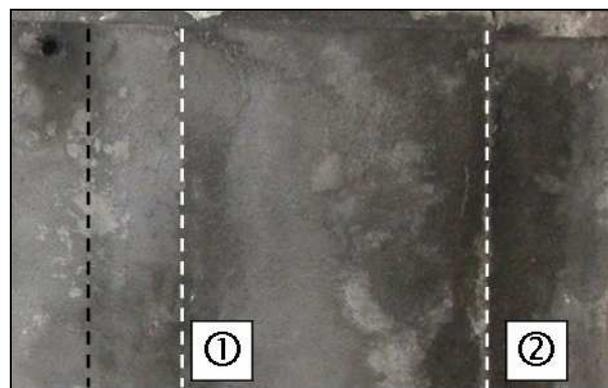


Figure 8. 11 Image visible de la scène thermique étudiée

Les Figure 8. 13 et Figure 8. 14 représentent les images thermiques prises respectivement le matin et l'après-midi. A chacune d'elles sont associés les profils de température repérés sur les images thermiques : un profil vertical court (en blanc) et un profil horizontal long (en noir). Sur ces images, les armatures sont figurées en traits pointillés (en noir). Sur les différents profils, le trait en pointillé noir correspond à la température moyenne du béton sain.

Les images thermiques permettent de mettre en évidence :

- deux anomalies thermiques de forme allongée, référencées ① et ②, sont visibles. Leur emplacement correspond aux deux fissures repérées sur l'image visible (Figure 8. 10). Elles apparaissent ici avec un contraste de température significatif avec le béton environnant considéré comme sain : $\delta T = +0,4^{\circ}\text{C}$ le matin et $\delta T = -0,6^{\circ}\text{C}$ l'après-midi. L'emplacement de ces fissures correspond aux pics de température repérables sur les profils. Ces deux anomalies se situent au droit d'une armature, probablement corrodée.
- la fissure ①, après vérification par un test au marteau, apparaît associée à une délamination sur sa partie droite. Ceci explique le caractère dissymétrique du profil de température de part et d'autre de la fissure ;
- il en est de même pour la fissure ② : dans ce cas, la délamination apparaît répartie de façon symétrique de part et d'autre de la fissure, centrée au droit de l'armature ;
- deux autres anomalies thermiques, référencés ③ et ④, sont repérées sur les images thermiques avec, respectivement, un contraste de température δT de $+0,4$ et $+0,3^{\circ}\text{C}$ pour la séance du matin, et $-0,7$ et $-0,8^{\circ}\text{C}$ pour la séance de l'après-midi. Après vérification par un test au marteau, ces deux zones correspondent à des délaminations. Leurs profils de température ont des pentes moins marquées que dans le cas des fissures ;
- la délamination ③ est au droit d'une armature. Le pic de température de cette zone correspond à cette armature (Figure 8. 12).

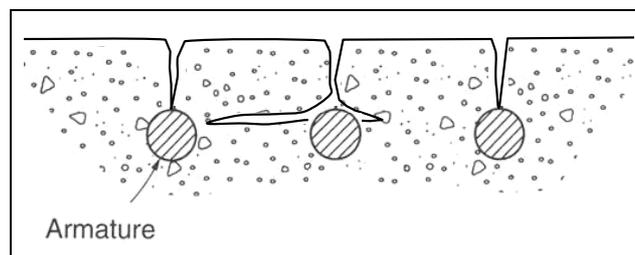
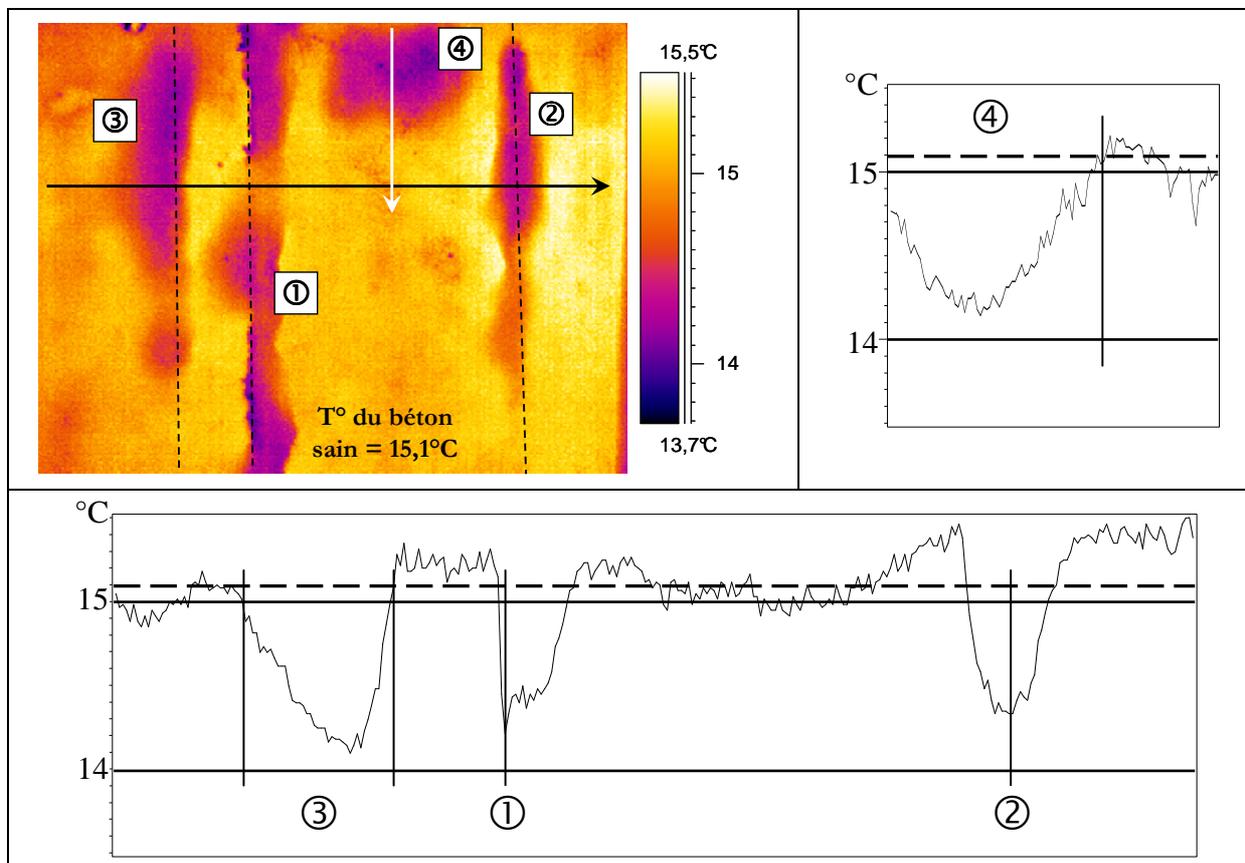
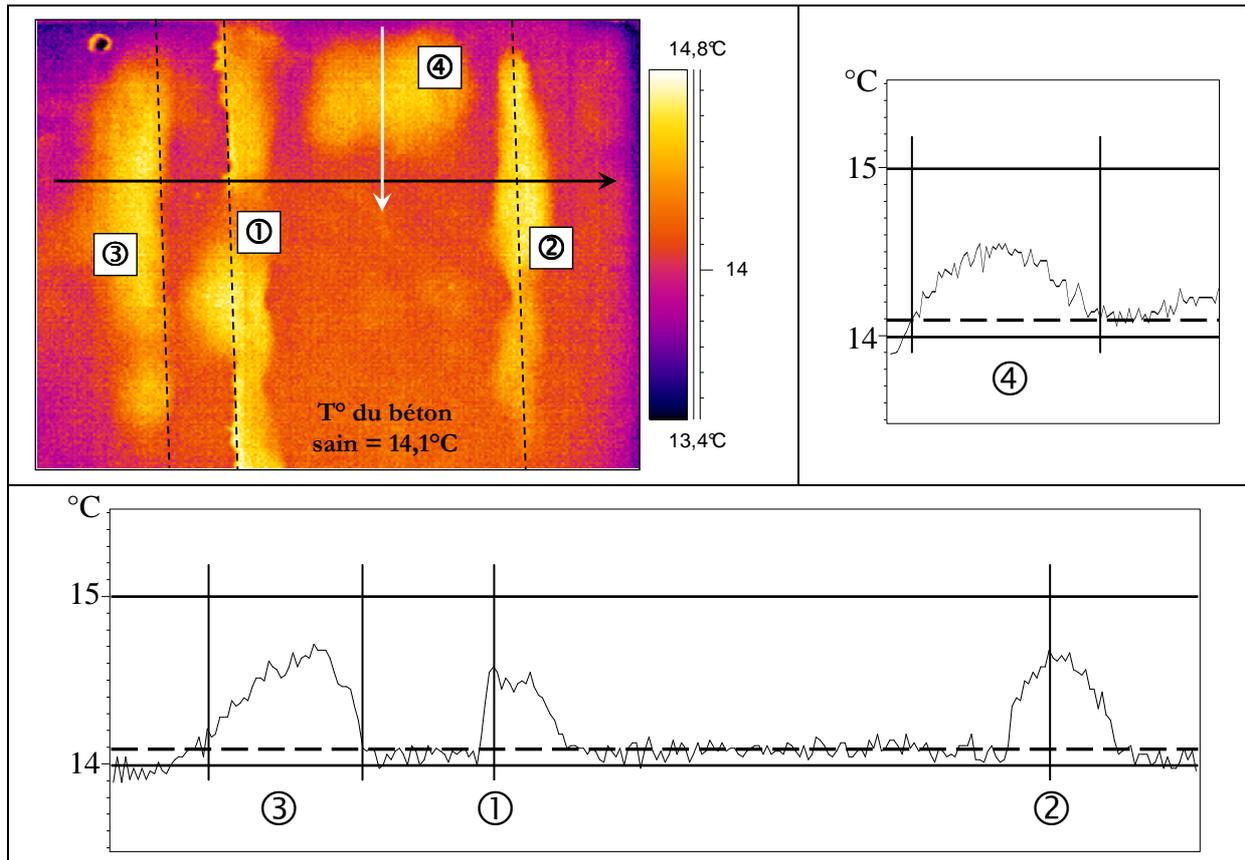


Figure 8. 12 Fissuration et délamination au droit d'une armature



Le Tableau 8. 2 reprend les résultats de ces deux études instantanées effectuées par méthode de thermographie infrarouge passive. Le δT correspond à la différence entre la température moyenne du béton sain et celle de l'anomalie considérée.

Les contrastes de température au niveau des deux fissures sont égaux, ce qui présume de fissures identiques. Situées toutes deux au droit d'une armature, ces anomalies sont interprétées comme étant des désordres provoqués par la corrosion (premier cas de la Figure 8. 2).

Concernant les deux délaminations, les contrastes thermiques sont différents. Ceci peut s'expliquer par des profondeurs ou des épaisseurs différentes de délamination.

Tableau 8. 2 Résultats de l'étude instantanée

anomalies			δT (°C)	
réf.	type	visible	matin	après-midi
①	fissure	oui	+ 0,4	-0,6
②	fissure	oui	+0,4	-0,6
③	délamination	non	+0,4	-0,7
④	délamination	non	+0,3	-0,8

L'étude multi-temporelle permet d'évaluer le comportement thermique au cours du temps, afin de mettre en évidence les zones ayant des propriétés thermophysiques différentes (Tableau 8. 3). Les deux fissures ($\Delta T = 0^\circ C$), d'une part, et les deux zones de délamination ($\Delta T = -0,1^\circ C$), d'autre part, ont des inerties thermiques identiques.

Tableau 8. 3 Résultats de l'étude multi-temporelle

	T_{matin} (°C)	$T_{\text{après-midi}}$ (°C)	ΔT (°C)
air	16	12,5	-3,5
béton sain	14,1	15,1	+1,0
fissure ①	14,5	14,5	0
fissure ②	14,5	14,5	0
délamination ③	14,5	14,4	-0,1
délamination ④	14,4	14,3	-0,1

8.2.3.2. MESURES DE RÉSISTIVITÉ

Les mesures de résistivité électrique sont réalisées le long des deux profils déjà étudiés en thermographie infrarouge : un longitudinal et un transversal.

Le choix de la position de ces deux profils est motivé par :

- le plan de ferrailage mis en évidence grâce au pachomètre ;
- les altérations probables de la dalle, repérées par les observations visuelles et lors des mesures infrarouges.

Ces informations sont synthétisées sur la Figure 8. 15.

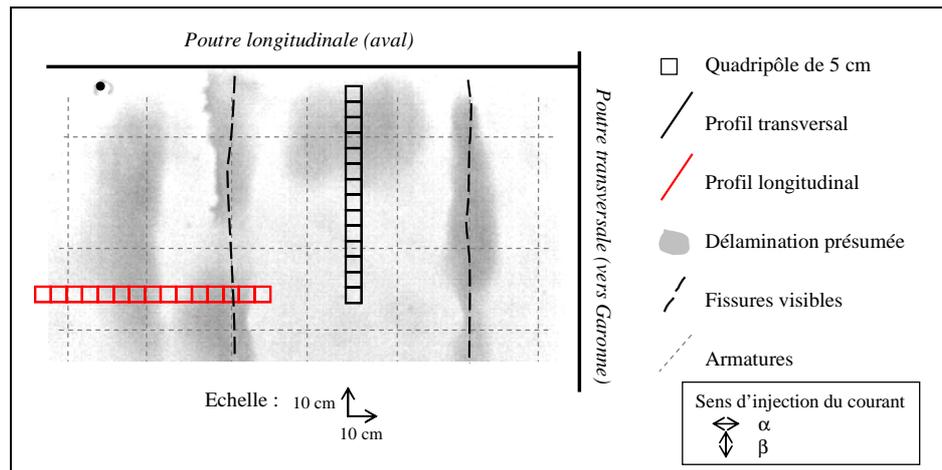


Figure 8.15 Localisation des profils électriques

Les mesures sont réalisées avec le quadripôle carré pour les deux écartements entre électrodes (5 et 10 cm). Les deux configurations du dispositif pour l'injection du courant sont utilisées (α et β).

Le protocole de mesure a consisté en une humidification avec un brumisateuse, pendant 20 min en continu. Les mesures sont réalisées immédiatement après.

Les résultats (Figure 8. 16 et Figure 8. 18) sont donnés distinctement pour les deux dispositifs utilisés (Q5 et Q10). Les variations de la température de surface mesurées par thermographie infrarouge sont également représentées. Les Figure 8. 17 et Figure 8. 19 sont les variations de l'anisotropie respectivement pour le profil longitudinal et transversal.

a. Profil Longitudinal

Les résultats des variations de résistivités sont présentés sur la Figure 8. 16. Ils permettent de mettre en évidence :

- les gammes de résistivité électrique sont comparables pour les deux dispositifs utilisés (Q5 et Q10) ;
- pour les deux dispositifs, les résistivités mesurées présentent des fluctuations importantes. Celles-ci semblent liées à la présence des armatures ;
- qualitativement, pour les deux dispositifs, il apparaît que les fluctuations des résistivités en configuration β (injection perpendiculaire au profil de mesure) semblent plus représentatives des variations de l'état de la structure : α apparaît plus bruité ;
- les fluctuations de température permettent de localiser les zones probables d'altération.

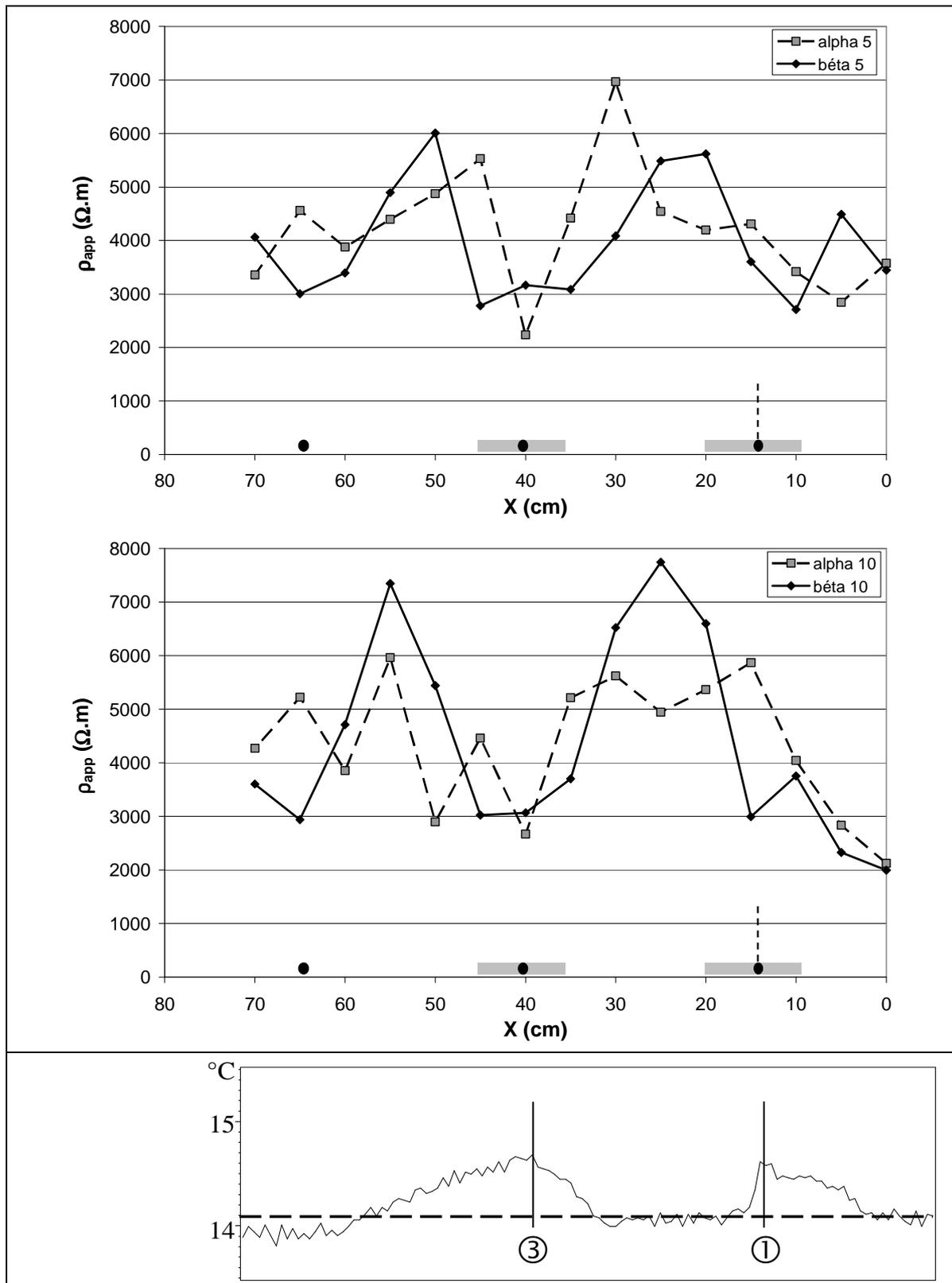


Figure 8.16 Variations de la résistivité électrique et de la température de surface sur le profil longitudinal

L'étude des anisotropies électriques obtenues sur le profil longitudinal ne permet pas de faire ressortir d'information supplémentaire (Figure 8.17). Tout en restant entre le seuil de $\pm 0,3$, les variations les plus importantes de l'anisotropie sont situées à l'endroit des armatures.

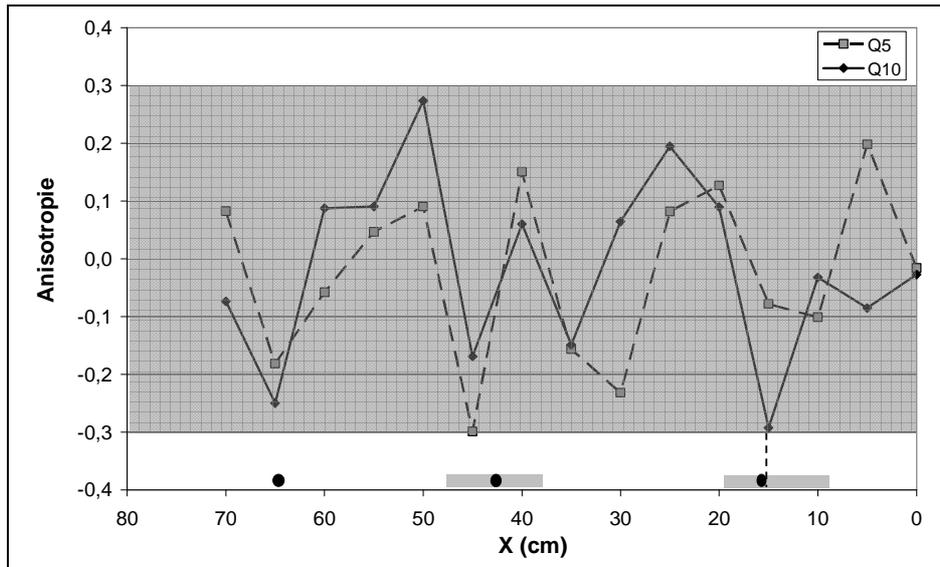


Figure 8.17 Variations de l'anisotropie le long du profil longitudinal

b. Profil Longitudinal

Les résultats des variations de résistivités sont présentés sur la Figure 8. 18. Ils permettent de mettre en évidence :

- les gammes de résistivité électrique sont comparables pour les deux dispositifs utilisés, en dehors de trois points de mesure (Q5 et Q10) ;
- qualitativement, pour les deux dispositifs, il apparaît que les fluctuations des résistivités en configuration β (injection parallèle au profil de mesure) semblent plus représentatives des variations de l'état de la structure : α apparaît plus bruité ;
- les profils (quels que soient les configurations et les dispositifs) présentent deux parties distinctes : une première partie ($X < 25$ cm) où la résistivité apparente est très faible ($< 1000 \Omega.m$), puis une seconde partie ($X > 25$ cm) où des fortes perturbations de résistivité sont mesurées. La seconde partie du profil est située au dessus de la délamination suspectée ;
- un léger décalage en abscisse est observé pour le début de l'augmentation de la résistivité respectivement avec les dispositifs de 5 et 10 cm de côté. Ce phénomène traduit une variation de la profondeur de la délamination. Cette information reste à vérifier et dans le cas le plus favorable pourrait donner des informations sur le pendage du décollement ;
- avec le dispositif Q10, deux pics de perturbations sont relevés ($X = 30$ et 55 cm) dans la configuration alpha (injection perpendiculaire au sens de progression du profil), avec les données acquises et les observations faites, il n'y a pas d'explication évidente à ce phénomène ;
- les amplitudes des perturbations sont plus importantes avec le dispositif de 10 cm de côté : la résistivité apparente maximale dépasse $3000 \Omega.m$.

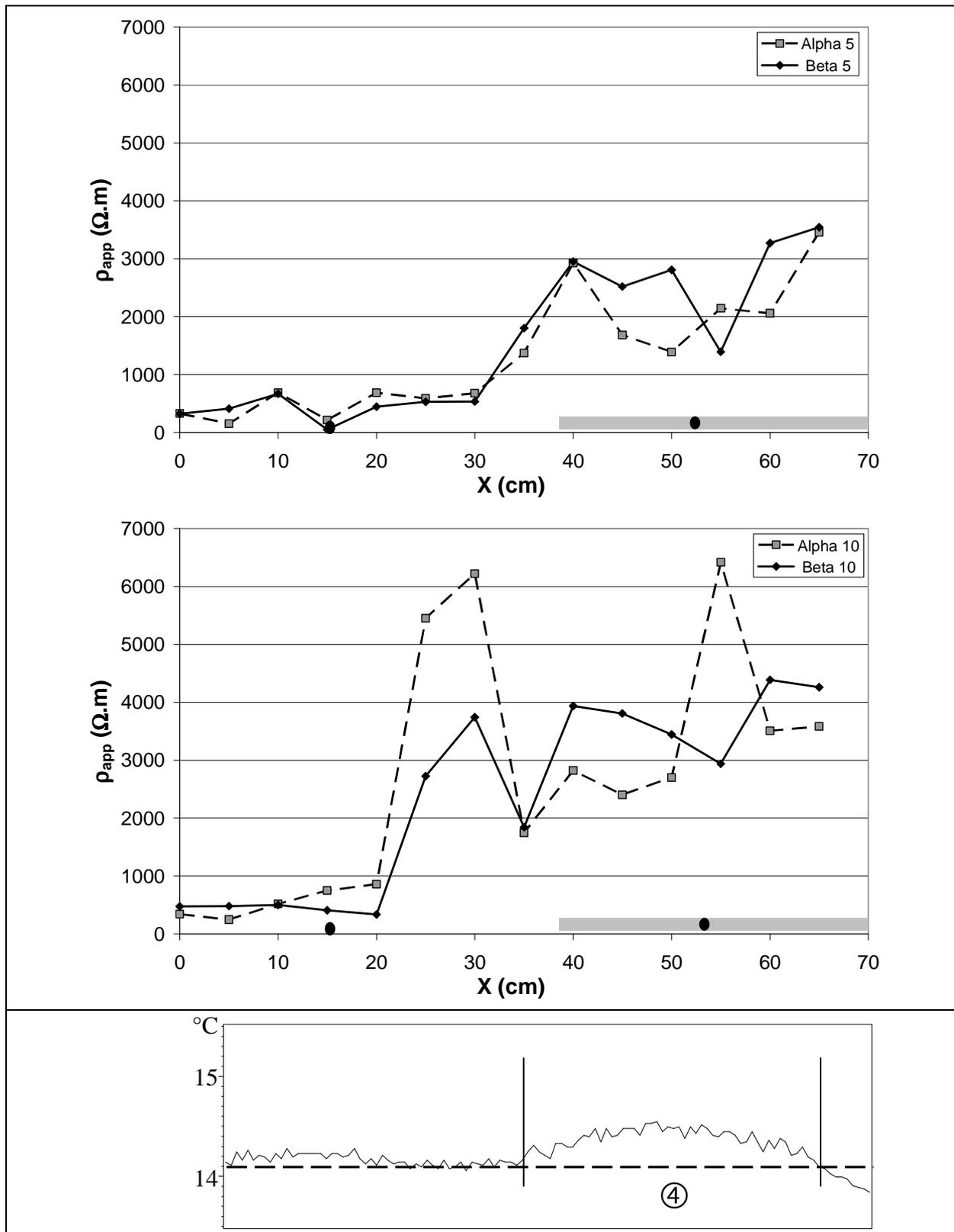


Figure 8.18 Variations de la résistivité électrique et de la température de surface sur le profil transversal

L'étude des anisotropies électriques obtenues sur les profils transversaux et longitudinaux ne permet pas de faire ressortir d'information supplémentaire (Figure 8. 19). Les plus fortes variations de l'anisotropie sont situées à l'endroit des armatures.

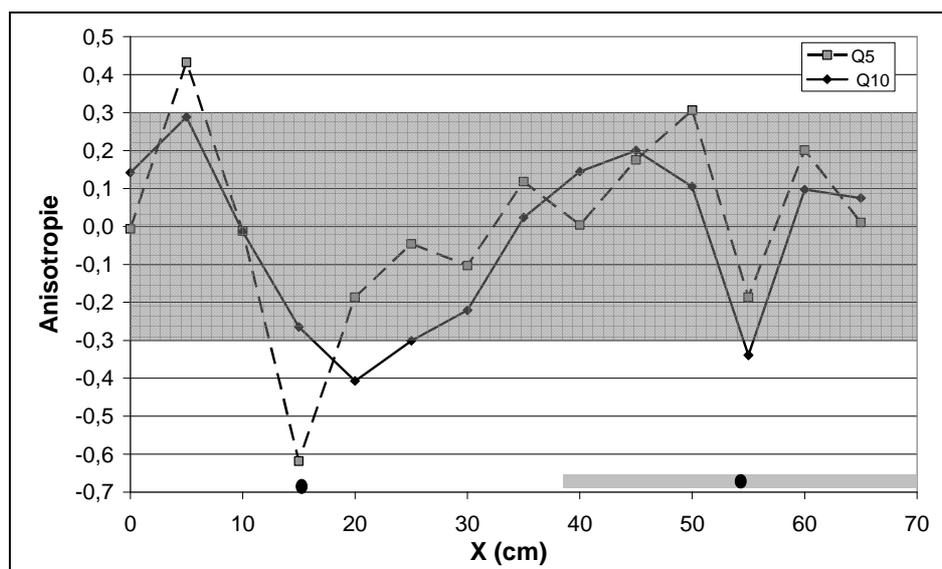


Figure 8.19 Variations de l'anisotropie le long du profil transversal

En terme d'interprétation, certains mécanismes physiques expliquant l'altération du béton peuvent être mis en évidence. En effet, la corrosion des armatures provoque un gonflement plusieurs fois supérieur au diamètre initial de l'acier, ce qui peut fissurer le béton (de façon caractéristique, parallèlement à la direction du lit d'armatures) et entraîne son éclatement ou son écaillage (Figure 8. 2). Ces altérations mécaniques sont donc associées aux phénomènes accompagnant la corrosion des armatures.

8.2.3.3. CONCLUSION

Les résultats obtenus avec les deux techniques présentées ici (mesures infrarouge et électrique) sont concordants. La délamination présumée lors des mesures par thermographie infrarouge se traduit par une augmentation de la résistivité apparente. Cette hausse peut être attribuée à la présence d'eau dans l'épaisseur délaminée : l'humidité du béton est un paramètre nécessaire à la corrosion des armatures.

Le mode 3 du couplage des méthodes est illustré, c'est-à-dire l'utilisation successive d'une technique rapide à fort rendement, la thermographie infrarouge passive et d'une technique plus lente, à rendement moyen, la mesure de résistivité électrique.

Des mesures supplémentaires sont néanmoins nécessaires afin de quantifier les différentes altérations, et notamment des mesures acoustiques (sensibles aux structures en couches) et/ou la méthode impact-écho permettant de donner les épaisseurs délaminées.

8.3 SYNTHÈSE

La caractérisation de la **délamination** est un enjeu d'autant plus important pour la connaissance de l'état et de l'évaluation de l'endommagement des ouvrages en béton que cette pathologie ne présente pas de critère visuel apparent. De plus, cette pathologie est souvent une conséquence de la corrosion des armatures.

Les travaux menés sur ouvrage permettent de valider la sensibilité des mesures par thermographie infrarouge passive et par résistivité électrique vis-à-vis de la délamination.

En ce qui concerne les mesures par **thermographie infrarouge passive** :

- l'étude instantanée permet de révéler la présence d'anomalies thermiques à la surface d'un ouvrage. Ce repérage est très rapide et peut se faire en direct. Ce double avantage rend l'utilisation de la méthode prioritaire lors de la mise en place d'une **stratégie d'auscultation** d'un ouvrage par plusieurs techniques afin de repérer des zones dont l'investigation est susceptible d'être approfondie ;
- l'étude multi-temporelle permet de valider le zonage proposé lors de l'étude instantanée et permet de mettre en évidence des zones avec des **propriétés thermo-physiques** différentes à partir des changements de gradients thermiques constatés.

En ce qui concerne les mesures de **résistivité électrique** :

- la sensibilité de la méthode vis-à-vis de la délamination est confirmée : la **résistivité électrique augmente** quel que soit le sens d'injection du courant, sans que l'**anisotropie ne varie**. Dans ce cas, l'utilisation d'un dispositif quadripolaire carré est parfaitement justifiée.

Cette étude permet d'illustrer un nouveau mode de **couplage** : l'utilisation successive d'une technique rapide à fort rendement, discriminante mais peu apte à quantifier (la thermographie infrarouge passive) et d'une technique plus lente, à rendement moyen, mais de précision meilleure (la mesure de résistivité électrique) dans les zones repérées par la première technique.

Des pistes sur les suites possibles à donner à ces résultats peuvent être suggérées afin de tenter d'estimer la profondeur de la délamination en utilisant la méthode par thermographie infrarouge passive. Cela passe par la modélisation numérique des phénomènes thermiques, en ayant connaissance auparavant des variations du rayonnement reçu par la surface auscultée (utilisation de fluxmètre par exemple). Mais aujourd'hui, l'utilisation de la méthode **impact-écho** reste le meilleur moyen pour estimer la profondeur d'une zone de délamination, même s'il est nécessaire d'aller au contact de la surface. Couplée à la thermographie infrarouge passive qui nous donne une bonne répartition spatiale de l'anomalie, cette méthode permet de caractériser alors entièrement la délamination (profondeur et superficie).

Conclusions générales et perspectives de travail

Conclusions générales

Le cadre général de ce travail de Recherche est l'**Evaluation Non Destructive des ouvrages en béton par mesures de résistivité électrique et par thermographie infrarouge passive**. Son objectif est la caractérisation physique du béton afin d'évaluer l'état du matériau et de l'ouvrage. La problématique s'inscrit dans le cadre de la gestion du patrimoine bâti. Les deux méthodes sont actuellement reconnues et utilisées en Génie Civil. Etant sensibles à la porosité du matériau et à la circulation du fluide interstitiel dans la matrice, elles peuvent être utilisées pour caractériser les altérations du béton.

L'utilisation de la méthode de **résistivité électrique** sur le matériau béton impose une bonne maîtrise de la mesure et de l'exploitation des résultats. Le dispositif utilisé, un quadripôle carré, permet d'acquérir aisément les informations souhaitées : ses dimensions (5 ou 10 cm entre électrodes) sont adaptées à celle des ouvrages en béton, et sa géométrie (carrée) permet d'évaluer rapidement l'anisotropie électrique du matériau. Cela nécessite la mise en œuvre d'un protocole de mesure rigoureux afin d'assurer une bonne représentativité des mesures obtenues. Le traitement des données se fait sur la valeur de résistivité électrique et de l'anisotropie. Le calcul des moyennes (résistivité, anisotropie, valeur absolue de l'anisotropie) et des coefficients de variation associés sont des indicateurs des caractéristiques physiques du matériau. Ces valeurs permettent d'évaluer les propriétés moyennes du matériau, d'étudier les variabilités latérales et locales.

L'utilisation de la **thermographie infrarouge passive** en Génie Civil demande également une bonne connaissance de certains paramètres indispensables à une interprétation correcte des résultats (température extérieure, émissivité du matériau, distance caméra/scène thermique...). L'analyse des images thermiques permet de mettre en évidence des anomalies ou gradients de température de la surface du béton, et également de calculer des moyennes de température par zones homogènes. L'étude instantanée des contrastes thermiques ou l'étude multi-temporelle des thermogrammes d'une même scène thermique (inertie thermique) permettent de cerner et caractériser les phénomènes thermophysiques mis en jeu.

Dans un premier temps, nous avons identifié les différents **facteurs de sensibilité** des deux méthodes utilisées : les paramètres propres au béton (ciment, granulat, rapport E/C, porosité, ions chlorures...), les ajouts (cendres volantes, fumées de silice, fibres), les facteurs extérieurs (essentiellement l'humidité de surface et la température) et la géométrie de la structure

(effet de bord et de fond). Essentiellement basée sur la bibliographie, cette partie de l'étude a permis également d'identifier certaines lacunes.

Une étude réalisée sur l'influence de la présence de **fumées de silice** permet de valider les résultats trouvés dans la bibliographie : la résistivité électrique du béton augmente de façon importante et l'inertie thermique diminue (résultats obtenus à partir de la mesure de la température de surface soumise à un rayonnement solaire). La présence de **fibres** modifie également la valeur de résistivité ainsi que de l'anisotropie électrique selon leur nature (métalliques ou synthétiques) et leur quantité. Au vu de nos résultats, les propriétés thermiques ne sont pas sensibles à la présence de fibres.

L'analyse des résistivités électriques mesurées sur le béton est affinée par des résultats issus de la modélisation numérique. Le traitement des **effets de fond** par une approche analytique et numérique permet de corriger les résistivités calculées de ce biais de mesure. De la même manière, le travail réalisé sur l'effet d'une couche superficielle conductrice telle qu'une **couche saturée** en eau, ou d'une couche résistante comme une **couche carbonatée** permet soit d'estimer l'épaisseur de cette couche superficielle, soit d'en corriger les effets ; le prélèvement destructif d'une carotte étant toutefois nécessaire dans les deux cas, afin d'étalonner les mesures.

Par la suite, le travail de recherche s'est orienté vers la définition des capacités des deux méthodes à évaluer, dans un premier temps, les **conditions hydriques** dans le béton, dans un deuxième temps, à contribuer au diagnostic de l'endommagement créé par la **réaction alcalis-granulats**, et dans un dernier temps, à caractériser les désordres de type **fissure et délamination**. Les résultats ont été exploités, d'une part, en considérant chaque méthode individuellement afin d'évaluer leur sensibilité, et d'autre part, en terme de **couplage**, le but étant d'estimer la plus-value liée à l'utilisation de deux techniques de CND dans l'auscultation des ouvrages.

Concernant l'évaluation des conditions hydriques du béton, les études expérimentales menées sur deux séries indépendantes de corps d'épreuve, l'une à porosité variable, et l'autre à degré de saturation variable permet d'établir une relation entre ces deux paramètres et la résistivité électrique du béton. La combinaison de ces deux résultats permet ensuite d'estimer les différents paramètres intervenant dans la **loi d'Archie**. Cette relation définie initialement pour les roches et les matériaux poreux, relie la résistivité électrique du matériau à la résistivité du fluide, à la porosité, au degré de saturation et à d'autres facteurs intrinsèques du matériau. Les constantes intervenant dans cette formule sont estimées à partir d'une expérience sur une formulation de béton, mais leur ordre de grandeur et leur pertinence sont satisfaisantes. A la lumière des premiers résultats obtenus, je propose d'utiliser cette formule dans le cas des bétons.

L'étude de l'influence du **séchage** (ou de l'évaporation) et de la profondeur des fronts de séchage et d'humidité sur les mesures de résistivité électrique et par thermographie infrarouge ont

été menées en laboratoire sur une dalle d'un tablier de pont. Elles ont permis de mettre en évidence la sensibilité des deux méthodes à la cinétique de séchage de la surface d'un parement, les propriétés électriques (résistivité) et thermiques (diffusivité) étant influencées par ce phénomène.

Une campagne de mesure a été menée sur un ouvrage réel afin d'utiliser les résultats mis en évidence lors des études expérimentales précédentes. Il est envisageable d'estimer le **profil de degré de saturation** le long d'un ouvrage à partir des mesures de résistivité, de thermographie infrarouge et des mesures capacitives. Le couplage des différentes méthodes est réalisé grâce à l'étude des **corrélations statistiques** entre les différentes séries de mesures. Les résultats obtenus en première approche sur cet ouvrage réel sont satisfaisants et permettent d'envisager favorablement la poursuite des travaux dans ce sens.

Concernant l'aide au diagnostic de l'endommagement créé par la **réaction alcalis-granulats**, les travaux réalisés lors de cette thèse sont réellement novateurs. En effet, selon la bibliographie, cette pathologie n'a fait l'objet jusqu'à présent que de très peu d'investigations par les méthodes d'END.

Les premiers résultats obtenus en électrique, à la fois sur des mesures en laboratoire et sur des mesures sur site, sont très encourageants. En effet, la multiplication des points de mesures à la surface d'un ouvrage endommagé par la RAG peut être exploitée lors du calcul de valeurs moyennes. Des indicateurs tels que la valeur **moyenne de la résistivité électrique et de l'anisotropie** (caractérisant l'anisotropie locale) **ainsi que de la valeur absolue de l'anisotropie** (caractérisant l'anisotropie à l'échelle de l'ouvrage) et des coefficients de variation associés à ces différentes moyennes sont autant de paramètres qui permettent de différencier l'endommagement. Ces premiers résultats demandent à être validés par d'autres études.

Par ailleurs, les **propriétés thermiques** du béton ne semblent pas être influencées par l'endommagement créé par la RAG. L'utilisation faite dans notre cas de la thermographie infrarouge passive afin d'évaluer des propriétés thermo-physiques différentes n'est donc pas adaptée. Cette méthode permet néanmoins de mettre aisément en évidence le patron de fissuration à la surface du béton, et donc, en quelque sorte, diagnostiquer ce type d'endommagement.

Enfin, les résultats obtenus lors l'utilisation couplée de la mesure de résistivité électrique et de la thermographie infrarouge sur la caractérisation de la **fissuration** et de la **délamination** sont satisfaisants. Le couplage, en terme de stratégie d'utilisation de deux méthodes de CND, est parfaitement évalué dans ce cas d'étude. La thermographie infrarouge passive permet de repérer rapidement des zones présentant des anomalies thermiques qui sont ensuite étudiées par mesures de résistivité électrique. Un travail important reste néanmoins à poursuivre pour estimer la profondeur de la délamination.

Perspectives de travail

Certains résultats demandent encore à être valoriser afin de rendre les méthodes totalement exploitables sur les différents volets explorés. Du fait du caractère appliqué des différents travaux engagés, nous pouvons distinguer plusieurs niveaux de **perspectives** en fonction du travail d'expérimentation à mener ou des besoins de développement.

Il reste encore à valoriser les premiers résultats obtenus concernant l'application de la **formule d'Archie** au béton. Cette formule établie en 1942 est appliquée au domaine des Sciences de la Terre. Même si cette équation, simple et purement empirique, a fait ses preuves, elle n'est prouvée par aucun modèle physique. L'enrichissement de cette loi par d'autres études expérimentales sur différents corps d'épreuve permettra de valider la formule que nous avons établie. Son utilisation devrait pouvoir être généralisée dans le cas du béton.

Concernant l'aide au diagnostic de l'endommagement créé par la **RAG**, les premiers résultats obtenus par mesures de résistivité électrique sont très encourageants et demandent à être confirmés par d'autres études. Ainsi, la fabrication de corps d'épreuve de même formulation permettrait d'étudier l'influence seule de la RAG en incorporant différentes teneur en alcalis. La mesure de l'expansion des corps d'épreuve correspond à l'image du degré d'endommagement. La relation pourrait alors être établie entre la résistivité électrique ou l'anisotropie et l'expansion du béton.

Lors de l'utilisation de la méthode des résistivités électriques, l'effet de la **présence des armatures** dans le béton armé peut être réduit par une utilisation stratégique du dispositif de mesure. La détection préalable des armatures (par les techniques électromagnétiques usuelles) permet de positionner correctement le quadripôle en surface. Lors d'une campagne d'auscultation d'un ouvrage, la même précaution permet d'exploiter les résultats en terme de variations relatives de résistivité, toutes les valeurs étant perturbées de la même manière par la présence des aciers dans le béton. La comparaison quantitative des valeurs de résistivité d'un ouvrage à l'autre n'est cependant pas possible ; la position et le diamètre des aciers variant d'un ouvrage à l'autre. Analytiquement, cet effet ne peut être calculé. La correction de l'effet de la présence des armatures demande donc la construction d'abaques afin d'obtenir un facteur correctif en fonction de la profondeur et du diamètre de l'acier, d'une part, pour un dispositif placé en surface à la verticale de l'armature, et d'autre part, lorsque la position du dispositif s'éloigne de la position des armatures.

Un travail important est à poursuivre pour la pleine exploitation de la **profondeur de délamination**. Les mesures obtenues par thermographie infrarouge passive lors d'une étude multi-temporelle, permettent de mettre en évidence l'évolution des gradients de température entre une zone saine et une zone délaminée. L'évolution de la température de l'air ambiant ainsi que de l'énergie reçue par la surface étudiée (à l'aide d'un fluxmètre) au cours de la journée sont

des paramètres à enregistrer lors d'une campagne de mesure. L'intégration de toutes ces données dans un modèle numérique permettrait d'estimer la profondeur de délamination. L'expertise issue de la simulation devrait permettre l'inversion des mesures.

Les études multi-temporelles réalisées lors des différentes campagnes de mesure permettent d'envisager l'exploitation quantitative de la pente de la fonction température « T » au cours du temps « t », $T = f(t)$. Celle-ci donne une information qualitative sur l'inertie thermique et donc la diffusivité thermique du matériau. Lors de l'auscultation d'un ouvrage, l'enregistrement d'autres paramètres (température de l'air ambiant et énergie reçue par la surface) est nécessaire. L'inversion numérique permettrait alors d'avoir une information quantitative des propriétés thermiques.

De manière plus générale, la méthode de résistivité électrique présente encore une marge de développement importante sur les aspects mesure. En effet, le développement d'un dispositif de mesure comprenant un grand nombre d'électrodes permettrait l'acquisition de **panneaux électriques**. Ainsi, une image des résistivités en coupe du béton pourrait être obtenue, facilitant la mise en évidence des gradients en fonction de la profondeur (Bouhlef 2006). Cela nécessite l'utilisation, d'une part d'un appareil de mesure adapté au problème, et d'autre part, de logiciels d'inversion spécifiques qui peuvent être empruntés à la Géophysique.

Les travaux réalisés lors de cette thèse se sont inscrits, entre autre, dans le cadre du Projet de recherche sur l'« Évaluation de la dégradation du béton d'enrobage et aide au diagnostic et à la réparation des ouvrages », soutenu par le Réseau Génie Civil et Urbain. Lors des campagnes de mesures réalisées sur site, par les différentes équipes impliquées dans le projet, l'utilisation de plusieurs méthodes de CND (radar, capacitif, acoustique, électrique, thermographie) a permis de mettre en évidence l'intérêt du couplage. L'exploitation des résultats a été réalisée par des études statistiques de corrélation entre les séries de données. Or aujourd'hui, la **fusion de données** (Grandin 2006) apparaît être un outil parfaitement adapté à cette problématique de couplage. Dans ce sens, le projet national SENSO, qui poursuit le premier projet, intègre des compétences dans ce domaine.

<h2>Références bibliographiques</h2>

- ABRAHAM O., DEROBERT X., *Non-destructive testing of fired tunnel walls: the Mont-Blanc Tunnel case study*, NDT&E International, vol. 36, issue 6, pp. 411-418 (September 2003).
- ACI Committee 222, *Protection of Metals in Concrete against corrosion*, American Concrete Institute (Detroit), 41 p. (2001).
- AFNOR A 09-400, *Essais non destructifs – Thermographie infrarouge – Vocabulaire*, 8 p. (Décembre 1991).
- AKASHI T., AMASAKI S., TAKAGI N., *The estimate for deterioration due to alkali-aggregate reaction by ultrasonic methods*, 7th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, Ottawa (Canada), pp. 183-187 (1986).
- AL WARDANY R., *Caractérisation non destructive des structures en béton au moyen des ondes dispersives de Rayleigh et de Lamb*, Thèse de doctorat, Université de Sherbrooke-Université de Cergy-Pontoise (Avril 2005).
- ALBERT P., RAPHAEL S., *Alkali-silica reactivity in the Beauharnois powerhouses, Beauharnois*, 7th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, Ottawa (Canada), pp. 10-17 (1986).
- ALEXANDER M., BLIGHT G., LAMPACHER B., *Pre-demolition tests on structural concrete damaged by AAR*, 9th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, London (Great Britain), pp. 1-8 (1992).
- ALONSO C., ANDRADE C., GONZÁLEZ, J., *Relation between resistivity and corrosion rate of reinforcements in carbonated mortar made with several cement types*, Cement and Concrete Research, vol. 18, issue 5, pp. 687-698 (September 1988).
- ALT D., MEGGERS D., *Determination of bridge deck subsurface anomalies using infrared thermography and ground penetrating radar*, Kansas Department of Transportation, Report N°FHWA-KS-96-2, 18 p. (September 1996).
- AL-ZAHRANI M., MASLEHUDDIN M., AL-DULAIJAN S., IBRAHIM M., *Mechanical properties and durability characteristics of polymer- and cement-based repair materials*, Cement & Concrete Composites, vol. 25, issues 4-5, pp. 527-537 (Mai-July 2003).
- ANDRADE C., ALONSO C., *Electrical methods used in the characterization of reinforced concrete and steel corrosion*, International RILEM Congress, edition BOURNAZEL J.-P. & MALIER Y., Arles, pp. 196-206 (September 1996).

- ANDRADE C., ALONSO C., ARTEAGA A., TANNER P., *Methodology based on the electrical resistivity for the calculation of reinforcement service life*, 5th CANMET-ACI International conference on the Durability of Concrete (Barcelona, Spain), ed. P.A.M.Basheer, pp. 899-915 (June 2000).
- ANTCZAK E., DEFER D., *Auscultation de parements de béton par méthodes thermiques : application à la détection de vides*, 10^{ème} édition de la Semaine des infrastructures urbaines - CERIU, INFRA 2004, Montréal (Novembre 2004).
- ANTOINE P., FABRE D., *Géologie appliquée au génie civil*, ISBN 2-225265880-3, édition Masson (Paris), 291 p. (1980).
- ARCHIE G., *The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics*, Transactions of the American Institute of Mining and Metallurgical Engineers, vol. 146, pp. 54-62 (January 1942).
- ARLIGUIE G., *Evaluation de la dégradation du béton d'enrobage et aide au diagnostic et à la réparation des ouvrages*, Les entretiens du Réseau Génie Civil & Urbain, Paris (Mars 2005).
- ASTM C876-91, *Standard test method for half cell potentials of uncoated reinforcing steel in concrete*, American Society for Testing and Materials (1991).
- ASTM C1260-94, *Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar Method)*, American Society for Testing and Materials (1994).
- ASTM D4788-88, *Standard Test Method for detecting delaminations in bridge decks using infrared thermography*, American Society for Testing and Materials, 2 p. (1988).
- AUBAGNAC C., DEROBERT X., ABRAHAM O., *Évaluation de différentes méthodes d'auscultation non destructives avant autopsy d'un élément de poutre du Pont Neuf de Foix*, Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées – 241 – pp. 85-97 (Novembre-Décembre 2002).
- AVDELIDIS N.P., MOROPOULOU A., THEOULAKIS P., *Detection of water deposits and movement in porous materials by infrared imaging*, Infrared Physics & Technology, vol. 44, issue 3, pp. 183-190 (June 2003).
- BACKE K., LILE O., LYOMOV F., *Characterizing Curing Cement Slurries by Electrical Conductivity*, SPE Drilling and completion, pp. 201-207 (December 2001).
- BALARAS C., ARGIRIOU A., *Infrared thermography for building diagnostics*, Energy and Buildings, vol. 34, issue 2, pp. 171-183 (February 2002).
- BALAYSSAC J.P., LAURENS S., RHAZI J., *Utilisation du radar pour la détection de zones à risque de corrosion dans le béton armé*, Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, n°237, pp. 99-102 (Avril 2002).
- BALLIVY G., KHAYAT K., GRAVEL C., HOULE D. *Influence of reinforcement steel on the expansion of concrete affected by AAR*, 11th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, Québec (Canada), pp. 919-928 (June 2000).

- BALLIVY G., *Identification des problèmes rencontrés au niveau de la dalle de la station Assomption*, Projet de recherche et développement « Sélection et contrôle des techniques d'étanchéité et de consolidation dans les infrastructures souterraines », rapport GR-02-02-01, 25 p. (Février 2002).
- BALLIVY G., OSTROWSKI C, RHAZI J, DEFER D, NAAR S., *Application de la thermographie infrarouge à différents types d'ouvrages de génie civil*, 9^{ème} édition de la Semaine des infrastructures urbaines - CERIU, INFRA 2003, Montréal (Novembre 2003).
- BAPAT J., *Performance of cement concrete with mineral admixtures*, Advances in Cement Research, vol. 13, issue 4, pp. 139-155 (October 2001).
- BAROGHEL-BOUNY V., *Conception des bétons pour une durée de vie donnée des ouvrages – Maîtrise de la durabilité vis-à-vis de la corrosion des armatures et de l'alcali-réaction*, Documents scientifiques et techniques de l'Association Française de Génie Civil (AFGC), 252 p. (Juillet 2004).
- BAROGHEL-BOUNY V., GAWSEWITCH J., BELIN P., OUNOUGH K., ARNAUD S., OLIVIER G., BISSONNETTE B., *Vieillesse des bétons en milieu naturel : une expérimentation pour le XXI^e siècle - IV. Résultats issus des prélèvements effectués sur les corps d'épreuve de différents sites aux premières échéances de mesure*, Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, n°249, pp. 49-100 (Mars-Avril 2004).
- BARON J.-P., TRAN N.-L., *Méthodes de mesure et de contrôle des teneurs en eau de matériaux dans les LPC*, Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, n°87, pp. 85-96 (Janvier-Février 1977).
- ^a BASHEER P., KROPP J., CLELAND D., *Assessment of the durability of concrete from its permeation properties: a review*, Construction and Buildings Materials, vol. 15, issues 2-3, pp. 93-103 (March-April 2001).
- ^b BASHEER P., NOLAN E., *Near-surface moisture gradients and in situ permeation tests*, Construction and Buildings Materials, vol. 15, issues 2-3, pp. 105-114 (March-April 2001).
- BAWEJA D., ROPER H., SIRIVIVATNANON V., *Corrosion of Steel in Marine Concrete: Long-Term Half-Cell Potential and Resistivity Data*, Proceedings of the 3th CANMET/ACI International Conference on Concrete in Marine Environment, SP-163, American Concrete Institute, Farmington Hills, pp. 89-110 (1996).
- BAZANT Z., STEFFENS A., *Mathematical model for kinetics of alkali-silica reaction in concrete*, Cement and Concrete Research, vol. 30, issue 3, pp. 419-428 (March 2000).
- BERARD J., ROUX R., *La viabilité des bétons du Québec : le rôle des granulats*, Revue canadienne de génie civil, vol. 13, n°1, pp. 12-24 (1986).
- BERKE N., SCALI M., REGAN J., SHEN D., *Long-Term Corrosion Resistance of Steel in Silica Fume and/or Fly Ash Containing Concretes*, proceedings of the 2^d CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete, SP-126, American Concrete Institute, Farmington Hills, pp. 393-415 (1991).

- BERKE N., DALLAIRE M., HICKS M., *Plastic Mechanical, Corrosion, and Chemical Resistance Properties of Silica Fume (Microsilica) Concretes*, proceedings of the 4th CANMET/ACI International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete, SP-132, American Concrete Institute, Farmington Hills, pp. 1125-1149 (1992).
- BERUBE M.-A., DURAND B., VEZINA D., FOURNIER B., *Alkali-aggregate reactivity in Québec (Canada)*, Canadian Journal of Civil Engineering, vol. 27, pp. 226-245 (2000).
- BHARGAVA J., RHENSTROM A., *Electrochemical aspects of electrical resistance gauges for concrete*, Swedish Council for Building Research, Doc. D11:1978 (1978).
- BLASZCZYK F., BLASZCZYK R., TROCHET B., BIGORRE M., DUPAS A., *Mesure de la teneur en eau en continu d'un matériau granulaire : TRITON II. Mesure à la jetée d'un transporteur*, Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, n°186, pp. 85-87 (Juillet-Août 1993)
- BLIGHT G., ALEXANDER M., SCHUTTE W., RALPH T., *The effect of alkali-aggregate reaction on the strength and deformation of a reinforced concrete structures*, 6th International Conference on Concrete Alkali-Aggregate Reaction, Copenhagen (Denmark), pp. 401-410 (1983).
- BOUHLEL Z., *Méthodes de contrôle non destructif pour l'évaluation des gradients de teneur en eau et/ou de chlorures dans le béton d'enrobage*, Rapport CDGA n° 2006-013, 53 p. (Juin 2006).
- BOURGET M., BREYSSE D., FRAPPA M., *Apport des méthodes électriques et acoustiques à la caractérisation des ouvrages en béton*, Colloque GEO, Aussois, 3 p. (Décembre 1995).
- BRACS G., BALINT E., ORCHARD, D.F., *Use of electrical resistance probes in tracing moisture permeation through concrete*, Journal of the American Concrete Institute, vol. 67, issue 8, pp. 642-646 (August 1970).
- BRAMESHUBER W., RAUPACH M., SCHRÖDER P., DAUBERSCHMIDT C., *Non-destructive Determination of the Water-Content in the Concrete Cover using the Multiring-Electrode*, International Symposium of Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE 2003), Berlin, communication n°041 (September 2003).
- BREYSSE D., ABRAHAM O., *Méthodologie d'évaluation non destructive de l'état d'altération des ouvrages en béton*, ISBN 2-85978-405-5, Presses de l'École Nationales des Ponts et Chaussées (Paris), 555 p. (2005).
- BROOMFIELD J., *Corrosion of steel in concrete*, ISBN 0-419-19-630-7, edition E&FN SPOON (London), 207 p. (1997).
- BROOMFIELD J., MILLARD S., *Measuring concrete resistivity to asses corrosion rates: current practice sheet n°128*, Concrete, pp. 37-39 (February 2002).
- BULTEEL D., *Quantification de la réaction alcali-silice : application à un silex du nord de la France*, Thèse de l'Université des Sciences et Technologies de Lille 1, 133 p. (Octobre 2000).
- BURGHARDT, *RILEM-TC NDE Non-destructive evaluation of concrete structures*, communication privée, 2000.

- BURSANESCU L., *Évaluation par géoradar et thermographie infrarouge d'un viaduc. Étude de cas*, séminaire CERCA-CERIU, Montréal, Québec (26 février 2003).
- BÜYÜKÖZTÜRK O., RHIM H., *Radar imaging of concrete specimens for non-destructive testing*, Construction and Buildings Materials, vol. 11, issue 3, pp. 195-198 (1997).
- BÜYÜKÖZTÜRK O., *Imaging of concrete structures*, NDT&E International, vol. 31, Issue 4, pp. 233-243 (August 1998).
- CABASSUT L., *Diagnostic des collecteurs visitables : apport des méthodes géophysiques*, Thèse de doctorat, Université Bordeaux I, 210 p. (mai 1996).
- CABASSUT L., BOURGET M., FRAPPA M., AL HEIB M., VIGUIER C., GUERIN J.F., *Contribution of electrical and acoustic methods in the evaluation of the condition of accessible underground pipework and its environment*, Modern Geophysics in Engineering geology, Special Publication, n°12, pp. 195-202 (1997).
- CABRERA J.G., GHODDOUSSI P., *The influence of fly ash on the resistivity and rate of corrosion of reinforced concrete*, 3rd CANMET-ACI International Conference on Durability of Concrete, Nice, édition V.M. Malhotra, pp.229-244 (1994).
- CALGARO J.-A., LACROIX R., *Maintenance et réparation des ponts*, Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées (Paris – France), ISBN°2-85978-278-8, 666 p. (1997).
- CALGARO J.-A., LACROIX R., *Pathologie et évaluation des ponts existants*, Techniques de l'Ingénieur, doc. C 4 502, 30 p. (Août 1999).
- CAN/CSA A23.2–14A, *Détermination du gonflement potentiel des granulats (changement de longueur causé par la réaction alcalis-granulats dans des prismes de béton)*, pp. 230-240 (Octobre 1994).
- CAPRA B., BOURNAZEL J.-P., *Modelling of induced mechanical effects of alkali-aggregates reaction*, Cement and Concrete Research, vol. 28, issue 2, pp. 251-260 (February 1998).
- CARINO N., *Nondestructive test methods to evaluate concrete structures*, Special seminar, 6th CANMET/ACI International conference on durability of concrete, Thessalonica (Greece), 75 p. (June 2003).
- CARPENTIER O., *Auscultation des sites miniers par thermographie infrarouge – suivi des réactions de combustion*, concours jeunes chercheurs des XXIII^{èmes} Rencontres Universitaires de Génie Civil 2005, Grenoble, 8 p. (mai 2005).
- CARSLAW H., JAEGGER J., *Conduction of heat in solids*, second edition, Oxford University Press, ISBN°0-19-853368-3, 510 p. (1959).
- CHAPELLIER D., *Prospection électrique de surface* (cours online de géophysique), Université de Lausanne – Institut Français du Pétrole, 102 p. (2001).
- CHOUTEAU M., ANTERRIEU O., VALLIERES S., *Auscultation de chaussées par résistivité électrique en continu à Montréal*, 10^{ème} édition de la Semaine des infrastructures urbaines - CERIU, INFRA 2004, Montréal, 23 p. (Novembre 2004).

- CHOUTEAU M., GIROUX B., *Méthodes électriques, électromagnétiques et sismiques - Géophysique appliquée II - GLQ 3202*, notes de cours, p. (été 2005).
- CHRISP T., McCARTER W., STARRS G., BASHEER P., BLEWETT J., *Depth-related variation in conductivity to study cover-zone concrete during wetting and drying*, *Cement & Concrete Composites*, vol. 24, issue 5, pp. 415-426 (October 2002).
- CLAISSE P., E-SAYAD H., SHAABAN I., *Permeability and pore volume of carbonated concrete*, *ACI Materials Journal*, vol. 96, issue 3, pp. 378-381 (1999).
- ^a CLARK M., FORDE M., *Infrared thermography assessment of masonry arch bridges laboratory and field case studies*, *International Symposium of Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE 2003)*, Berlin, communication n°084 (September 2003).
- ^b CLARK M., Mc CANN D., FORDE M., *Application of infrared thermography to the non-destructive testing of concrete and masonry bridges*, *NDT&E International*, vol. 36, issue 4, pp. 265-275 (June 2003).
- CLAUSER C., HUENGES E., *Thermal Conductivity of Rocks and Minerals*, *Rock Physics and Phase Relations, A Handbook of Physical Constants - AGU Reference Shelf 3*, pp. 105-126 (1995).
- COLLA C., KRAUSE M., MAIERHOFER CH., HÖHBERGER H.-J., SOMMER H., *Combination of NDT techniques for site investigation of non-ballasted railway tracks*, *NDT & E International*, vol. 35, Issue 2, pp. 95-105 (March 2002).
- COLLET Y., *Etude des propriétés du béton soumis à des températures élevées entre 200 et 900°C*, *Annales des travaux publics belges*, n°4, pp. 332-338 (1977).
- CÔTE P., *Tomographies sismiques en génie civil*, Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier (Grenoble), 193 p. (1988).
- CUSSON D., QIAN S.Y., *NRC research on field performance of rehabilitated concrete bridges*, *NRCC-44679, Canadian Civil Engineer*, Vol. 18, n°2, pp. 18-19 (Spring 2001).
- DABAS M., TABBAGH A., TABBAGH J., *3-D inversion in subsurface electrical surveying - I. Theory*, *Geophysical Journal International*, vol. 119, pp. 975-990 (1994).
- DAOUST J., *Projet de recherche sur les relevés de la fissuration des barrages*, rapport GR-89-08-01, 25 p. (Août 1989).
- DARBOUX-AFOUDA R., LOUIS P., *Contribution des mesures de l'anisotropie électrique à la recherche des aquifères de fracture en milieu cristallin au Bénin*, *Geophysical Prospecting*, vol. 37, pp. 91-105 (1989).
- DE VRIENDT A., *La transmission de la chaleur ; Généralités – La conduction (Volume I, Tome 1)*, ISBN°2-89105-058-4, Gaëtien Morin Editeur (Canada), 395 p. (1982).
- DE VRIENDT A., *La transmission de la chaleur ; Introduction au rayonnement thermique (Volume II)*, ISBN°2-89105-083-5, Gaëtien Morin Editeur (Canada), 372 p. (1984).

- DEL GRANDE N., DURBIN P., *Delamination detection in reinforced concrete structures using thermal inertia*, paper prepared for submittal to Nondestructive Evaluation of Bridges and Highways II ; Newport (California), 12 p.(March 1999).
- DELACRE E., *Caractérisation thermique de matériaux poreux humides par analyse inverse dans le domaine fréquentiel*, Thèse de doctorat, Université d'Artois, 220 p. (2000).
- DELACRE E, PERRET S, RHAZI J., BALLIVY G., *Identification des problèmes rencontrés dans la voie de raccordement Berri – ligne 4*, Projet de recherche et développement « Sélection et contrôle des techniques d'étanchéité et de consolidation dans les infrastructures souterraines », rapport GR-01-03-03, 22 p. (Mars 2001).
- DENIS A., FRAPPA M., RAHMANI N., *Visualisation du proche sous-sol par la méthode des résistivités*, 16^{ème} Réunion des Sciences de la Terre, Orléans (Avril 1996).
- DEROBERT X., COFFEC O., *Localisation des armatures des ouvrages d'art en béton armé ou précontraint par les techniques de radar*, Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées – 230 – pp. 57-65 (Janvier-Février 2001).
- DÉROBERT X., AUBAGNAC C., ABRAHAM O., *Comparison of NDT techniques on a post-tensioned beam before its autopsy*, NDT & E International, vol. 35, Issue 8, pp. 541-548 (December 2002).
- DÉROBERT X., *Techniques radar appliquées au génie civil*, Collection Études et Recherches des laboratoires des Ponts et Chaussées - série Sciences pour le génie civil - n° 9, ISBN°2-7208-0343-X, 109 p. (Octobre 2003)
- DEROBERT X., BALAYSSAC J.-P., LAGUERRE L., *Chapitre B4 : Méthodes électromagnétiques d'évaluation non destructive*, pp. 235-252, dans BREYSSE D., ABRAHAM O., *Méthodologie d'évaluation non destructive de l'état d'altération des ouvrages en béton*, ISBN°2-85978-405-5, Presses de l'École Nationales des Ponts et Chaussées (Paris), 555 p. (2005).
- DESIGN MANUAL FOR ROADS AND BRIDGES, *The assessment of concrete structures affected by alkali silica reaction*, vol. 3, section 4, part 10, BA 52/94, 6 p. (November 1994).
- DESMYTER J., POTOMS G., DEMARS P., JACOBS J., *La réaction alcali-silice*, Centre Scientifique et Technique de la Construction, CSTC magazine, vol. 2, pp. 3-17 (2001).
- DIRECTION DES ROUTES, *Instruction technique pour la surveillance et l'entretien des ouvrages d'art (deuxième partie) - Fascicule 03*, Ministère de l'Équipement (1998).
- DOTTO J., DE ABREU A., DAL MOLIN D., MÜLLER I., *Influence of silica fume addition on concretes physical properties and on corrosion behaviour of reinforcement bars*, Cement & Concrete Composites, vol. 26, issue 1, pp. 31-39 (January 2004).
- DUPAIN R., LANCHON R., SAINT-ARROMAN J.-C., *Granulats, sols, ciments et bétons – caractérisation des matériaux de génie civil par les essais de laboratoire*, édition Casteilla (Paris), ISBN°2-7135-1471-1, 236 p. (1995).
- DUROT D., *Applications de la télédétection thermique à la détection des cavités à l'arrière des revêtements de tunnels – modélisation par éléments finis*, Thèse de doctorat, Université Bordeaux I, 165 p. (Avril 1989).

- EDWARDS L., *A modified pseudosection for resistivity and induced-polarization*, Geophysics, vol. 42, issue 5, pp. 1020-1036 (August 1977).
- EL HASSAN F., *Contrôle non destructif des structures en béton armé endommagées, prise en compte de l'effet des armatures sur les mesures de résistivité électrique*, rapport CDGA n°2004-0011, 68 p. (2004).
- ELKEY W., SELLEVOLD E., *Electrical Resistivity of Concrete*, Norwegian Road Research Laboratory, Publication n°80, Oslo (July 1995), in WHITING D., NAGI M., *Electrical Resistivity of Concrete - A Literature Review*, R&D Serial n°2457, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, USA, 57 p. (2003).
- ESBACH O., SOUDERS M., *Handbook of engineering fundamentals*, ISBN°0-47-124553-4, John Wiley & Sons Inc, 3rd edition, New-York, 1572 p. (December 1975).
- EUROCODE 4, *Calcul des structures mixtes acier-béton - Partie 1-2 : Règles générales - Calcul du comportement au feu (EN 1994-1-2:2005)*, AFNOR (Paris), 117 p. (2005).
- FELIU S., ANDRADE C., GONZALEZ J., ALONSO C., *A new method for in-situ measurement of electrical resistivity of reinforced concrete*, Materials and structures, vol. 29, pp. 362-365 (July 1996).
- FLIR Systems France, *Manuel d'utilisation de la caméra ThermaCAMTM SC2000* (en français), 98 p. (septembre 2001).
- FOREST G., *Essais non destructifs - Choix d'une méthode de contrôle*, AFNOR, ISBN°2-12-450111-9, 126 p. (1992).
- FOURNIER B., BERUBE M.-A., *Alkali-aggregate reaction in concrete: a review of basic concepts and engineering implications*, Canadian Journal of Civil Engineering, vol. 27, pp. 167-191 (2000).
- FRICKE H., *A mathematical treatment of the electrical conductivity and capacity of disperse systems – the electrical conductivity of a suspension of homogeneous spheroids*, Physics Review, vol. 24, pp. 678-681 (1924).
- FU X., CHUNG D.D.L., *Effects of silica fume, latex, methylcellulose, and carbon fibers on the thermal conductivity and specific heat of cement paste*, Cement and Concrete Research, vol. 27, issue 12, pp. 1799-1804 (December 1997).
- GAGNÉ R., BISOSONNETTE B., LAUTURE F., MORIN R., MORENCY M., *Réparation d'un tablier de pont en béton armé à l'aide de ressurlages minces adhérents : résultats de la planche d'essais du pont du Cosmos*, Conférence « Progrès dans le domaine du béton - ACI », Montréal, 16 p. (novembre 2003).
- GARNIER V., ABRAHAM O., DONDONNE E., MARLOT D., *Chapitre B3 : Méthodes d'évaluation non destructive par propagation d'ondes mécaniques*, pp. 201-234, dans BREYSSE D., ABRAHAM O., *Méthodologie d'évaluation non destructive de l'état d'altération des ouvrages en béton*, ISBN 2-85978-405-5, Presses de l'École Nationales des Ponts et Chaussées (Paris), 555 p. (2005).

- GAUDREAU M., *The St-Lawrence seaway (Quebec, Canada): a case study in the management of structures affected by alkali-aggregate reaction*, 11th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, Québec (Canada), pp. 1293-1302 (2000).
- GAUSSORGUES G., *La thermographie infrarouge : principes - techniques – applications, Quatrième édition revue et argumentée*, ISBN°2-7430-0290-5, Technique et Documentation, Lavoisier (Paris), 587 p. (1999).
- GERVAIS F., RISS J., GENTIER S., *Caractérisation stéréologique de la géométrie d'un massif rocheux fracturé : application aux carrières de Comblanchien (Côte d'Or, France)*, Bulletin de la Société Géologique de France, t.164, n°3, pp. 459-471 (1993).
- GJØRV O., VENNESLAND Ø., EL-BUSIADY A., *Electrical resistivity of concrete in the oceans*, proceedings of the 9th Annual Offshore Technology Conference, Houston (Texas), pp. 581-588 (May 1977).
- GOURRY J.-C., SIRIEIX C., BERTRAND L., MATHIEU F., *3D Diagnosis of a tunnel through infrared thermography combined with ground penetrating radar*, SAGEEP 95, Orlando (Florida), 10 p. (1995).
- GOWERS K., MILLARD S., BUNGEY J., *The influence of environmental conditions on the measurement of concrete resistivity for assessment of corrosion durability*, International Conference of Non Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE), edition J.Bungey, vol. 2, pp. 633-657 (1993).
- GRAI, *Chaire CRSNG-Industrie : Auscultation des structures en béton – réunion des partenaires*, Université de Sherbrooke (Québec, Canada) (Février 2003).
- GRANDIN J.-F., *Fusion de données – Théorie et méthodes*, Techniques de l'Ingénieur, S 7 224, 23 p. (Mars 2006).
- GRATTAN-BELLEW P., MITCHELL L., *Prévention de la détérioration du béton due à la réaction alcalis-granulats*, Conseil National de Recherches du Canada, ISSN°1206-1239, 4 p. (Mars 2002).
- GRAYBEAL B., PHARES B., ROLANDER D., MOORE M., WASHER G., *Visual Inspection of Highway Bridges*, Journal of Non-destructive Evaluation, vol. 21, Issue 3, pp. 67-83 (September 2002).
- ^a GRINZATO E., BISON P.G., MARINETTI S., *Monitoring of ancient buildings by the thermal method*, Journal of Cultural Heritage, vol. 3, issue 1, pp. 21-29 (April 2002).
- ^b GRINZATO E., BRESSAN C., MARINETTI S., BISON P.G., BONACINA C., *Monitoring of the Scrovegni Chapel by IR thermography: Giotto at infrared*, Infrared Physics & Technology, vol. 43, issues 3-5, pp. 165-169 (June 2002).
- GRINZATO E., VAVILOV V., KAUPPINEN T., *Quantitative infrared thermography in buildings*, Energy and Buildings, vol. 29, issue 1, pp. 1-9 (December 1998).
- GROS X., BOUSIGUE J., TAKAHASHI K., *NDT data fusion at pixel level*, NDT&E International, vol. 32, issue 5, pp. 283-292 (July 1999).

- GU P., XU Z., XIE P., BEAUDOIN J.-J., *Application of A.C. Impedance techniques in studies of porous cementitious materials, (I) Influence of solid phase and pore solution on high frequency resistance*, Cement and Concrete Research, vol. 23, issue 3, pp. 531-540 (May 1993).
- GUEGUEN Y., PALCIAUSKAS V., *Introduction à la physique des roches*, ISBN°2-70-566138-0, Hermann (Paris), 312 p. (1992).
- GUISSI G., *Contribution à l'étude des corrélations entre les variations de résistivité électrique et les variations de la résistance à la compression*, Mémoire de maîtrise, Université de Sherbrooke, 98 p. (Avril 2004).
- HABBERJAM G., WATKINS G., *The use of a square configuration in resistivity prospecting*, Geophysical Prospecting, vol. 15, issue 3, pp. 445-467 (1967).
- HABBERJAM G., *The effects of anisotropy on square array resistivity measurements*, Geophysical Prospecting, vol. 20, pp. 249-266 (1972).
- HAELTERMAN K., LAMBRECHTS A., JANSSENS H., VAN GEMERT D., *Geo-electrical survey of masonry*, Materials and Structures, vol. 26, pp. 495-499 (1993).
- HAMMOND E., ROBSON T., *Comparison of electrical properties of various cements and concretes*, The Engineer, vol. 199, pp. 78-80 and pp. 114-115 (1955).
- HAMRELIUS T., *Accurate temperature measurement in thermography - An overview of relevant features, parameters and definitions*, SPIE, vol. 1467, Thermosense XIII, pp. 448-457 (1991)
- HANSSON I., HANSSON C., *Electrical resistivity measurements of Portland cement based materials*, Cement and Concrete Research, vol. 13, issue 5, pp. 675-683 (September 1983).
- HASSAIM M., *Évaluation de la qualité de la peau du béton par analyse spectrale des ondes de surface*, Mémoire de maîtrise, Département de génie civil, Université de Sherbrooke, 149 p. (1999).
- HAUCK C., *The Effect of Curing Temperature and Silica Fume on Chloride Migration and Pore Structure of High Strength Concrete*, Doctoral Dissertation, Norges Tekniske Høgskole (NTH), University of Trondheim, Norway, 1993.
- HENNEKE E., RUSSEL S., *Vibrothermography*, Non-destructive testing handbook, second edition, vol. 9, pp. 336-340 (1994).
- HENRY R., *Water vapor transmission and electrical resistivity of concrete*, Y-R011-01001-025, Final Report, U.S. Naval Civil Engineering Laboratory (Port Hueneme, California), 40 p. (1964).
- HESSE A., LOLIVET A., TABBAGH A., *New prospects in shallow depth electrical surveying for archeological and pedological applications*, Geophysics, vol. 51, issue 3, pp. 585-594 (March 1986).
- HEVIN G., *Utilisation des ondes de surface pour l'auscultation des structures en génie civil : application à la caractérisation des fissures de surface*, Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier (Grenoble), 160 p. (1998).

- HINES A., *Infrared thermography applications at Dofasco Inc.*, Canadian Institute for NDE Journal, vol. 23, n°3, pp. 8-18 (July-August 2002).
- HOLF F., EALES J., *Non destructive evaluation of pavements*, Concrete International, p.41-45 (1987).
- HOPE B., IP A., MANNING D., *Corrosion and electrical impedance in concrete*, Cement and Concrete Research, vol. 15, issue 3, pp. 525-534 (May 1985).
- HOULE D., *Rôle des armatures dans le développement de la réaction alcalis-granulats dans le béton*, Mémoire de maîtrise, Département de génie civil, Université de Sherbrooke, 162 p. (Avril 1998).
- HUGHES B., SOLEIT A., BRIERLY R., *New Technique for Determining the Electrical Resistivity of Concrete*, Magazine of Concrete Research, vol. 37, issue 133, pp. 243-248 (1985).
- HUNKELER F., *The resistivity of pore water solution – a decisive parameter of rebar corrosion and repair method*, Construction and Building Materials, vol. 10, issue 5, pp. 381-389 (1996).
- HUMMEL J., *A theoretical study of apparent resistivity in surface potential methods*, Trans. Amer. Inst. Min. Met. Eng., vol. 97, pp. 392-422 (1932).
- JONES A., CLARK L., *The effects of ASR on the properties of concrete and the applications for assessment*, Engineering Structures, vol. 20, issue 9, pp.785-791 (1998).
- KABIR S., *Recognition of Deterioration Patterns in Concrete Structures using Wavelets for Multiscale Texture Analysis*, rapport prédoctoral, Université de Sherbrooke, 50 p. (2005).
- KARASTATHIS V., KARMIS P., DRAKATOS G., STAVRAKAKIS G., *Geophysical methods contributing to the testing of concrete dams: Application at the Marathon Dam*, Journal of Applied Geophysics, vol. 50, Issue 3, pp. 247-260 (June 2002).
- KELLER G., *Electrical properties of rocks and minerals*, chapter 2 in *Handbook of physical properties of rocks, vol. 1*, Carmichael R. edition, CRC Press (Boca Raton, Florida), pp. 217-293 (1982).
- KHAN M, BHATTACHARJEE B., *An experimental investigation on influence of aggregate type and moisture content on thermal conductivity of concrete*. In: CHOI E, editor. Building envelope systems and technology. Centre for Continuing Education, Nanyang Technological University, Singapore, pp. 522-526 (1994).
- KHAN M., *Factors affecting the thermal properties of concrete and applicability of its prediction models*, Building and Environment, vol. 37, issue 6, pp. 607-614 (June 2002).
- KHANNA S., DIKSHIT O., MISRA S., *Some applications of infrared thermography in concrete engineering*, the Indian Concrete Journal, pp. 644-649 (October 2002).
- KHARRAT Y., *Auscultation des structures en béton par tomographie sonore de vitesse d'atténuation*, Thèse de doctorat, Université de Sherbrooke, 314 p. (juin 1997).
- KIM K., JEON S., KIM J., YANG S., *An experimental study on thermal conductivity of concrete*, Cement and Concrete Research, vol. 33, issue 3, pp. 363-371 (March 2003).

- KLYSZ G., BALAYSSAC J.P., DEROBERT X., AUBAGNAC C., *Evaluation of cover concrete by coupling some non-destructive techniques – Contribution of in-situ measurements*, Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE), Berlin, poster n°009 (September 2003).
- KLYSZ G., *Caractérisation du béton d'enrobage par technique radar : exploitation de l'onde directe émetteur-récepteur*, Thèse de doctorat, Université Toulouse III – Paul Sabatier, 233 p. (décembre 2004).
- KLYSZ G., LATASTE J.-F., FNINE A., DEROBERT X., PIWAKOWSKI B., BUYLE-BODIN F., *Auscultation non destructive du chevêtre du pont de la Marque (59)*, Revue Européenne de Génie Civil, vol. 10, n°1, pp. 7-24 (2006).
- KODJO A., COHEN-TENOUDJI F., CONSTANTOPOULOS C., GALLIAS J., *Nouvelle technique acoustique pour la caractérisation du béton endommagé par l'alcali-réaction*, XXIII^{èmes} Rencontres Universitaires de Génie Civil 2005, Grenoble, 8 p. (Mai 2005).
- KULKARNI V., *Use of infrared thermography in the restoration of a building*, the Indian Concrete Journal, pp. 323-325 (June 1996).
- KUNETZ G., *Principles of direct current resistivity prospecting*, Gebrüder-Bornträger, Berlin-Nikolassee, 103 p. (1966).
- LAGABRIELLE R., *Géophysique appliquée au génie civil*, Techniques de l'Ingénieur, C 224, 19 p. (Février 1998).
- LAGABRIELLE R., *Diagraphies et géophysique de forage*, Techniques de l'Ingénieur, C 225, 17 p. (Août 1999).
- LAKSHMINARAYANAN V., RAMESH P., RAJAGOPALAN S., *A new technique for the measurement of the electrical resistivity of concrete*, Magazine of Concrete Research, vol. 44, n°158, pp. 47-52 (1992).
- LANGFORD P. BROOMFIELD J., *Monitoring the Corrosion of Reinforcing Steel*, Construction Repair, vol. 1, issue 2, pp. 32-36 (May 1987).
- LARIVE C., *Apports combinés de l'expérimentation et de la modélisation à la compréhension de l'alcalis-réaction et de ces effets mécaniques*, Thèse de doctorat, École Nationale des Ponts et Chaussées, 327 p. (1997).
- LATASTE J.-F., *Propriétés électriques des bétons : relation entre propriétés électriques et mécaniques*, Rapport de DEA, École Centrale de Paris, 62 p. (1998).
- LATASTE J.F., SIRIEIX C., BREYSSE M., FRAPPA M., *Mesures électriques sur bétons : corrélations entre mesures électriques et mécaniques*, 2^{ème} congrès Universitaire de Génie Civil, AUGC (Poitiers), vol. 1, pp. 76-83, ISBN 2-9509268-7-8 (Mai 1999).
- LATASTE J.-F., BREYSSE D., ABRAHAM O., FARGEOT B., *Évaluation Non Destructive de l'état d'endommagement des ouvrages en béton armé - Stratégie générale et identification des besoins*, XIX^{èmes} Rencontres Universitaires de Génie Civil - COSS'01, Lille - Villeneuve d'Ascq, 6 p. (Mai 2001).

- LATASTE J.-F., *Évaluation Non Destructive de l'état d'endommagement des ouvrages en béton armé par mesures de résistivités électriques*, Thèse de doctorat, Université Bordeaux I, 295 p. (Décembre 2002).
- ^a LATASTE J.-F., ABRAHAM O., BREYSSE D., SIRIEIX C., *Sensitivity to crack parameters of two non destructive techniques: electrical resistivity measurements and acoustic methods*, International Symposium of Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE 2003), Berlin, communication n°059 (September 2003).
- ^b LATASTE J.F., SIRIEIX C., BREYSSE D., FRAPPA M., *Improvement of electrical resistivity measurement for non destructive evaluation of concrete structures*, 2nd International RILEM workshop on life and aging management on concrete structures, Paris, pp. 93-102 (May 2003).
- LATASTE J.F., BREYSSE D., SIRIEIX C., NAAR S., *Electrical resistivity measurements on various concretes submitted to marine atmosphere*, Proceedings of the 2nd International Conference on Concrete and Reinforced Concrete – Developments Trends (Moscow), pp. 666-672 (5-9 September 2005).
- LAURENCET P., JACCOUD J.P., *Fissuration, étanchéité, et durabilité des structures en béton armé*, Annales du bâtiment et des travaux publics, n°6, pp. 13-22 (2000).
- LAURENS S., *Aptitude de la technique radar à la caractérisation du béton d'enrobage. Aide au diagnostic de la corrosion des armatures*, Thèse de doctorat, INSA de Toulouse – Université de Sherbrooke, 211 p. (2001).
- LAURENT J.-P., *Contribution à la caractérisation thermique des milieux poreux granulaires : optimisation d'outils de mesure in-situ des paramètres thermiques, application à l'étude des propriétés thermiques du matériau terre*, Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble (1986).
- LOULIZI A., AL-QADI I., LAHOUAR S., *Ground Penetrating Radar Signal Modeling to Assess Concrete Structures*, American Concrete Institute Materials Journal, vol. 99, n°3, pp. 282-291 (May 2002).
- LE SANT Y., MARCHAND M., MILLAN P., FONTAINE J., *An overview of infrared thermography techniques used in large winds tunnels*, Aerospace Science and Technology, vol. 6, issue 5, pp. 355-366 (September 2002).
- LEBOURG T., FRAPPA M., SIRIEIX C., *Reconnaissance des surfaces de rupture dans les formations superficielles instables par mesures électriques*, PANGEA, n°31-32, pp. 69-72 (1999).
- LI K., *Modélisation chimico-mécanique du comportement des bétons affectés par la réaction d'alcali-silice et expertise numérique des ouvrages d'art dégradés*, Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 219 p. (Septembre 2002).
- LI Z., YAO W., LEE S., LEE C., YANG Z., *Application of infrared thermography technique in building finish evaluation*, Journal of Nondestructive Evaluation, vol. 19, issue 1, pp. 11-19 (March 2000).
- LOKE M., BARKER R., *Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections using a quasi-Newton method*, Geophysical Prospecting, vol. 44, pp. 131-152. (1996).

- LOMBARDI J, PERRUCHOT A., MASSARD P., LARIVE C., *Etude comparée de gel silico-calciques produits des réactions alcalis-granulats dans les bétons et de gels synthétiques types*, Cement and Concrete Research, vol. 26, issue 4, pp. 623-631 (April 1996).
- LOULIZI A., AL-QADI I., LAHOUAR S., *Ground-Penetrating Radar Signal Modeling to Assess Concrete Structures*, ACI Materials Journal, vol. 99, n°3, pp. 282-291 (2002).
- MAALEDJ M., *Contribution à l'étude de la thermo-migration de l'eau dans les milieux poreux*, Thèse de doctorat, Paris (1968).
- MAGNAN J.-P., *Cours de mécanique des sols et des roches – Chapitre 1 Les matériaux naturels : sols et roches*, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 146 p. (2000).
- MAIERHOFER CH., KRAUSE M., WIGGENHAUSER H., *Non-destructive investigation of sluices using radar and ultrasonic impulse echo*, NDT&E International, vol. 31, issue 6, pp. 421–427 (December 1998).
- MAIERHOFER CH., ZIEBOLZ A., KÖPP C., *ONSITEFORMASONRY - A European Research Project: On-site investigation techniques for the structural evaluation of historic masonry*, International Symposium of Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE 2003), Berlin, communication n°070 (September 2003).
- MAJOURAU S., *La télédétection thermique proche : exemple de dégradations appliquées au barrage du Chambon (Isère) et à la falaise de la Roque Gageac (Dordogne)*, Thèse de doctorat, Université Bordeaux I, 222 p. (Septembre 1990).
- MALDAGUE X., *Applications of Infrared Thermography in Non-Destructive Evaluation*, Trends in Optical Non-destructive Testing (invited chapter), Pramod Rastogi edition, pp. 591-609 (2000).
- MALDAGUE X., MOORE P., *Nondestructive Testing Handbook: Infrared and thermal testing, third edition, vol. 3*, ISBN°1571170448, American Society for Non-destructive Testing, 718 p. (2001).
- MAQSOOD A., KAMRAN K., GUL I. H., *Prediction of thermal conductivity of granite rocks from porosity and density data at normal temperature and pressure: in situ thermal conductivity measurements*, Journal of physics D: applied physics, vol. 37, pp. 3396-3401 (December 2004).
- MARESCOT L., CHAPPELLIER D., *Resistivity surveying applied to hydrogeological characterisation of Quaternary paleo-valleys*, Proceedings of the 9th EEGS-ES meeting, Prague, Czech Republic, (August 2003).
- MARESCOT L., *Modélisation directe et inverse en prospection électrique sur des structures 3D complexes par la méthode des éléments finis*, Thèse de doctorat Université de Lausanne - Université de Nantes, 208 p. (2004).
- MARTINAUD M., MADANI F., *Spécificité de la résistivité pôle-pôle pour la description 3D des terrains - Bases théoriques et exemples*, 2^{ième} colloque GEOFCAN, Orléans (France), pp. 151-155 (Septembre 1999).
- MARTIN OCANA S., CANAS GUERRERO I., GONZALEZ REQUENA I., *Thermographic survey of two rural buildings in Spain*, Energy and Buildings, vol. 36, issue 6, pp. 515-523 (June 2004).

- MATHER B., *How to make concrete that will not suffer deleterious alkali-silica reaction*, Cement and Concrete Research, vol. 29, issue 8, pp. 1277-1280 (August 1999).
- MAXWELL C., *Treatise on electricity and magnetism*, vol.1, ISBN°0-19-850373-3, Clarendon Press Series, Oxford, 588 p. (1873).
- McCANN D., FORDE M., *Review of NDT methods in the assessment of concrete and masonry structures*, NDT&E International, vol. 34, issue 2, pp. 71-84 (March 2001).
- McCARTER W., FORDE M., WHITTINGTON H., *Resistivity characteristics of concrete*, proceedings of the Institution of Civil Engineers, Part 2, vol. 71, pp. 107-117 (1981).
- McCARTER W., EZIRIM H., EMERSON M., *Properties of concrete in the cover zone: water penetration, sorptivity and ionic ingress*, Magazine of Concrete Research, vol. 48, n°176, pp. 149-156 (1996).
- McNEILL J., *Electrical conductivity of soils and rocks*, technical note TN-5, Geonics Ltd, Mississauga (Ontario, Canada), 22 p. (October 1980).
- MEOLA C., DI MAIO R., ROBERTI N., CARLOMAGNO G., *Application of infrared thermography and geophysical methods for defect detection in architectural structures*, Engineering Failure Analysis, vol. 12, Issue 6, pp. 875-892 (December 2005).
- METIVIER J.-M., *Applications de la télédétection thermique rapprochée à la mécanique des roches et au génie civil*, Thèse de doctorat, Université Bordeaux I, 208 p. (Décembre 1981).
- MILLARD S., GHASSEMI M., BUNGEY J., *Assessing the electrical resistivity of concrete structures for corrosion durability studies*, 3rd Symposium on corrosion of reinforcement in concrete construction, Wishaw, Society of Chemical Industry, pp. 303-313 (May 1990).
- MILLARD S., *Reinforced concrete resistivity measurement techniques*, Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Part 2, vol. 91, pp. 71-88 (1991).
- MILLARD S., GOWERS K., *Resistivity assessment of in situ concrete: the influence of conductive and resistive surface layers*, Proceedings of the Institution of Civil Engineers in Structures and Buildings, vol. 94, issue 4, pp. 389-396 (November 1992).
- MISSENARD A., *Conductivité thermique des solides liquides, gaz et leurs mélanges*, édition Techniques et Documentation (Paris), 521 p. (1965).
- MONFORE G., *The electrical resistivity of concrete*, Journal of the PCA research and development laboratories, vol. 10, issue 2, pp. 35-48 (May 1968).
- MOROPOULOU A., AVDELIDIS N.P., KOUI M., *Detection of defects of airport pavements using infrared thermography*, Canadian Society for NonDestructive Testing Journal, vol. 21, issue 5, pp. 5-8 (September-October 2000).
- MOROPOULOU A., AVDELIDIS N.P., KOUI M., KAKARAS K., *An application of thermography for detection of delaminations in airport pavements*, NDT&E International, vol. 34, issue 5, pp. 329-335 (July 2001).

- MORRIS W., MORENO E., SAGUES A., *Practical evaluation of resistivity of concrete in test cylinders using a Wenner array probe*, Cement and Concrete Research, vol. 26, issue 12, pp. 1779-1787 (1996).
- NAAR S., DEROBERT X., SIRIEIX C., BREYSSE D., LATASTE J-F., *Auscultation du conduit Matière (OH 1483) sous l'autoroute A64 près de Tarbes - Synthèse des résultats issus des différentes techniques*, Rapport CDGA n° 2004-0030, 24 p. (Décembre 2004).
- NAAR S., SIRIEIX C., BREYSSE D., DEROBERT X., *Assessment of water saturation rate in a reinforced concrete structures: non-destructive testing of Tarbes' precast duct*, Proceedings of the 2nd International Conference on Concrete and Reinforced Concrete – Developments Trends (Moscow), pp. 673-679 (5-9 September 2005).
- NAUDET V., *Les méthodes de résistivité électriques et de potentiel spontané appliquées au site contaminé*, Thèse de doctorat, Université d'Aix-Marseille III, 203 p. (2004).
- NEVILLE A., *Propriétés des bétons*, édition Eyrolles, Paris, 806 p. (2000).
- NUNES DOS SANTOS W., *Effect of moisture and porosity on the thermal properties of a conventional refractory concrete*, Journal of the European Ceramic Society, vol. 23, issue 5, pp. 745-755 (April 2003).
- OECD-NEA, *Development priorities for Non-Destructive Examination of concrete structures in nuclear plant*, ref. NEA/CSNI/R(98)6, 62 p. (October 1998).
- OLAFSSON H., *The effect of relative humidity and temperature on alkali expansion of mortar bars*, 7^e International Conference of Alkali-Aggregates Reaction, Ottawa (Canada), pp. 461-465 (1987).
- OSIANDER R., McLACHLAN SPICER J., MURPHY J., *Analysis method for full-field time resolved infrared radiometry*, Thermosense XVIII, SPIE, vol. 2766, International Society for Optical Engineering, pp. 218-227 (1996).
- OSIANDER R., McLACHLAN SPICER J., *Time-resolved infrared radiometry with step heating. A review*, Revue Générale de Thermique, vol. 37, issue 8, pp. 680-692 (September 1998).
- OSTROWSKY C., DEFER D., RHAZI J., BALLIVY G., *Application de la thermographie infrarouge à différents types d'ouvrages de Génie civil*, 9^e colloque sur la progression de la recherche québécoise sur les ouvrages d'art, Université Laval (Québec), 8 p. (7 et 8 mai 2002).
- OSTROWSKY C., *Auscultation des ouvrages en béton par thermographie infrarouge : application aux câbles de précontrainte*, Thèse de doctorat, Université de l'Artois - Université de Sherbrooke, 170 p. (Novembre 2005).
- PALARDY D., BALLIVY G., *Élimination des formations de glace et évaluation qualitative du revêtement de béton de la voûte Tunnel Mont-Royal, station Canora*, rapport GR-99-04-02, Agence métropolitaine de transport, 40 p. (30 avril 1999).
- PING X., MING-SHU T., *Effect of Portland cement paste-aggregate interface on electrical conductivity and chemical corrosion resistance of mortar*, Il Cemento, vol. 85, issue 1, pp. 33-42 (1988).

- PLA-RUCKI G., EBERHARD M., *Imaging of reinforced concrete: state-of-the-art review*, Journal of infrastructures systems, pp. 134-141 (June 1995).
- PLEAU R., BÉRUBÉ M.-A., PIGEON M., FOURNIER B., RAPHAËL S., *Mechanical Behaviour of concrete affected by ASR*, 8th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, Kyoto (Japan), pp. 721-726 (1989).
- POLDER R., *RILEM TC 154-EMC: electrochemical techniques for measuring metallic corrosion*, Materials and Structures, vol. 33, pp. 603-611 (December 2000).
- POYET S., *Etude de la dégradation des ouvrages en béton atteints par la réaction alcali-silice : Approche expérimentale et modélisation numérique multi-échelles des dégradations dans un environnement hydro-chemo-mécanique variable*, Thèse de doctorat, Université de Marne-La-Vallée, 213 p. (Décembre 2003).
- PRINCIGALLO A., VAN BREUGEL K., LEVITA G., *Influence of the aggregate on the electrical conductivity of Portland cement concretes*, Cement and Concrete Research, vol. 33, issue 11, pp. 1755-1763 (November 2003).
- PROCEQ, Profometer 5, 4 p. (2002).
- PRUCKNER F., GJØRV O., *Effect of CaCl₂ and NaCl additions on concrete corrosivity*, Cement and Concrete Research, vol. 34, issue 7, pp. 1209-1217 (July 2004).
- RAFAÏ N., HORNAIN H., VILLAIN G., BEROGHEL BOUNY V., PLATRET G., CHAUSSADENT T., *Comparaison et validité des méthodes de mesure de la carbonatation*, Revue Française de Génie Civil, vol 6, issue 2, pp. 251-274 (2002).
- RAHARINAIVO A, ARLIGUIE G., CHAUSSADENT T., GRIMALDI G., POLLET V., TACHÉ G., *La corrosion et la protection des aciers dans le béton*, Presses de l'École Nationales des Ponts et Chaussées, Paris, ISBN 2-85978-300-8, 167p. (1998).
- RAHARINAIVO A., *La recommandation RILEM sur la localisation des zones de corrosion métallique par cartographie de potentiel*, Séminaire CEFACOR Electrochimie et béton armé, 25 janvier 2001, 6 p. (2001).
- RAHMANI N., *Détection des cavités souterraines par la méthode des résistivités : modélisation directe et processus inverse*, Thèse de doctorat, Université Bordeaux 1, 195 p. (1998).
- RENGASWANY N., SRINIVASAN S., SUBRAMANIAN D., BALAKRISHNAN K., *Electrical resistivity as a tool for assessment of porosity concrete structure*, The Indian Concrete Journal, pp. 259-263 (May 1994).
- REY F., LATASTE J.-F., PRETOU F., HUNEAU F., FABRE R., FRAPPA M., LASTENNET R., RISS J., *Application de la méthode des résistivités électriques dans la recherche en eau dans les Pyrénées Occidentales : Exemple de la fontaine d'Orbe (Arette, France)*, 2^{ème} Colloque de Géophysique Appliquée, Marrakech (Maroc), 3 p. (Mai 2004).
- RGC&U, *Évaluation de la dégradation du béton d'enrobage et aide au diagnostic et à la réparation des ouvrages – Deuxième rapport intermédiaire*, 69 p. (Juin 2003).

- RGC&U, *Évaluation de la dégradation du béton d'enrobage et aide au diagnostic et à la réparation des ouvrages - Rapport final*, 208 p. (Mars 2005).
- RHAZI J., DOUS O. BALLIVY G., *Non destructive health evaluation of concrete bridge decks by GPR and half cell potential techniques*, Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE), Berlin, poster n°057 (September 2003).
- RIVARD P., FOURNIER B., BALLIVY G., *Quantitative petrographic technique for concrete damage due to ASR: experimental and application*, Cement, Concrete, and Aggregates, vol. 22, issue 1, pp. 63-72 (June 2000).
- RIVARD P., *Contribution à l'étude de l'expansion résiduelle des bétons atteints de réactivité alcalisilice*, Thèse de doctorat, Université de Sherbrooke - INSA de Toulouse, 250 p. (Septembre 2002).
- RIVARD P., FOURNIER B., BALLIVY G., *Some considerations about the Damage Rating Index method*, Cement, Concrete, and Aggregates, vol. 24, issue 2, pp. 80-90 (December 2002).
- ^a RIVARD P., *Formulation et propriétés mécaniques du béton des dalles escalier et des dalles A, B, C, D, E et F*, Rapport N°GRAI-03-01-01, 8 p. (Janvier 2003).
- ^b RIVARD P., *Formulation, caractéristiques microstructurales et propriétés mécaniques du béton des dalles B1, B2, B3, B4, et B5*, Rapport N°GRAI-03-02-01, 9 p. (Février 2003).
- RIVARD P., NAAR S., SBARTAÏ M., FOURNIER B., *Couplage de méthodes non destructives pour l'évaluation de l'endommagement du béton*, 12^e colloque sur la progression de la recherche québécoise sur les ouvrages d'art, Université Laval (Québec), 12 p. (10 et 11 mai 2005).
- ROENELLE P., OGLAZA C., *Chapitre B7 : Méthodes radiographiques d'évaluation non destructive*, pp. 305-328, dans BREYSSE D., ABRAHAM O., *Méthodologie d'évaluation non destructive de l'état d'altération des ouvrages en béton*, ISBN°2-85978-405-5, Presses de l'École Nationales des Ponts et Chaussées (Paris), 555 p. (2005).
- ROGERS C., *General information on standard alkali-aggregate from Ontario*, documents du Ministère ontarien des transports, Engineering Materials Office, 59 p. (1988).
- RYALL M., HARDING J., PARKE G., *Bridge Management: Inspection, Maintenance, Assessment, and Repair*, Thomas Telford Limited, ISBN°0727728547, 780 p. (January 2000).
- SABINS F., *Remote sensing - principles and interpretation*, second edition, Freeman Press (New-York), 449 p. (1987).
- SAHEBI M., *Application de la tomographie sonore au diagnostic du béton : possibilités et limites*, Maîtrise ès sciences appliquées (spécialité : génie civil), Université de Sherbrooke, 145 p. (Août 1996).
- SAINT-PIERRE F., RIVARD P., SAURIOL B., BALLIVY G., *Étude de l'évolution de la réaction alcalis-silice par méthodes ultrasoniques*, 11^e Colloque sur la progression de la recherche québécoise portant sur les ouvrages d'art, Université Laval-Québec (2004).

- SAKAGAMI T., KUBO S., *Development of a 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, issues 3-5, pp. 311-316 (June 2002).
- SALEEM M., SHAMEEM M., HUSSAIN S., MASLEHUDDIN M., *Effect of moisture and sulphate contamination on the electrical resistivity of Portland cement concrete*, Construction and Building Materials, vol. 10, issue 3, pp. 209-214 (April 1996).
- SALERNO A., WU D., BUSSE G., RANTALA J., *Thermographic inspection with ultrasonic excitation*, Review of progress in quantitative non-destructive evaluation, vol. 16, pp. 345-352 (1997).
- SBARTAI M., *Caractérisation physique des bétons par radar – Approche neuromimétique de l'inversion*, Thèse de doctorat, Université Toulouse III – Université de Sherbrooke, 244 p. (2005).
- SCOTT M., REZAIZADEHA A., DELAHAZA A., SANTOS C., MOORE M., GRAYBEALE B., WASHER G., *A comparison of nondestructive evaluation methods for bridge deck assessment*, NDT&E International, vol. 36, issue 4, pp. 245-255 (June 2003).
- SCUDIERI F., MERCURI F., VOLTERRI R., *Non-invasive analysis of artistic heritage and archaeological findings by time resolved IR thermography*, Journal of thermal analysis and calorimetry, vol. 66, pp. 307-314 (2001).
- SETZER M., *Interaction of water with hardened cement paste*, in Advances in cementitious materials, American Ceramic Society Transactions, vol. 16, issue 2, pp. 232-248 (1990).
- SHIN K.-Y., KIM S.-B., KIM J.-H., CHUNG M., JUNG P.-S., *Thermo-physical properties and transient heat transfer of concrete at elevated temperatures*, Nuclear Engineering and Design, vol. 212, issues 1-3, pp. 233-241 (March 2002).
- SIRIEIX C., *Téledétection thermique rapprochée appliqué aux ouvrages souterrains : sites du barrage de Vieux-Pré et de deux tunnels ferroviaires à Bayonne*, Thèse de doctorat, Université Bordeaux 1, 199 p. (1990).
- SIRIEIX C., DEFER D., ANTCZAK E., *Chapitre B5 : Méthodes thermiques d'évaluation non destructive*, pp. 253-274, dans BREYSSE D., ABRAHAM O., *Méthodologie d'évaluation non destructive de l'état d'altération des ouvrages en béton*, ISBN 2-85978-405-5, Presses de l'École Nationales des Ponts et Chaussées (Paris), 555 p. (2005).
- SLAWINSKI A., *Conductibilité d'un électrolyte contenant des sphères diélectriques*, Journal de chimie physique, vol. 23, pp. 710-727 (1926).
- SNYDER K., FENG X., KEEN B., MASON T., *Estimating the electrical conductivity of cement paste pore solutions from OH^- , K^+ and Na^+ concentrations*, Cement and Concrete Research, vol. 33, issue 6, pp. 793-798 (June 2003).
- SPENCER R., *Measurement of the Moisture Content of Concrete*, Journal of the American Concrete Institute, vol. 9, issue 1, pp. 45-61 (September-October 1937).

- STANTON T., *Influence of cement and aggregate on concrete expansion*, *Engineering new record*, vol. 1, pp.59-61 (February 1940).
- STARNES M., CARINO N., KAUSEL E., *Preliminary thermography studies for quality control of concrete structures strengthened with fiber-reinforced polymer composites*, *Journal of materials in civil engineering*, pp. 266-273 (May-June 2003).
- STEFANESCO S., SCHLUMBERGER C., SCHLUMBERGER M., *Sur la distribution électrique potentielle autour d'une prise de terre ponctuelle dans un terrain à couches horizontales, homogènes et isotropes*, *Le Journal de Physique et le Radium*, Tome I, Série VII, n°4, pp. 132-140 (1930).
- STIMOLO M., *Passive infrared thermography as inspection and observation tool in bridge and road construction*, *International Symposium of Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE 2003)*, Berlin, communication n°083 (September 2003).
- TAILLADE F., *Chapitre B8 : Méthodes optiques d'évaluation non destructive*, pp. 329-352, dans BREYSSE D., ABRAHAM O., *Méthodologie d'évaluation non destructive de l'état d'altération des ouvrages en béton*, ISBN 2-85978-405-5, Presses de l'École Nationales des Ponts et Chaussées (Paris), 555 p. (2005).
- TASHIRO C., YAMADA K., *Study of relationship between alkali-aggregate reaction and electrical resistivity*, 8th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, Kyoto (Japan), pp. 381-383 (1989).
- TENEK L., HENNEKE E., *Flaw dynamics and vibro-thermographic thermoelastic NDE of advanced composite materials*, *Thermosense XIII, Proceedings SPIE*, vol. 1467, pp. 252-263 (1991).
- TELFORD W.M., GELDART L.P., SHERIFF R.E., *Applied Geophysics*, Cambridge University Press, Cambridge, ISBN 0-521-32693-1, 770 p. (1990).
- TITMAN D., *Applications of thermography in non-destructive testing of structures*, *NDT&E International*, vol. 34, issue 2, pp. 149-154 (March 2001).
- TOURET J.-P., *Surveillance et réhabilitation des ouvrages*, *Actes du colloque Recherche & Innovation en Génie Civil*, MENRT, Paris, p. 25 (Avril 1998).
- TUMIDAJSKI P., SCHUMACHER A., PERRON S., GU P., BEAUDOIN J., *On the relationship between porosity and electrical resistivity in cementitious systems*, *Cement and Concrete Research*, vol. 26, issue 4, pp. 539-544, (April 1996).
- TUUTTI K., *Corrosion of steel in concrete*, Swedish Cement and Concrete Research Institute, ISSN 0346-6906, 469p. (1982).
- UOMOTO T., *Utilization of NDI to inspect internal defects in reinforced concrete structures*, *International Symposium of Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE 2003)*, Berlin, communication n°028 (September 2003).
- UYSAL H., DEMIRBOGA R., SAHIN R., GÜL R., *The effects of different cement dosages, slumps, and pumice aggregate ratios on the thermal conductivity and density of concrete*, *Cement and Concrete Research*, vol. 34, issue 5, pp. 845-848 (May 2004).

- VAN NOSTRAND R., COOK K., *Interpretation of resistivity data*, Professional Paper 499, Washington, DC: U.S. Geological Survey (1966).
- VAVILOV V., MALDAGUE X., *Optimization of heating protocol in thermal NDT, short and long heating pulses: a discussion*, Research in non-destructive evaluation, vol. 6, pp. 1-17 (1994).
- VAVILOV V., DEMIN V., *Infrared thermographic inspection of operating smokestacks*, Infrared Physics & Technology, vol. 43, issues 3-5, pp. 229-232 (June 2002).
- VERIFICATEUR GENERAL DU QUEBEC, *Rapport à l'Assemblée Nationale pour l'année 2002-2003*, Tome II, ISBN^o2-550-41766-6, 260 p. (2003).
- VILLESUZANNE B., *Application des mesures des propriétés électriques au diagnostic d'endommagement d'ouvrages en béton*, Rapport de DEA de l'INSA Toulouse, 64 p. (1999).
- VODAK F., CERNY R., DRCHALOVA J., HOSKOVA S., KAPICKOVA O., MICHALKO O., SEMERAK P., TOMAN J., *Thermophysical properties of concrete for nuclear-safety related structures*, Cement and Concrete Research, vol. 27, issue 3, pp. 415-426 (1997).
- WASHER G., *Non-destructive evaluation for highway bridges in the US*, International Symposium of Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE 2003), Berlin, communication n^o109 (September 2003).
- WATANABE , MISRA S., UOMOTO T., *Non-destructive evaluation of concrete structures – A case study in detailed inspection using 24-year-old reinforced concrete*, International Symposium of Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE 2003), Berlin, poster n^o057 (September 2003).
- WEIL G., ROWE T., *Non-destructive testing and repair of the concrete roof shell at the Seattle Kingdome*, NDT&E International, vol. 31, issue 6, pp. 389-400 (December 1998).
- WEN S., CHUNG D.D.L., *Uniaxial tension in fiber reinorced cement sensed by electrical resistivity measurement in longitudinal and transverse directions*, Cement and Concrete Research, vol. 30, issue 8, pp. 1289-1294 (August 2000).
- WENNER F., *A method of measuring earth resistivity*, Bulletin of the bureau of Standards, vol. 12, pp. 469-478 (1915).
- WERITZ F., WELDER G., BRINK A., ROLLIG M., MAIERHOFER C., WIGGENHAUSER H., *Investigation of concrete structures with pulse phase thermography*, International Symposium of Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE 2003), Berlin, communication n^o080 (September 2003).
- WEYDERT R., GEHLEN C., *Electrolytic resistivity of cover concrete: Relevance, measurement and interpretation*, Durability of Buildings Materials and Components (Vol. 1), Edition M.A. Lacasse and D.J. Vanier, ISBN 0-660-17737-4, pp. 409-419 (1999).
- WHITING D., NAGI M., *Electrical Resistivity of Concrete - A Literature Review*, R&D Serial n^o2457, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, USA, 57 p. (2003).
- WHITTINGTON H., McCARTER J., FORDE M., *The conduction of electricity through concrete*, Magazine of Concrete Research, vol. 33, issue 114, pp. 48-60 (March 1981).

- WIGGENHAUSER H., *Active IR-applications in civil engineering*, Infrared Physics & Technology, vol. 43, issues 3-5, pp. 233-238 (June 2002).
- WOELF G., LAUER K., *The electrical resistivity of concrete with emphasis on the use of electrical resistance for measuring moisture content*, Cement Concrete and Aggregates, vol. 1, issue 2, pp. 64-67 (1980).
- WOLSIEFER J., *Silica Fume Concrete: a Solution to Steel Reinforcement Corrosion in Concrete*, proceedings of the 2th CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete, SP-126, American Concrete Institute, Farmington Hills, pp. 527-553 (1991).
- WU D., RANTALA J., KARPEN W., ZENZINGER G., SCHÖNBACH B., RIPPEL W., STEEGMÜLLER R., DIENER L., BUSSE G., *Applications of lockin-thermography methods*, Review of progress in quantitative non-destructive evaluation, vol. 15, pp. 511-519 (1996).
- WU D., SALERNO A., SEMBACH J., MALDAGUE X., RANTALA J., BUSSE G., *Lockin thermography inspection of wood particles boards*, Thermosense XIX, SPIE proceedings, vol. 3056, pp. 230-234 (1997).
- XIE P., GU Y., BEAUDOIN J., *Determination of blast-furnace slag content in hardened concrete by electrical conductivity methods*, Cement, Concrete, and Aggregates, vol. 17, issue 1, pp. 79-83 (June 1995).
- XU Y, CHUNG D.D.L., *Increasing the specific heat of cement paste by admixture surface treatments*, Cement and Concrete Research, vol. 29, issue 7, pp. 1117-1121 (July 1999).
- YOTTE S., SALTA M., ROUSSEAU M., RODRIGUEZ-MARIBONA I., O'CONNOR A., MEMET J.-B., MARSSET B., LANVIN J.-D., DEROBERT X., ROQUE POVOA A., BREYSSE D., BONNET S., AÏT MOKHTAR K., *Endommagement des ouvrages historiques ou de transport de la côte atlantique dû à l'environnement marin : méthode de diagnostic et de réparation, maintenance. Projet MEDACHS*, Annales du Bâtiment et des Travaux Publics, n°5, pp. 37-41 (octobre 2005).

Références internet

<http://www.gietech.com/Thermo.htm>

<http://www.senat.fr>

Nomenclature

Notations utilisées en électricité

Notation	Désignation	Unité
σ	Conductivité électrique	$S.m^{-1}$
ρ	Résistivité électrique	$\Omega.m$
ρ_w	Résistivité électrique du fluide	$\Omega.m$
A	Section	m^2
L	Longueur	m
R	Résistance électrique	Ω
ΔV	Différence de potentiel	V
I	Intensité du courant	A
Sr	Degré de saturation	-
Φ	Porosité	-
D	Déplacement électrique	$C.m^{-2}$
E	Intensité du champ électrique	$V.m^{-2}$
P	Polarisation électrique	$C.m^{-2}$
η	Susceptibilité électrique	$F.m^{-1}$
ϵ	Permittivité ou constante diélectrique	$F.m^{-1}$
ϵ_0	Permittivité du vide	$F.m^{-1}$
V	Volume	m^3
F	Facteur de formation	-
k	Facteur géométrique	m
z	Profondeur	m
J	Densité de courant	$A.m^{-2}$
a	Espacement entre les électrodes	m

Notations utilisées en thermique

Notation	Désignation	Unité
k	Conductivité thermique	$W.m^{-1}.K^{-1}$
q	Flux de chaleur	W
h	Coefficient de convection	$W.m^{-2}.K^{-1}$
A	Surface	m^2
α	Energie absorbée	W
ρ	Energie réfléchie	W
τ	Energie transmise	W
ϵ	Emissivité	-
σ	Constante de Boltzmann	$W.m^{-2}.K^{-4}$
ϕ	Densité de flux	$W.m^{-2}$
c	Chaleur spécifique	$J.kg^{-1}.K^{-1}$
δ	Diffusivité thermique	$kg.m^{-3}$
b	Effusivité thermique	$J.K^{-1}.m^{-2}.s^{-1/2}$
p	Profondeur de pénétration	m
f	Fréquence	Hz

Autres notations utilisées dans le document

Notation	Désignation	Unité
E/C	Rapport de la masse d'eau / masse de ciment	-
f'_c	Résistance en compression	MPa
E	Module d'Young	GPa
w	Teneur en eau	%
Δf	Différence de fréquence	Hz
T	Température	K ou °C
ρ_v	Masse volumique	kg.m ⁻³

Annexes

Ce dernier chapitre comprend quatre annexes.

Les deux premières parties présentent le matériel utilisé dans les deux laboratoires d'accueil (CDGA et GRAI), à savoir, d'une part, les deux dispositifs « quadripôle carré » nécessaires aux mesures électriques, et d'autre part, les deux caméras infrarouges et leurs principales caractéristiques.

La troisième annexe présente les principaux outils statistiques utilisés lors de la thèse.

La quatrième et dernière partie donne quelques définitions de termes de métrologie vus dans le document.

Annexe 1 : le dispositif électrique

Les deux dispositifs porte-électrodes utilisés lors des mesures électriques sont des expérimentaux. Ils ont été fabriqués au sein des deux laboratoires (GRAI et CDGA). Le dispositif bordelais, le premier quadripôle carré fabriqué, est issu de plusieurs années de recherche (Lataste 2002). Sur les bases de ses travaux, un nouveau dispositif a été conçu au GRAI.

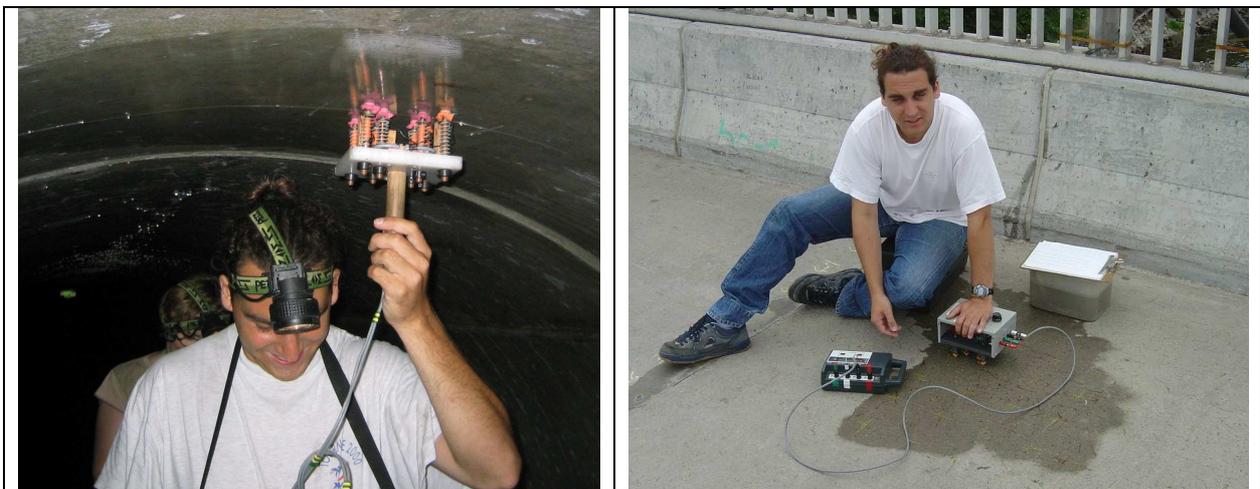


Figure Mesures électriques dans le conduit Matière de Tarbes (à gauche) et sur le pont Cosmos à Montréal (à droite)

Afin de valider l'interprétation des résultats, il convient de s'assurer de la bonne **représentativité des mesures**. En ce sens, des données expérimentales ont été acquises sur trois corps d'épreuve différents avec les deux dispositifs. Les conditions de mesures sont parfaitement identiques.

La figure ci-dessous illustre la très bonne corrélation ($R = 0,97$) entre les mesures réalisées avec le dispositif du GRAI et celles réalisées avec celui du CDGA.

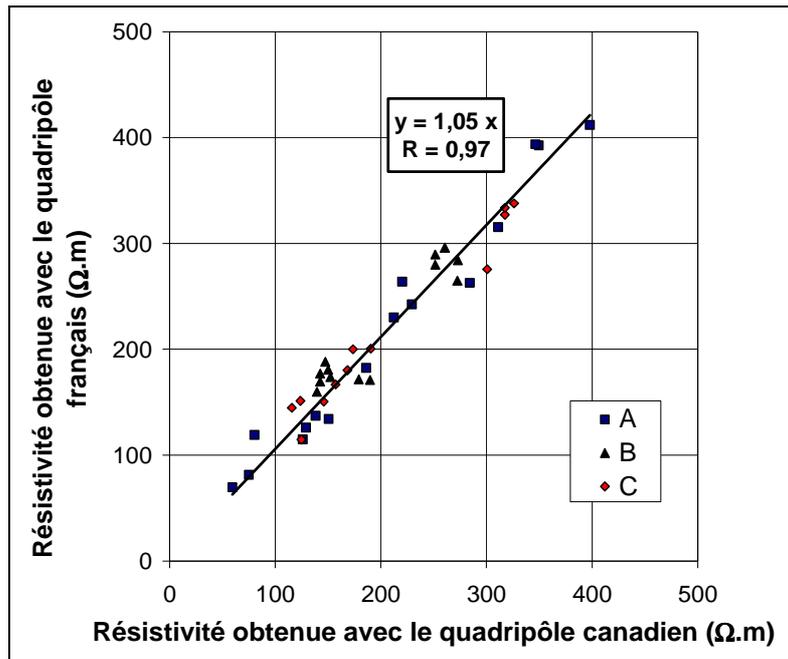


Figure Résultats des mesures électriques réalisées selon le dispositif utilisé

L'appareil de mesure utilisé est le « **mesureur de résistance de terre, résistivité de sols et de couplage, MEGGER DET 5/4 R** ».

Cet appareil de mesure de résistivité électrique est destiné à mesurer la résistivité des sols. Mais sa capacité à effectuer des mesures sur le béton (plus résistant électriquement) a déjà été démontrée (Lataste 2002).

Les caractéristiques principales de l'appareil sont données dans le tableau suivant. Ces données proviennent du manuel d'utilisation fourni lors de l'achat de l'appareil.

Fréquence du signal	128 Hz
Intensité injectée	entre 100 μ A et 10 mA
Différence de potentiel appliquée	50 V
Résistance mesurée	< à 20 k Ω
Précision de la mesure	\pm 2%
Alimentation	batterie (accumulateur)
Dimension	25 x 15 x 7 cm
Poids	1,3 kg

Cet appareil est d'utilisation facile avec un seul bouton à presser. Le résultat est affiché sous forme digital. Un commutateur automatique permet de changer de gamme de mesure. Les mesures peuvent être réalisées avec 2, 3 ou 4 bornes. Le temps de la mesure est d'environ 15 sec pour réaliser 4 mesures sans déplacer le dispositif quadripolaire carré. Des messages d'erreur peuvent s'afficher : « Noise » pour parasites excessifs de bruit, « Rp » pour défaut sur circuit potentiel ou « Rc » pour défaut sur circuit intensité. Enfin, un voyant clignote lorsque la tension de la batterie est faible.

Il est à noter que cet appareil ne permet pas le stockage des données.

Annexe 2 : le dispositif infrarouge

Deux caméras infrarouges ont été utilisées lors des différentes campagnes de mesure. Les deux appareils viennent de la même compagnie ©FLIR Systems. A Sherbrooke, le GRAI dispose du modèle ThermaCAM™ PM575. A Bordeaux, le CDGA possède le modèle ThermaCAM™ SC 2000. Cette deuxième caméra, en plus d'avoir un objectif infrarouge, possède un objectif vidéo.



Figure Caméra infrarouge (©FLIR Systems) : ThermaCAM™ PM575 (à gauche) - ThermaCAM™ SC 2000 (à droite)

Les principales caractéristiques des deux caméras sont données dans le tableau suivant. Ces données proviennent des manuels d'utilisation fournis lors de l'achat du matériel.

	ThermaCAM™ PM575	ThermaCAM™ SC 2000
Précision des mesures	± 2%	± 2%
Sensibilité thermique	< 0,1°C	< 0,08°C
Champ de vue	24° x 18°	24° x 18°
Distance minimale de focalisation	0,5 m	0,5 m
Type de détecteur	microbolomètre non refroidi	microbolomètre non refroidi
Découpage des images	320 x 240 pixels	320 x 240 pixels
Domaine spectral	7,5 à 13 µm	7,5 à 13 µm
Batterie (autonomie)	à hydrure métallique de nickel	à hydrure métallique de nickel
Autonomie de la batterie	2h	1h30 à 2h
Poids avec batterie	2,3 kg	2,43 kg
Dimensions	22,0 x 13,3 x 14,0 cm	20,9 x 12,2 x 13,0 cm
Caméra TV	non	640 x 280 pixels

Annexe 3 : les outils statistiques utilisés

Le terme statistique désigne à la fois un ensemble de données d'observations et l'activité qui consiste dans leur recueil, leur traitement et leur interprétation. L'outil statistique est aujourd'hui très utilisé dans le domaine du génie civil et doit faire partie des connaissances du gestionnaire. Parmi les innombrables applications, citons l'analyse des résultats (« statistique descriptive »), l'étude d'éventuelle corrélation entre deux séries de mesures (« régression linéaire »)...

Les paragraphes qui suivent précisent quelques notions de la statistique afin de rendre plus claire la lecture du document. Le lecteur trouvera donc les différentes notions fondamentales utilisées au cours de l'analyse des données. Non exhaustives, ces notions se retrouvent dans un grand nombre d'ouvrages spécialisés (Saporta 1990, Dagnélie 1998...).

Pour toutes séries de mesures, il est indispensable de les résumer par des indicateurs numériques typiques.

a. La moyenne arithmétique

Certainement l'indicateur le plus connu, la moyenne arithmétique, notée \bar{x} , d'une série de n données, notées x_i , est définie par :

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

L'unité de la moyenne arithmétique est la même que celle de la série de données. Elle est fonction de toutes les mesures et est sensible aux valeurs extrêmes : c'est un indicateur peu « robuste » (c'est-à-dire sensible à des valeurs « aberrantes »), bien qu'il soit utilisé couramment.

b. La variance

Après la moyenne arithmétique, la variance et l'écart-type (voir ci-dessous) sont les deux indicateurs numériques les plus utilisés. La variance est définie par :

$$s^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$$

L'unité de cet indicateur est la même que celle de la série de données.

c. L'écart-type

L'écart-type s est alors défini par la racine carrée de la variance. L'unité de cet indicateur est la même que celle de la variable étudiée.

d. Le coefficient de variation

On définit également le coefficient de variation d'une série de mesures CV, exprimé en pourcentage (%), comme le rapport de l'écart-type à la moyenne. La valeur exprime alors la variabilité de la série de mesures.

e. La régression linéaire ou liaison entre deux variables numériques

On étudie les éventuelles liaisons entre deux variables observées, ce que l'on appelle communément l'étude des corrélations.

f. La droite des moindres carrés

On suppose que l'on observe deux variables X et Y , pour n individus. On a donc n couples $(x_i; y_i)$. Pour examiner s'il existe une liaison entre X et Y , on représente chaque observation i comme un point de coordonnées $(x_i; y_i)$ dans un repère cartésien. La forme du nuage de points ainsi tracé est fondamentale pour la suite. La méthode des moindres carrés, due à Gauss, est alors la meilleure approximation de Y , variable expliquée, par X , variable explicative, en moyenne quadratique. On cherche donc à ajuster au nuage des points $(x_i; y_i)$ une droite d'équation

$y^* = a \cdot x + b$ de telle sorte que $\sum_{i=1}^n (y_i - y_i^*)^2$ soit minimale.

g. Le coefficient de corrélation linéaire

Le coefficient de corrélation linéaire R mesure le caractère plus ou moins linéaire du nuage de points tracé. Il est un indicateur de la qualité de l'ajustement (par la méthode des moindres carrés). Il est défini par :

$$R = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{s_x s_y}$$

où \bar{x} , s_x , \bar{y} et s_y sont respectivement la moyenne et l'écart-type de x et y . Le numérateur correspond à la covariance observée. Ce coefficient de corrélation linéaire est un nombre sans unité et, comme pour la moyenne arithmétique, est très sensible aux valeurs extrêmes. Ce n'est donc pas un indicateur « robuste ».

h. L'indépendance des échantillons

Ces tests d'hypothèse ont pour but d'étudier l'indépendance des variables. Ils constituent une sorte de démonstration par l'absurde. D'une manière générale, on émet pour commencer une certaine hypothèse à tester ou hypothèse nulle désignée H_0 . On mesure ensuite l'écart observé entre certaines caractéristiques de la population, et on calcule la probabilité d'observer, si l'hypothèse nulle est vraie, un écart aussi important. Si cette probabilité est faible, et plus précisément si elle est inférieure ou égale à un niveau de signification préalablement fixé, l'écart observé apparaît comme peu compatible avec l'hypothèse nulle, et on rejette celle-ci. En pratique, on se donne également une limite supérieure du risque de première espèce, le plus souvent 5%, 1% et 0,1%. Cette limite est aussi le niveau de signification du test, qui permet de définir la condition de rejet de l'hypothèse nulle. Selon que cette hypothèse est rejetée au niveau 5%, 1% ou 0,1%, on dit conventionnellement que l'écart observé est significatif, hautement significatif ou

très hautement significatif. L'analyse de l'indépendance des variables permet de mieux interpréter le coefficient de corrélation linéaire.

Parmi les nombreux tests existants, on choisit d'utiliser le test des variances de Fisher-Snedecor.

Annexe 4 : lexique

Ce lexique a pour objectif de définir le vocabulaire spécifique utilisé en Métrologie. Les définitions proviennent du « Vocabulaire international des termes fondamentaux et généraux de métrologie » (Norme ISO, 60 p., ISBN°92-67-01075-1, 1993).

Appareil de mesure ou chaîne de mesure ou instrument de mesure : ensemble des équipements, composants et instruments associés entre eux ou non, permettant la détermination d'une grandeur à mesurer.

Correction ou compensation : valeur ajoutée algébriquement au résultat brut d'une mesure pour compenser une erreur systématique.

Erreur de mesure ou erreur absolue : écart existant entre le résultat de la mesure et la valeur vraie de la grandeur à mesurer.

Erreur relative : rapport entre l'erreur absolue et la valeur vraie de la grandeur à mesurer. Elle s'exprime souvent en %.

Etendue de mesure : intervalle pour lequel l'erreur d'une chaîne de mesure est supposée comprise entre les limites spécifiées.

Fidélité : aptitude d'une chaîne de mesure à donner des indications très voisines lors de la mesure répétée dans les mêmes conditions d'une même grandeur parfaitement définie.

Grandeur d'influence : grandeur qui n'est pas la grandeur physique à mesurer, mais qui a une influence sur le résultat de la mesure.

Incertitude : marge d'indétermination entachant la mesure d'une grandeur physique. L'incertitude de mesure s'exprime par un paramètre associé au résultat de la mesure elle-même. Souvent, en général l'écart-type, caractérise la dispersion des valeurs qui peuvent être raisonnablement attribuées à la grandeur à mesurer.

Justesse : aptitude d'une chaîne de mesure à donner des indications exemptes d'erreur systématique.

Mesure : évaluation d'une caractéristique d'un objet en comparaison à une unité de mesure (définie par le Système International d'unités).

Méthode de mesure : succession logique des opérations, décrites d'une manière générique, mises en œuvre lors de l'exécution d'une mesure.

Mode opératoire : ensemble des opérations, décrites d'une manière spécifique, mises en œuvre lors de l'exécution d'une mesure particulière selon une méthode donnée.

Précision ou exactitude : qualité de la mesure d'une grandeur physique qui n'est entachée que d'une faible incertitude.

Répétabilité : étroitesse de l'accord entre les résultats de mesures successives d'une même grandeur parfaitement définie, effectuées dans la totalité des mêmes conditions. Les conditions de répétabilité comprennent : même méthode, même observateur, même chaîne de mesure, même lieu, mêmes conditions extérieures d'utilisation et enfin expérience réalisée durant une courte période de temps. Elle peut s'exprimer quantitativement à l'aide des caractéristiques de dispersion des résultats.

Reproductibilité : étroitesse de l'accord entre les résultats de mesures successives d'une même grandeur parfaitement définie, effectuées en faisant varier les conditions de répétabilité. Elle peut s'exprimer quantitativement à l'aide des caractéristiques de dispersion des résultats.

Résolution ou pouvoir de séparation : écart minimum existant entre deux valeurs d'une même grandeur physique pouvant être séparées ou distinguées par une chaîne de mesure.

Sensibilité : quotient de l'accroissement de la réponse d'une chaîne de mesure par l'accroissement correspondant du signal d'entrée.

Evaluation non destructive du béton par mesures de résistivité électrique et thermographie infrarouge passive

Résumé

Dans les pays industrialisés, les ouvrages en béton vieillissent. Les gouvernements mettent alors en place des politiques de gestion du patrimoine, et l'évaluation de l'état d'endommagement de ces structures devient une donnée essentielle à la planification des travaux. Dans cette problématique, l'Evaluation Non Destructive apparaît comme étant un outil adapté au contexte et aux besoins des maîtres d'ouvrages.

Parmi les méthodes existantes, la mesure de résistivité électrique présente une sensibilité à la porosité du matériau, et à la circulation des charges électrolytiques dans la matrice, qui peut être exploitée pour l'étude des altérations du béton. La mesure par thermographie infrarouge passive est également sensible à la porosité du matériau et à ses conditions hydriques. Cette sensibilité peut être utilisée pour le diagnostic des altérations des ouvrages en béton.

Les travaux effectués au cours de la thèse ont pour objectif d'étudier et de développer les deux techniques afin de caractériser l'état des ouvrages en béton.

Dans un premier temps, le travail s'oriente sur la définition d'une procédure de mesure in situ qui prend en compte les différentes grandeurs d'influence de la mesure afin d'en minimiser les effets ou d'acquérir l'information nécessaire à leur correction en phase de dépouillement. Dans un second temps, l'étude de la capacité des deux méthodes à caractériser l'état du béton est réalisée.

Des mesures sur corps d'épreuve en béton permettent d'étudier la sensibilité des deux techniques à la présence d'ions chlorures, à l'ajout de cendres volantes, de fumées de silice ou encore de fibres de différentes natures. Des travaux de modélisation numérique (en électrique) montrent l'influence de l'épaisseur de l'élément ausculté, d'une couche superficielle conductrice (couche saturée, par exemple) et résistante (couche carbonatée, par exemple). Des études plus spécifiques finissent d'élargir le champ des possibilités d'utilisation des deux techniques en génie civil, avec notamment l'étude des conditions hydriques dans le béton et l'adaptation de la loi d'Archie, le diagnostic de l'endommagement créé par la réaction alcalis-granulats avec la définition d'indicateurs d'endommagement ou encore la caractérisation de la fissuration et de la délamination.

Le travail réalisé, à la fois en laboratoire et in situ, met en évidence la nécessité de maîtriser la mesure afin d'estimer correctement sa représentativité. La définition d'un protocole de mise en œuvre des techniques, du traitement des données et de l'interprétation des résultats propre à chaque problématique, contribue à définir des indicateurs d'endommagement du béton.

Mots clés

Evaluation Non Destructive, béton, résistivité électrique, thermographie infrarouge passive, conditions hydriques, Réaction Alcalis-Granulats, délamination.

Non destructive evaluation of concrete by electrical resistivity measurements and passive infrared thermography

Abstract

In the industrialized countries, the concrete are ageing. The governments then set up management's policies of the patrimony, and the damage evaluation of these structures becomes an essential data with the planning of work. In this framework, the Non Destructive Evaluation seems being an adapted tool in the context and the needs for the building owners.

Among the existing methods, the measurement of electrical resistivity is sensitive to material porosity, and the electrolytic circulation in the matrix, which can be exploited for the study of deteriorations of the concrete. The measurement by passive infrared thermography is also sensitive to the material porosity and its hydrous conditions. This sensitivity can be used for the diagnosis of deteriorations of the concrete works.

The works carried out during this thesis are to study and develop these two techniques in order to characterize the state of the concrete structures.

In a first step, work is directed towards the definition of a procedure of in-situ measurement which takes into account the various actuating quantities of measurement in order to minimize the effects of them or to acquire information necessary to their correction in state of examination. In a second step, the study of the capacity of the two methods to characterize the state of the concrete is carried out.

Measurements on concrete test specimen allow to study the sensitivity of the two techniques due to the presence of ions chlorides, the addition of fly-ashes, of silica fume or of different types of fibers. Numerical electrical modelling shows the influence of the thickness of the inspected element, of a conducting surface layer (saturated layer) and of a resistant surface layer (carbonated layer). More specific studies enhance the field of the capacity of the two techniques in civil engineering, particularly the study of the hydrous conditions in the concrete and the adaptation of the Archie's law, the diagnosis of the damage created by the alkali-aggregates reaction with the definition of damage indicators or the characterization of cracking and the delamination.

This study, in laboratory as in-situ, highlights the need for controlling measurement in order to estimate correctly its representativeness. The definition of a protocol of implementation of the techniques, data processing and specific interpretation of the results to each problem, contributes to assess concrete damage indicators.

Keywords

Non Destructive Evaluation, concrete, electrical resistivity, passive infrared thermography, hydrous conditions, Alkali-Aggregates Reaction, délamination.