

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة أبي بكر بلقايد- تلمسان
Université Aboubakr Belkaïd- Tlemcen –
Faculté de TECHNOLOGIE



THESE

Présentée pour l'obtention du **grade de DOCTORAT 3^{ème} Cycle**

En : Génie Civil

Spécialité : Sol et structure/Matériaux

Par : MERIOUA Abderrahmene

Sujet

Mesures non destructives des caractéristiques physico-chimiques des matériaux poreux : application au transfert des électrolytes

Soutenue publiquement, le **02 / 03 / 2016** , devant le jury composé de :

ABOU-BEKR Nabil	Professeur	Univ. Tlemcen	Président
GHOMARI Fouad	Professeur	Univ. Tlemcen	Encadreur
BEZZAR Abdelillah	MCA	Univ. Tlemcen	Encadreur
BELARBI Rafik	Professeur	Univ. La Rochelle	Examineur
MOULI Mohamed	Professeur	E.N.P. Oran	Examineur

REMERCIEMENTS

Cette partie est sans doute, l'étape la plus difficile mais aussi la plus agréable de ces cinq années de thèse. Difficile car il s'agit de n'oublier personne et de remercier chacun à sa juste valeur et sa contribution. Agréable car il vient enfin le temps de dire merci, merci à celles et ceux qui me permettront d'obtenir le statut de docteur. C'est donc dans cette tâche ardue que je me lance à travers les quelques lignes qui suivent.

Je tiens tout d'abord à remercier chaleureusement mes deux directeurs de thèse, mes mentors, le Pr GHOMARI Fouad et le Dr BEZZAR Abdelillah, qui m'ont offert la chance d'être leur thésard pendant ces années. Leur aide inestimable m'a permis de découvrir et d'aimer le goût de la recherche ; leurs conseils et encouragements m'ont permis de tenir le coup dans les moments les plus difficiles et d'aller vers l'avant ; leur grande patience m'a appris de voir à quel point ils étaient dévoués et investis dans cette thèse. Pour toutes ces raisons et toutes ces réalités, je tiens à vous remercier infiniment pour tout ce que vous avez fait pour moi afin de mener à bien ce projet.

Je remercie également le Pr KHELIDJ Abdelhafid, directeur du laboratoire GeM-IUT de Saint Nazaire, qui m'a permis d'effectuer un stage au sein de son laboratoire pour finaliser mes travaux de recherche, ainsi que toute son équipe de recherche qui nous ont accueillis dans les meilleures conditions qui soient.

Mes remerciements au Pr ABOU-BEKR Nabil pour avoir généreusement accepté de présider le jury, ainsi qu'aux deux examinateurs le Pr BELARBI Rafik et le Pr MOULI Mohamed, qui ont eu la bonneté de prendre sur leur temps pour examiner mon mémoire, et participer à la soutenance.

Je remercie bien sure, mes parents et mes frères qui m'ont soutenu jusqu'au bout, et sans lesquels je n'aurais sans doute jamais pu terminer ce projet.

Je tiens enfin à remercier les membres des laboratoires de recherche de Génie Civil qui m'ont permis de mener mon travail dans les meilleures conditions, Ainsi que Mme Baioui, qui m'a été d'une aide précieuse dans ce travail. Je souhaite également bon courage dans leurs travaux à mes amis et collègues doctorants des laboratoires : EOLE et RISAM.

« La science d'aujourd'hui détruit l'ignorance d'hier et elle fera figure d'ignorance au regard de la science de demain. Dans le cœur des hommes il y a un élan vers autre chose dont la clé secrète est ailleurs »

Jean d'Ormesson

RESUME

La durabilité des structures en béton armé a commencé à faire partie des préoccupations des constructeurs à l'aube de ce siècle. Cette durabilité est liée à la nature de l'agressivité de l'environnement et pour contrôler son évolution dans le temps, il est important de concevoir des moyens simples afin de surveiller l'intégrité de tout ou partie d'une construction. Parmi les techniques de surveillance qui existent, nous citons les mesures non destructives, qui ne nécessitent aucune intervention pouvant nuire à la stabilité de l'ouvrage ausculté.

L'objectif de ces méthodes est de permettre, entre autres, de suivre l'infiltration des solutions électrolytiques chargées en sels (chlorures), provenant des milieux agressifs, à travers la structure porale du matériau béton.

Nous nous sommes focalisé, dans le cadre de ce travail, à trouver des corrélations entre les paramètres physico-chimiques, de divers matériaux dont la porosité varie de 13 à 44%, mesurés par des méthodes directes et la conductivité électrique (CE), issue de mesures indirectes tout en prenant en considération l'effet de facteurs tels que la température, la concentration en ions chlorures et la tortuosité. Ces mesures sont réalisées à l'aide de cellules en PVC, confectionnées au sein de notre laboratoire et équipées de deux électrodes en acier inoxydable.

Les premiers résultats obtenus sur les matériaux étudiés sont prometteurs. En effet, des paramètres tels que la porosité, le coefficient de diffusion et la concentration en chlorures sont déterminés en effectuant une simple mesure de la CE. Nous avons aussi quantifié, de la même manière, le paramètre tortuosité et les résultats nous sensibilisent davantage sur l'incidence de ce paramètre sur le transport de masse dans les milieux poreux.

Mots clés : méthodes non destructives, milieu poreux, conductivité électrique, porosité, diffusion des chlorures, tortuosité.

ABSTRACT

The durability of the reinforced concrete structures has begun taking part of the manufacturers concerns at the beginning of this century. This durability is linked to the nature of the aggressiveness of the environment and to control its evolution over time, it is important to develop simple ways to monitor the integrity of all or part of a building. Among the monitoring techniques that exist, we mention the non-destructive measurements, which require no intervention that could affect the stability of the auscultated structure.

The aim of these methods is to allow, among other things, monitor the infiltration of electrolytic solutions charged with salts (chlorides) from aggressive media, through the pore structure of the concrete material.

We have focused, in the context of this work, to find correlations between physico-chemical parameters of various materials whose porosity ranges from 13 to 44%, measured by direct methods and the electrical conductivity (EC), outcome indirect measures while taking into account the effect of factors such as temperature, concentration of chloride ions and tortuosity. These measurements are performed using PVC cells, made up in our laboratory equipped with two stainless steel electrodes.

The first results on the studied materials are promising. Indeed, parameters such as: the porosity, the diffusion coefficient and the chloride concentration is determined by performing a simple measure of the EC. We also quantified in the same way, the tortuosity parameter and the results make us aware about the impact of this parameter on mass transport in porous media.

Keywords: non-destructive methods, porous medium, electrical conductivity, porosity, chlorides diffusion, tortuosity.

ملخص

بدأت متانة وديمومة المنشآت الخرسانية المسلحة أن تكون جزءاً من استفسارات المهندسين في مطلع هذا القرن. وترتبط هذا المتانة بالطبيعة العدوانية للبيئة والتحكم في تطورها على مر الزمن، فمن المهم تطوير طرق بسيطة لمراقبة سلامة أجزاء البنايات العمرانية. بين تقنيات الرصد الموجودة، نذكر القياسات غير المدمرة، التي لا تحتاج أن تضر استقرار الهياكل، والهدف من هذه الأساليب هو السماح، من بين أمور أخرى، رصد تسلل الكلوريدات من البيئة الضارة من خلال بنية المسام من المواد الخرسانية

لقد ركزنا في سياق هذا العمل، لإيجاد علاقة بين المعايير الفيزيائية والكيميائية للعديد من للمواد ذات المسامية المترابطة ما بين 13-44٪، وتقاس بطرق مباشرة والتوصيل الكهربائي عقب قياسات غير مباشرة مع الأخذ بعين الاعتبار تأثيراً لعوامل مثل درجة الحرارة وتركيز أيونات الكلوريد ومعامل الانعراج. يتم إجراء هذه القياسات باستخدام خلايا البلاستيك، وضعت في المختبر لدينا مجهزة مع اثنين من أقطاب الفولاذ المقاوم للصدأ،

النتائج الأولى على المواد المدروسة واعدة. في الواقع، يتم تحديد المعلمات مثل المسامية ومعامل الانتشار وتركيز الكلوريد عن طريق إجراء قياس واحد من التوصيل الكهربائي، تمكنا أيضاً بنفس الطريقة من قياس معامل الانعراج، والنتائج جعلتنا ندرك تأثير هذا المعامل حول نقل المواد عبر الأوساط المسامية،

الكلمات المفتاحية: الطرق الغير مدمرة، الأوساط المسامية، التوصيل الكهربائي، المسامية، الانتشار الجزئي للكلوريدات، معامل الانعراج.

Table des matières

INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE I: METHODES NON DESTRUCTIVES.....	5
1.1 Introduction:	5
1.2 Inspection visuelle:	6
1.3 Scléromètre :	6
1.3.1 Introduction :.....	6
1.3.2 Principe du scléromètre :.....	6
1.3.3 Application du scléromètre :	7
1.3.4 Fiabilité et limites:	8
1.4 Méthode de transmission ultrasonique :	8
1.4.1 Introduction :.....	8
1.4.2 Principe de l'ultrason :	9
1.4.3 Corrélation avec les propriétés mécaniques :.....	10
1.4.4 Domaines d'application :	12
1.4.5 Avantages et inconvénients :	13
1.5 Impact-écho :.....	14
1.5.1 Introduction :.....	14
1.5.2 Principe de l'essai :.....	14
1.5.3 Applications de l'impact-écho :.....	15
1.5.4 Limites de la méthode de l'impact-écho :.....	16
1.6 La réflectométrie en domaine temporel.....	16
1.6.1 Introduction :.....	16
1.6.2 Principe de la RDT	17
1.5.3 Applications :.....	19
1.5.4 Avantages et inconvénients :	20
1.7 Les méthodes électriques :	21
1.7.1 Introduction :.....	21
1.7.2 Principe de la méthode :	22
1.7.3 Mesure de la résistivité électrique (RE):	22
1.7.4 Domaines d'applications :	25
1.6.5 Avantages et inconvénients :	26
1.8 La thermographie infrarouge:	27

1.8.1	Introduction :	27
1.8.2	Principe et théorie :	27
1.8.3	Quelques applications de la méthode :	28
1.8.4	Avantages et limites :	29
1.9	Radiographie :	30
1.9.1	Introduction:	30
1.9.2	Principe de la méthode:	30
1.9.3	Avantages et limites :	32
1.10	Conclusion :	32

CHAPITRE II : PROPRIETES PHYSICO-ELECTRIQUES DES MATERIAUX POREUX :..... 38

2.1	Introduction :	38
2.2	Conduction électrique dans les matériaux poreux :	38
2.2.1	Introduction :	38
2.2.2	Mesure des paramètres électriques des milieux poreux :	39
2.3	Paramètres influençant la conductivité électrique dans les matériaux poreux :...	41
2.3.1	Effet de la fréquence :	41
2.3.2	Effet de la température :	42
2.3.3	Effet de la porosité :	44
2.3.4	Effet de la concentration des chlorures :	48
2.3.5	Effet du degré de saturation :	52
2.2.6	Effet du rapport Eau/Ciment :	54
2.2.7	Effet de la tortuosité :	55
2.4	Phénomène de Diffusion dans les milieux poreux :	59
2.4.1	Mesure du coefficient de diffusion :	60
2.4.2	Détermination du profil de concentration :	61
2.5	Conclusion :	63

CHAPITRE III : PROTOCOLE EXPERIMENTAL..... 66

3.1	Introduction :	66
3.2	Choix du circuit :	66
3.3	Montage du circuit.....	68

3.4 Principe de la mesure :	69
3.5 Calibrage du circuit (essais préliminaires):	69
3.6 Essais sur solutions salines en NaCl :.....	70
3.6.1 Caractéristiques de la cellule :	70
3.6.2 Choix du type d'électrodes :.....	71
3.7 Détermination de la conductivité (CE) :.....	71
3.8 Caractéristiques des matériaux utilisés :.....	72
3.8.1 Billes de verre :.....	72
3.8.2 Sables :	74
3.8.3 Briques :.....	74
3.8.4 Matériaux cimentaires :	74
3.9 Influence de la fréquence:	76
3.10 Essais de porosité.....	76
3.10.1 Porosité accessible à l'eau :	76
3.10.2 Porosité accessible au mercure.	79
3.11 Relation entre concentration des chlorures et CE :.....	80
3.12 Essais de variation de la température :	81
3.13 Essais de mesure de la tortuosité :	82
3.14 Essais de diffusion :	83
3.14.1 Préparation des cellules de diffusion:	83
3.14.2 Essais de diffusion :.....	85
3.15 Titration des chlorures :.....	86
3.16 Conclusion:.....	89
CHAPITRE IV : RESULTATS ET DISCUSSIONS	91
4.1 Introduction :	91
4.2 Calibrage du circuit :	91
4.2.1 Essais préliminaires :	91
4.2.2 Influence de la fréquence :	92
4.2.3 Influence de la tension V_{pp} :.....	93
4.3 Essais sur solution et choix du type d'électrodes :.....	94
4.4 Mesure de la conductivité électrique CE :.....	95
4.5 Influence de la fréquence sur la mesure électrique dans les matériaux poreux :..	96

4.6 Mesure de la porosité :	97
4.6.1 Porosité accessible à l'eau :	97
4.6.2 Porosité accessible au mercure :	100
4.7 Relation entre concentration et conductivité :	101
4.8 Essais de variation de la température :	103
4.9 Essais de mesure de la tortuosité :	104
4.10 Essais de diffusion :	105
4.11 Conclusion	114
CONCLUSION GENERALE	115
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	118
ANNEXE	129

Liste des figures

Figure 1.1 – Appareil à ultrasons.....	7
Figure 1.2 – Différents procédés de mesure avec l’ultrason (Balasubramanian, 2014).	8
Figure 1.3 – Relation de résistance vs vitesse pour l’estimation de la résistance du béton (Malhotra et Carino, 2004).	10
Figure 1.4 – Schéma du principe de la méthode impact-écho (Carino, 2001),.....	13
Figure 1.5 – Schéma d’un réflectomètre (Melounou, 1998).	15
Figure 1.6 – Signal de mesure par la méthode RDT (Wiggenhauser et Kind, 2015).	16
Figure 1.7 – Les câbles de précontrainte avec différents diamètres (Taffe, Borchardt et col. 2003).	17
Figure 1.8 – Signal de RDT enregistré sur des briques silico-calcaires avec différentes teneurs en humidité: a) anhydre (4% en volume d'eau), b) 11% en volume d'eau, c) 22% en volume d'eau, d) la saturation en eau (30% en volume d'eau) (Wiggenhauser et Kind, 2015).	18
Figure 1.9 – Dispositif de mesure de la résistivité électrique par transparence (Lataste, 2010).	21
Figure 1.10 – (a) Schéma du résistivimètre de Wenner à 4 sondes (Bin Ibrahim, Bin Ismail et col. 2002); (b) Equipement de mesure de la RE (hurricane193.wordpress.com).	21
Figure 1.11 – Composition du rayonnement reçu par une caméra infrarouge (Naar, 2006).	26
Figure 1.12 – Appareil de thermographie infrarouge (Defer et Maierhofer, 2012).	27
Figure 1.13 – Source d’Iridium 192 (Balayssac, 2012).	29
Figure 14 – Schéma de principe de la radiographie (Mitchell, 2004).	29
Figure 1.15 – Schéma d’un scléromètre (Beinish et Poudevigne 2004).....	31
Figure 1.16 – Influence de l’état d’humidité de surface sur les mesures sclérométrique (Bungey, Grantham et col. 2006)	32
Figure 2. 1– Propriétés géométriques influençant la mesure de la résistance électrique (Rajabipour, 2003)	40
Figure 2.2 – Courbe de conductivité observée dans un sol argileux, mesurée dans une cellule à deux électrodes (Rinaldi et Cuestas, 2002).	42
Figure 2.3 – Résistivité électrique en fonction de la température pour différentes compositions de béton (Chang, Song et col. 2013).	43

Figure 2.4 – Influence de la température sur la RE/CE (Sengul, 2014).	44
Figure 2.5 – Pénétration de substances agressives extérieures (Basheer et Nolan, 2001; Naar, 2006).	45
Figure 2.6 – Influence de la porosité sur la RE / CE (Marquis, 2002).	47
Figure 2. 7 – Concentration en NaCl en fonction de la conductivité de la solution (Ait Saadi, 2003).	49
Figure 2.8 – Evolution des résistances en fonction de la concentration pour 3 températures 5, 10 et 15° C (Besson, Cousin et col.).	50
Figure 2.9 – Influence des chlorures ajoutés à l'eau de gâchage sur la résistivité électrique de matériaux cimentaires saturés (Elkey et Sellevold, 1995).	50
Figure 2.10 – Effet du NaCl sur la résistivité du béton (Whiting et Nagi, 2003)	51
Figure 2.11 – Effet de la saturation sur la résistivité électrique du béton (Whiting and Nagi 2003).	53
Figure 2.12 – Effet des conditions d'humidité sur la RE/CE (Sengul, 2014).	53
Figure 2.13 – Influence du rapport E/C sur les résistivités électriques de matériaux cimentaires saturés (Elkey et Sellevold, 1995).	54
Figure 2.14 – Influence mesurée du rapport E/C sur la résistivité apparente du béton (Naar, 2006).	54
Figure 2.15 – Différents chemins d'écoulement tortueux dans un milieu poreux saturé (Ghanbarian, Hunt et col., 2013).	56
Figure 2.16 – Facteur de tortuosité géométrique (τ) obtenu par la relation de Rhodes et Oster, 1985 (Bezzar et Ghomari, 2013).	59
Figure 2.17 – Schéma définissant la constrictivité (Takahashi, Seida et col., 2009)	60
Figure 2.18 – Essai d'immersion – régime transitoire (Ismail 2006)	63
Figure 3. 1– Circuits de mesure d'impédance, (a) pont de Wheatstone, (b) méthode de résonnance, (c) méthode I-V, (d-1) méthode RF I-V pour les basses impédances, (d-2) méthode RF I-V pour les hautes impédances, (e) méthode d'analyse de réseau, (f) méthode du p pont auto-équilibré (Okada et Sekino 2003).	67
Figure 3.2 – Configuration utilisant l'oscilloscope	69
Figure 3.3 – Configuration utilisant les multimètres.	69
Figure 3.4 – Essai de mesure de Rx sur une solution de NaCl.	70
Figure 3. 5 – Caractéristiques de la cellule de mesure.	70
Figure 3.6 – Electrodes en cuivre.	71
Figure 3.7 – Electrodes en acier inoxydable.	71

Figure 3.8 – <i>Différents types de conductimètres.</i>	72
Figure 3. 9 – <i>Les différents diamètres de billes de verre utilisés.</i>	73
Figure 3. 10 – (a) <i>classe de sable 1 – 2 mm, (b) classe de sable 0.5 – 1 mm, (c) classe de sable 0.25 – 0.5) mm.</i>	74
Figure 3. 11– <i>Carottes de briques de 45.</i>	74
Figure 3. 12 – <i>Dispositif de carottage.</i>	74
Figure 3. 13 – <i>Moules 11x22 cm en PVC pour la confection des éprouvettes de béton</i>	75
Figure 3. 14 – <i>Éprouvettes de mortier de 11cm de diamètre.</i>	75
Figure 3. 15 – <i>Méthode de l'éprouvette graduée.</i>	77
Figure 3. 16 – <i>Méthode de remplissage de la cellule.</i>	77
Figure 3. 17 – <i>Saturation sous vide selon AFPC-AFREM modifiée.</i>	78
Figure 3. 18 – <i>Carottes en briques servant à la mesure électrique.</i>	79
Figure 3. 19 – <i>Echantillons cubiques de (1,5 x 2 x 1) cm.</i>	79
Figure 3. 20 – <i>Scie électrique servant à découper les échantillons cubiques (Laboratoire Gem).</i>	80
Figure 3. 21– <i>Pénétromètre</i>	80
Figure 3. 22– <i>Schéma de remplissage d'un pénétromètre</i>	80
Figure 3. 23 – <i>Porosimètre à mercure type Micromeritics (laboratoire GeM, Saint Nazaire).</i>	81
Figure 3. 24 – <i>Essai de mesure de température.</i>	82
Figure 3. 25 – <i>Calibrage du conductimètre avec une solution de KCl.</i>	83
Figure 3. 26 – <i>Cellule de diffusion libre pour une solution saline (29,5 g / l).</i>	83
Figure 3. 27 – <i>Cellule de diffusion cellulaire pour perles de verre et sables.</i>	84
Figure 3. 28 – <i>Tests de diffusion pour les briques.</i>	84
Figure 3. 29 – <i>Tests de diffusion pour les matériaux cimentaires.</i>	85
Figure 3. 30 – <i>Mesures électriques pour les essais de diffusion.</i>	86
Figure 3. 31– <i>Grignoteuse.</i>	87
Figure 3. 32– <i>Poudre servant à la titration.</i>	87
Figure 3. 33 – <i>Stockage de la poudre du matériau</i>	87
Figure 3. 34 – <i>Mesure de la profondeur du</i>	87
Figure 3. 35 – <i>Agitation magnétique sous 80° C</i>	88
Figure 3. 36– <i>Stockage des filtrats</i>	89
Figure 3. 37– <i>Titration des chlorures.</i>	89

Figure 4.1 – <i>Influence de la fréquence (phase de calibrage)</i>	93
Figure 4. 2 – <i>Variation de V_{pp} pour les composantes $R=15\Omega$, $R_x=100\Omega$, $F_r = 1$ kHz</i>	93
Figure 4. 3 – <i>Variation de V_{pp} pour les composantes $R=5\Omega$, $R_x=100\Omega$, $F=1$ kHz</i>	93
Figure 4. 4 – <i>Variation de V_{pp} pour les composantes $R= 5\Omega$, $R_x=220\Omega$, $F_r = 1$ kHz.</i>	94
Figure 4. 5 – <i>Mesure de CE pour une solution de NaCl à différentes concentrations.</i>	96
Figure 4. 6 – <i>Variation de la CE en fonction de la fréquence pour des billes de verre de 4mm de diamètre saturées avec une solution en NaCl de 117 g/l.</i>	97
Figure 4. 7 – <i>Mesure directe de la porosité pour les billes de verre.</i>	97
Figure 4. 8– <i>Relation entre les valeurs de porosité mesurées par les méthodes directe et indirecte.</i>	98
Figure 4. 9 – <i>Distribution de la taille des pores, obtenue par intrusion au mercure sur (a) mortier et (b) béton.</i>	100
Figure 4. 10 – <i>Distribution de la taille des pores, obtenue par intrusion au mercure pour les briques étudiées.</i>	100
Figure 4. 11 – <i>Relation entre concentration en NaCl et la CE pour les matériaux étudiés.</i> ..	101
Figure 4. 12 – <i>Corrélation entre le paramètre a et la porosité</i>	102
Figure 4. 13 – <i>Corrélation entre le paramètre b et la porosité</i>	102
Figure 4. 14 – <i>Variation de la CE du béton utilisé en fonction de la concentration pour différentes températures : 18, 30 et 40° C.</i>	102
Figure 4. 15 – <i>Variation de la CE en fonction de la CE_0 des matériaux testés (billes de verre 1.5, 2 mm et sable de classe I-2 mm).</i>	103
Figure 4. 16 – <i>Profil de concentration pour une diffusion libre d'une solution de NaCl (29,5 g/l) dans une eau distillée.</i>	105
Figure 4. 17 – <i>Profil de concentration pour une diffusion de NaCl 29.5 g/l dans un sable (1-2) mm.</i>	105
Figure 4. 18 – <i>Profil de concentration pour la diffusion d'une solution de NaCl à 29.5 g/l dans des billes de verre 1.5 mm.</i>	106
Figure 4. 19 – <i>Profil de concentration pour la diffusion d'une solution de NaCl à 29.5 g/l dans des billes de verre 2 mm.</i>	107
Figure 4. 20 – <i>Profil de concentration pour la diffusion d'une solution de NaCl à 29.5 g/l dans la brique silico-calcaire.</i>	107
Figure 4. 21 – <i>Profil de concentration pour la diffusion d'une solution de NaCl à 29.5 g/l dans la brique rouge.</i>	108

Figure 4. 22 – <i>Profil de concentration pour la diffusion d'une solution de NaCl à 29.5 g/l dans les matériaux cimentaires.</i>	108
Figure 4. 23 – <i>Risque de corrosion d'armatures en fonction du temps.</i>	110
Figure 4.24 – <i>Relation entre porosité et coefficient de diffusion.</i>	111
Figure 4. 25 – <i>Profil de concentration de chlorures libres et totaux sur le béton.</i>	111
Figure 4.26 – <i>Profil de concentration des chlorures libres et totaux sur le mortier.</i>	112

Liste des tableaux

Tableau 1.1 Corrélations entre la résistance à la compression f_c et la vitesse V (Evangelista, Shehata et col. 2003)	11
Tableau 1.2 Qualité du béton et vitesse de propagation des impulsions (Solis-Carcaño et Moreno, 2008).....	12
Tableau 1.3 Paramètres d'Archie d'après (Naar, 2006).....	22
Tableau 1.4 Comparaison entre les dispositifs à quatre et à deux électrodes.	24
Tableau 1.5 Seuils empiriques de résistivité/conductivité pour la corrosion des armatures (McCarter, Chrisp et col. 2005).	27
Tableau 1.6 Émissivité totale à 20°C pour des matériaux de construction classiques (Defer et Maierhofer, 2012).....	28
Tableau 1.7 Caractéristiques de la Source (Balayssac, 2012).....	32
Tableau 1.8 Récapitulatif des méthodes non destructives citées.....	33
Tableau 2.1 Valeurs de fréquences pour la mesure de la résistivité électrique (Elkey et Sellevold, 1995) :	41
Tableau 2.2 Exposants Archie (m) de différents milieux poreux présentés dans la littérature (Friedman, 2005).	46
Tableau 2.3 Valeurs publiées des constantes d'Archie (a) et (m) selon (Khalil et Santos, 2009).....	48
Tableau 2.4 Relations entre CE et concentration en sel, tirées de la littérature	51
Tableau 3. 1 Les méthodes communes de mesure d'impédance.	68
Tableau 3. 2 Caractéristiques des matériaux poreux utilisés.....	73
Tableau 4. 1 Résultats préliminaires, utilisant le circuit à multimètres.	92
Tableau 4. 2 Résultats de comparaison entre l'oscilloscope et les multimètres.....	92
Tableau 4. 3 Résultats de mesure de Rx d'une solution en NaCl à 5 g/l avec $R = 10\Omega$	95
Tableau 4. 4 Résultats de mesure de Rx d'une solution de NaCl à 5g/l avec $R = 15\Omega$	95
Tableau 4. 5 Résultats de variation de la fréquence pour la mesure de Rx pour une solution de NaCl de concentration 10 g/l.....	95
Tableau 4. 6 Calcul expérimental de la constance de cellule K.	96
Tableau 4. 7 Tortuosités mesurées sur les différents milieux poreux étudiés.....	104
Tableau 4. 8 Influence de la tortuosité sur le coefficient de diffusion effectif.	109

Table des nomenclatures

Acronymes :

CND : control non destructif ;
NDT : non destructive testing ;
NDT-CE: non-destructive testing in civil engineering;
MND : méthodes non destructives ;
ACI : American concrete institute ;
NE/NF : normes européennes/ normes françaises ;
ASTM: American Society for Testing and Materials;
RDT : La réflectométrie en domaine temporel ;
CE : conductivité électrique ;
RE : résistivité électrique ;
G/S : gravier/sable ;
E/C : eau/ciment ;
CA : courant alternatif ;
GBF : générateur de basses fréquences ;
PVC : polychlorure de vinyle ;
AFPC : Association Française pour la Construction ;
AFREM : Association Française de Recherche et d'Essais sur les Matériaux et les Constructions ;
NaCl : chlorure de Sodium ;
KCl : Chlorure de potassium ;
HNO₃ : acide nitrique ;

Indices :

V, V_p : vitesse de l'onde (m/s) ;
 L : distance couvrant l'onde dans le béton (m) ;
 t : temps de parcours de l'onde (s);
 f_c : résistance à la compression (MPa);
 E : module d'élasticité ;
 D_{max} : diamètre maximal des grains (mm) ;
 θ : teneur en eau volumique ;
 ε : la constante diélectrique ;
 C_{lum} (m/s) est la vitesse de la lumière ;
 L_{tige} (m) est la longueur de la tige de la sonde ;
 w_m : Teneur en eau massique du béton [%] ;
 T : épaisseur de l'élément mesuré (mm) ;
 Fr : fréquence (Hz) ;
RE : résistivité électrique apparente du milieu poreux ($\Omega.m$) ;
CE : conductivité électrique (S/m) ;

ϕ : porosité,
 RE_0 : résistivité de la solution dans le milieu poreux ($\Omega.m$),
 S : degré de saturation
 a : paramètre de lithologie,
 n : exposant de saturation ;
 m : facteur de cimentation, exposant Archie
 R : résistance électrique (Ω)
 U : tension (V) ;
 I : intensité du courant (A) ;
 A : section des électrodes (m^2) ;
 l : espacement entre les électrodes (m) ;
 ΔU : différence de potentiel (V) ;
 Z : impédance électrique (Ω) ;
 Z' : partie réelle de l'impédance électrique (Ω) ;
 Z'' : partie imaginaire de l'impédance électrique (Ω) ;
 CE_{25} : conductivité électrique à 25° C (S/m);
 α : facteur de compensation de température ;
 Te : température (°C) ;
 CE_{Te} : conductivité électrique à une température Te (S/m) ;
 Te_{ref} : température de référence (°C) ;
 RE_{Te} : résistivité électrique à une température Te ($\Omega.m$) ;
 F : facteur de formation ;
 CE_0 : conductivité électrique de la solution interstitielle (S/m) ;
 d_c : dimension caractéristique de la taille des pores, (diamètre critique des pores) (nm) ;
 $d_{max}^e = 0.34 d_c$ (nm) ;
 $S(d_{max}^e)$ est la fraction du volume poreux interconnecté de diamètres supérieurs à d_{max}^e ;
 B : paramètre empirique de compensation du degré de saturation ;
 RE_{sat} : résistivité électrique d'un milieu saturé ;
 A : tortuosité ;
 L_s : ligne droite macroscopique entre deux points (A et B) ;
 L_g : la distance réelle géométriquement parcourue ;
 L_h : longueur hydraulique d'un écoulement ;
 T_h : tortuosité hydraulique ;
 T_m : facteur de tortuosité ;
 D_0 : coefficient de diffusion d'une espèce chimique dans une solution libre (m^2/s) ;
 D^* : coefficient de diffusion effectif (m^2/s);
 τ_m : facteur de tortuosité géométrique ;
 CE_{gs} : conductivité électrique de la phase solide (S/m) ;
 D_i : coefficient de diffusion d'une espèce ionique à travers un milieu poreux (m/s) ;
 δ : constructiviste ;
 C : concentration de l'espèce chimique (g/l) ;
 x : position de la diffusion (m) ;

C_0 : concentration initiale (g/l) ;
 $Erfc$: fonction d'erreur complémentaire ;
 R_x : résistances inconnue (Ω) ;
 Z_x : impédance inconnue (Ω) ;
 R_{eq} : résistance équivalente (Ω) ;
 U_t : tension totale du circuit (V);
 V_{pp} : tension du générateur (V) ;
 U_1 : tension de la résistance R (V) ;
 V_v : volume des vides (l) ;
 V_c : volume totale de la cellule (l) ;
 V_s : volume des grains solides (l);
 M_{eau} : masse de l'échantillon dans l'eau (kg);
 M_{air} : masse de l'échantillon à l'air (kg) ;
 M_{sec} : masse sèche de l'échantillon (kg);
 M_{pe} : masse de poudre prélevée à 1md près,
 V_{fiolle} : volume de la fiole (ml) ;
 C_{Ag} : concentration de la solution de nitrate d'argent utilisée pour la titration ;
 V_e : volume de nitrate d'argent ajouté (ml) ;
 $V_{prélevé}$: volume du filtrat prélevé (ml) ;
 C_t : concentration en chlorure totaux (g/100g);

INTRODUCTION GENERALE

Les ouvrages construits en béton armé, sont souvent sujets à des attaques environnementales pouvant dégrader le matériau béton : température, infiltration d'ions de chlorures, de sulfates, d'acide carbonique, etc. ou encore une porosité partiellement ou totalement saturée en eau facilitant leur infiltration, ce qui par conséquent génère des coûts importants pour la réparation et l'entretien. Pour assurer la pérennité de ces structures en question, les ingénieurs ont besoin d'évaluer en permanence la santé de ces constructions. En théorie le critère majeur à identifier est la résistance caractéristique qui permet d'apprécier la stabilité de l'ouvrage et de prédire sa durée de vie moyenne. Dans la réalité, la dégradation du matériau dépend aussi de paramètres intrinsèques caractérisant sa microstructure appelés également indicateurs de durabilité tels que : la perméabilité, la porosité accessible à l'eau, le coefficient de diffusion, etc.

Jusqu'à présent les moyens utilisés par les ingénieurs, afin de quantifier ces indicateurs, ont recours au laboratoire à des techniques de caractérisation destructives : carottage, écrasement, grignotage, etc. Sur des constructions existantes, les techniques non destructives, quoique moins précises, peuvent se substituer aux essais directs issus de techniques destructives. Les ingénieurs peuvent se contenter de ces mesures qui offrent des indicateurs intéressants par rapport à l'alimentation en données du carnet de santé des constructions dans le cadre d'un suivi régulier.

On regroupe sous le vocabulaire d'essais non destructifs (END) ou encore contrôles non destructifs (CND), l'ensemble des techniques et procédés aptes à fournir des informations sur la santé d'une pièce ou d'une structure sans qu'il en résulte des altérations préjudiciables à leur utilisation ultérieure. Ces techniques touchent un certain nombre de domaines d'applications notamment : l'industrie nucléaire, l'aéronautique, le domaine médical,... Il s'agit, dans la plupart des cas, d'outils ou de méthodes de mesure, capables de donner accès à une ou plusieurs grandeurs physiques, chimiques ou physico-chimiques caractérisant le phénomène étudié.

A ce titre, plusieurs méthodes non destructives sont utilisées actuellement dans le domaine de la construction. On peut citer par exemple : les ultrasons, la thermographie infrarouge, la radiographie aux rayons X ou encore les méthodes électriques.

Problématique :

Notre thèse de doctorat s'intéresse à l'identification des paramètres physico-chimiques des milieux poreux favorisant l'infiltration des électrolytes à travers le réseau de pores dans les matériaux de construction. Cette infiltration est à l'origine d'attaques de certaines espèces chimiques agressives, souvent responsables de la dégradation de ces matériaux. On doit par conséquent savoir quelles sont les méthodes non destructives les plus simples et les appropriées permettant de caractériser le phénomène de transfert des fluides à travers les milieux poreux ? Quelle méthode offre la possibilité d'identifier, dans une démarche

performantielle, les indicateurs de durabilité qui nous intéressent ? Quel sont les facteurs intrinsèques et extrinsèques pouvant influencer la mesure réalisée ?

Nous nous attelons, dans le cadre de ce travail de recherche, à tenter de répondre à l'ensemble de ces questionnements.

Objectifs visés :

Comme nous l'avons précisé auparavant, certaines techniques comme les ultrasons, sont largement utilisées pour ausculter sur le plan mécanique, tout ou une partie d'un ouvrage. Toutefois, l'identification d'indicateurs de durabilité en vue de prédire la durée de vie des ouvrages se fait le plus souvent avec des techniques directes. Nous visons, pour faire plus simple, à promouvoir l'utilisation des méthodes non destructives. Nous utilisons, à cet effet, divers matériaux dont les propriétés sont différentes et particulièrement sur le plan de la porosité. Nous nous intéressons donc au suivi permanent -d'une manière non destructive-, l'évolution des profils de concentration des électrolytes au travers de ces milieux poreux en vue de déterminer leurs coefficients de diffusion.

Plan du mémoire :

Nous présentons dans le premier chapitre de ce travail les différentes techniques non destructives applicables dans le domaine du génie civil et leurs principes d'utilisation. Quelques applications illustrées par les travaux de recherches antérieurs sont présentées ainsi que leurs avantages et inconvénients.

Le second chapitre décrit un certain nombre de notions relatives à la conduction électrique dans les milieux poreux saturés. Nous présentons le principe de mesure de la conductivité électrique ainsi que les relations permettant de corréler ce paramètre aux propriétés physico-chimiques des matériaux. Aussi, nous mettons en revue les principaux facteurs pouvant influencer les mesures de conductivité électrique afin de les prendre en compte dans notre programme expérimental. L'état de l'art nous permet de mettre en exergue, au travers des résultats des travaux élaborés dans ce contexte, les relations existantes entre les phénomènes physico-chimiques qui gouvernent le transfert de masse dans les milieux poreux et les paramètres électriques mesurés. Le principe de la diffusion selon la 2^{ème} loi de Fick est présenté pour avoir les lignes directrices du phénomène de diffusion des espèces chimiques à travers les milieux poreux.

Dans le troisième chapitre, nous présentons dans le détail, le programme expérimental adopté. Une première partie est consacrée au choix du circuit électrique qui nous a permis d'effectuer nos mesures et aux différents paramètres pouvant les influencer. Nous voyons, par la suite, comment procéder aux mesures électriques des différents paramètres, tels que : la porosité, la concentration en chlorures, la tortuosité et enfin le coefficient de diffusion. Nous présentons également la mise en place de nouvelles cellules de diffusion, développées dans notre laboratoire, et qui sont destinées à la diffusion des électrolytes dans des matériaux granulaires comme les billes de verre ou bien les sables.

Le quatrième chapitre présente la discussion des résultats obtenus au cours de notre programme expérimental. Une partie comprend les résultats des essais préliminaires et les recommandations qui s'en dégagent. La seconde partie comprend les résultats des paramètres étudiés, mesurés électriquement ainsi qu'une comparaison avec les résultats de la littérature. Enfin, l'influence de la tortuosité sur le phénomène de la diffusion est présentée à la fin de ce chapitre.

Pour finir, ce travail est achevé par une conclusion générale qui englobe l'ensemble des résultats obtenus, ainsi que les perspectives de recherche que l'on entrevoit.

CHAPITRE I

CHAPITRE I: METHODES NON DESTRUCTIVES

1.1 Introduction:

L'évaluation de l'état des matériaux de construction est essentielle dans le diagnostic de structures existantes, puisque le vieillissement des matériaux peut entraîner une perte de performance, une atteinte à l'intégrité physique, mais aussi engendrer des coûts importants pour la réparation et la maintenance. Pour ces raisons, l'utilisation de contrôles non destructifs (CND) est devenue plus courante pour évaluer l'état des structures en béton armé existantes. La gamme de propriétés qui peuvent être évalués au moyen de ces tests est assez variée et comprend des paramètres fondamentaux comme la densité, le module d'élasticité, l'absorption, l'emplacement des aciers..., dans certains cas, il est également possible de vérifier la qualité et l'intégrité des structures en détectant les vides et les fissurations présents dans le matériau béton. Le but des contrôles non destructifs est de détecter tous les défauts susceptibles de provoquer des incidents à toutes les étapes de la chaîne de production depuis la fabrication du matériau de base jusqu'au produit fini en passant par les différentes et parfois nombreuses étapes intermédiaires et bien entendu chez l'utilisateur final.

Initialement développées vers les années 1960 pour répondre aux besoins des secteurs de pointe où les exigences de sécurité sont primordiales telles que : le nucléaire, l'aéronautique, l'extraction et transport des produits énergétiques pétrole ou gaz et enfin le spatial. Les méthodes de contrôle non destructif (CND) ont vu leur emploi se généraliser à l'ensemble du monde industriel. Elles font désormais partie des outils courants qui participent à l'amélioration de la productivité et qui permettent de garantir la conformité des produits pour satisfaire le client. Parallèlement à cette évolution, le contrôle non destructif a élargi son champ d'application en passant du strict domaine de la détection, de la reconnaissance et du dimensionnement de défauts localisés à celui de l'évaluation des caractéristiques intrinsèques des matériaux, devenant ainsi un acteur incontournable de l'évaluation de la qualité des produits.

Ces dernières années, l'augmentation du nombre de constructions en béton présentant des symptômes de détérioration prématurée a eu lieu en raison de l'action des différents milieux agressifs où elles sont implantées. Cela a rendu nécessaire l'amélioration des connaissances scientifiques sur les mécanismes physiques et chimiques, qui détériorent le béton, autant que de la procédure pour évaluer sa durabilité, afin d'atténuer le coût élevé de la réparation et l'entretien de ces structures. Les processus qui affectent la durabilité du béton sont principalement liés à sa structure poreuse, qui détermine l'interaction entre le béton et son environnement (Vergara, Miralles et col. 2001).

Aujourd'hui, les CND pour les matériaux et les structures de génie civil sont devenu une nécessité bien établie et plusieurs conférences et ateliers dédié strictement à ce sujet ont lieu régulièrement. Parmi ces conférences, la NDT-CE, qui a eu lieu pour la première fois en 1986 à Berlin. Cette série de conférences internationales qui s'en est suivie, vise à présenter de nouveaux développements dans le NDT et la modélisation analytique des matériaux du génie

civil et des structures, et d'encourager aussi la coopération internationale dans ce domaine en développement.

Dans la partie qui suit, nous allons voir différentes techniques de CND, le principe de leur utilisation, les domaines d'application ainsi que les avantages et les limites de chacune de ces méthodes.

1.2 Inspection visuelle:

L'inspection visuelle représente sans doute l'outil de contrôle le plus important dont dispose l'ingénieur, pouvant fournir des informations précieuses sur l'état des structures et la détérioration des matériaux. Il est particulièrement important de différencier entre les multiples pathologies et dégradations qui peuvent être rencontrées. Les informations recueillies auprès de l'inspection visuelle sont utiles pour donner une indication préliminaire de l'état de la structure afin d'établir un programme de tests ultérieurs. L'inspection visuelle ne doit cependant pas se limiter seulement à la structure étudiée, elle devrait également inclure des structures voisines et l'environnement (Bungey, Grantham et col. 2006).

C'est aussi par le biais de ces inspections que la documentation appropriée des défauts et des caractéristiques de la structure en béton peut être effectuée. Avec un œil expert, l'inspection visuelle peut révéler des informations importantes concernant la structure telles que les méthodes de construction, attaques chimiques, dommages mécaniques, dégradation physique, défauts de construction (Bin Ibrahim, Bin Ismail et col. 2002).

1.3 Scléromètre :

1.3.1 Introduction :

Les scléromètres à béton sont perçus comme les appareils de mesure portables non destructifs les plus utilisés dans la construction et le génie civil pour évaluer rapidement la résistance à la compression des produits en béton. Dédié à des mesures de dureté de toutes les parties en béton (poteaux, poutres, précontraints...) de bâtiments ou d'ouvrages d'art (ponts, viaducs, barrages, etc.), le scléromètre à béton a été développé par Ernst Schmidt et introduit au début des années 1948 (Malhotra, 2004).

1.3.2 Principe du scléromètre :

Le marteau à rebond est principalement un testeur de dureté de surface. Il fonctionne sur le principe que le rebond d'une masse élastique qui dépend de la dureté de la surface du matériau. Avec cet instrument, l'utilisateur appuie sur un piston contre la surface en cours de test et un ressort libère alors une masse qui va percuter le piston. A l'intérieur de l'instrument un ressort fournit une énergie d'impact définie pour chaque mesure. Après l'impact, la masse rebondit à une certaine distance et ceci est indiqué sur le cadran de l'appareil par un pointeur. La figure 1.15, montre les caractéristiques de base d'un marteau à rebond standard, qui pèse

moins de 2 kg et qui a une énergie d'impact d'environ 2,2 Nm (Malhotra, 2004 ; Bin Ibrahim, Bin Ismail et col. 2002).

1.3.3 Application du scléromètre :

Le scléromètre peut être utilisé à l'horizontale, à la verticale ainsi que pour tout angle intermédiaire. Cependant, la position de la masse par rapport à la verticale affecte l'essai grâce à l'action de la pesanteur sur la masse du marteau. Ainsi un test effectué sur la partie supérieure d'un plancher par exemple aurait un indice de rebondissement plus petit qu'un essai effectué sur la partie du dessous et la mesure sur les surfaces inclinées et verticales donneraient des résultats intermédiaires (Bin Ibrahim, Bin Ismail et col. 2002).

L'indice de rebondissement est d'abord très sensible aux propriétés très locales du béton, à savoir le fait que l'impact se produit juste au-dessus d'un agrégat ou d'un volume de pâte de ciment. Ainsi, une série de mesures doit être effectuée dans une zone limitée autour du même point et de faire la moyenne afin d'obtenir une valeur représentative. Par exemple, ASTM C 805 exige dix mesures pour un même test (Fischli et Moczko, 2012).

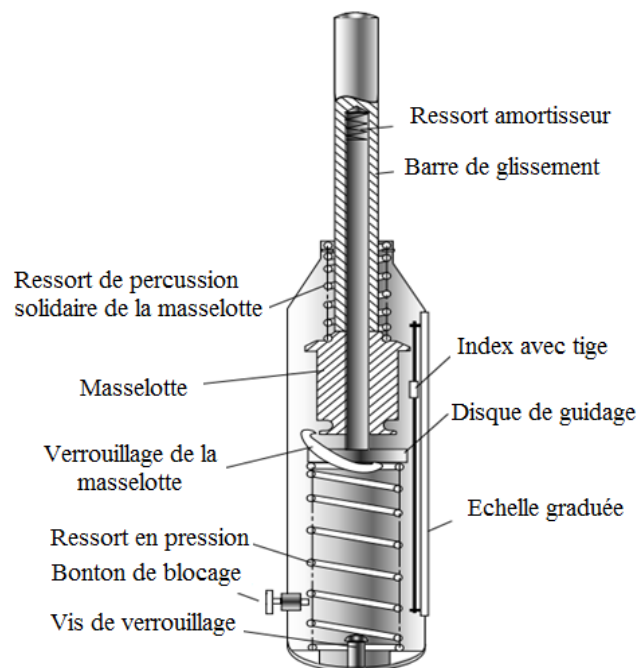


Figure 1.1 – Schéma d'un scléromètre (Beinish, 1999).

Beaucoup d'autres facteurs peuvent influencer l'indice de rebondissement (Evangelista, Shehata et col. 2003) comme :

- l'état d'humidité, une surface sèche donnant des valeurs plus élevées (figure 1.16),
- la texture de la surface, une surface plus lisse donne des valeurs supérieures à celles d'une surface rugueuse,
- le type d'agrégat.

1.3.4 Fiabilité et limites:

Le scléromètre développé par Schmidt constitue une méthode non destructive, peu coûteuse et rapide pour les essais sur du béton en laboratoire mais également in situ. Il faut néanmoins reconnaître, qu'il ne peut être considéré comme un substitut pour les essais de compression standard ; mais plutôt comme un procédé de détermination de l'homogénéité du béton dans les structures (Malhotra, 2004).

D'autres contraintes sont à prendre en considération lors de l'essai du scléromètre, notamment l'état de surface à tester. Il est déconseillé de l'utiliser contre une surface rugueuse. L'âge de l'échantillon peut tout aussi fausser les mesures car pour la même force appliquée sur deux bétons l'un à un âge précoce de 7 jours et le second à 28 jours, l'indice de rebondissement est plus élevé pour le jeune béton, et donc il est recommandé de ne pas l'utiliser au jeune âge ou bien sous une résistance à la compression inférieure à 7 MPa, cela pourrait endommager la surface du béton (Bin Ibrahim, Bin Ismail et col. 2002).

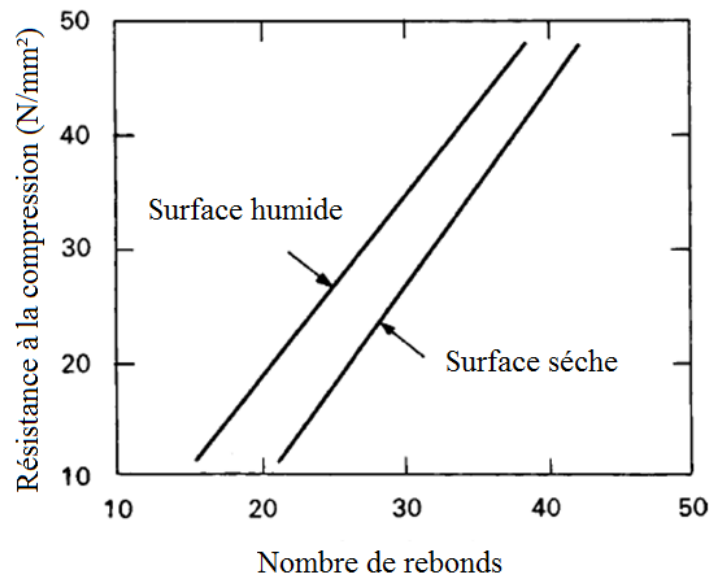


Figure 1.2 – Influence de l'état d'humidité de surface sur les mesures sclérométrique (Bungey, Grantham et col. 2006)

1.4 Méthode de transmission ultrasonique :

1.4.1 Introduction :

L'ultrason est une technique occupant une place très importante dans le domaine du CND grâce à la facilité de son utilisation et son coût raisonnable. Dans la mesure où l'on s'intéresse essentiellement à la durabilité du matériau ou bien à la quantification des propriétés mécaniques et physiques des milieux poreux, la zone inspectée correspond aux premiers centimètres sous la surface de la structure. Cette technique est capable de détecter à la fois différentes caractéristiques du béton durci, telles que : le degré de compacité, l'homogénéité,

la résistance à la compression, le taux de fissuration, etc., et de fournir des informations sur la qualité de l'élément structurel en béton.

La caractérisation des bétons par propagation d'ondes ultrasonores est une voie usuelle pour évaluer la résistance potentielle d'un ouvrage. L'utilisation de ce genre de techniques permet de repérer des zones à faibles caractéristiques mécaniques, voire à détecter la présence de fissures. Toutefois, il est important de noter que de nombreux paramètres expérimentaux et environnementaux peuvent influencer les mesures. Il convient donc d'être très prudent lors de la mesure. Les corrélations vitesse ultrasonore-résistance à la compression qui sont généralement utilisées ne peuvent s'appliquer qu'à des exemples donnés dans des circonstances spécifiques.

1.4.2 Principe de l'ultrason :

L'ultrason permet de mesurer la vitesse et l'atténuation des ondes élastiques. Le principe consiste à envoyer l'onde ultrasonore à l'aide d'un émetteur et enregistrer le signal par un récepteur séparé. La mesure s'effectue en déplaçant manuellement les capteurs le long du profil de mesure.

Une telle procédure bien adaptée aux conditions du laboratoire, n'est pas appropriée aux mesures in situ. Les deux capteurs sont généralement identiques en termes de géométrie et de fréquences. La gamme typique de fréquences utilisée pour le béton est de 20 kHz à 300 kHz (Garnier, Chaix et col. 2009; Garnier, 2012).

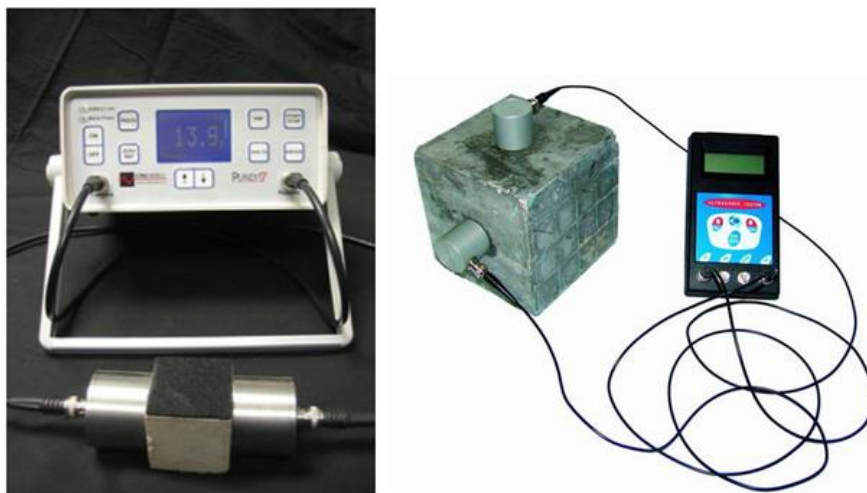


Figure 1.3 – Appareil à ultrasons.

Les ondes de pression (ondes P , ondes longitudinales) et les ondes de surface (ondes de Rayleigh) sont généralement utilisées dans les mesures par ultrason. La vitesse V est le paramètre le plus évalué actuellement. V est déduite de la mesure du temps de parcours de l'onde t et la distance L qui couvre l'onde dans le matériau testé (équation 1.1).

$$V = L / t \quad (1.1)$$

Il y'a trois façons dans lesquels les capteurs peuvent être disposé pour effectuer une mesure (figure 1.2).

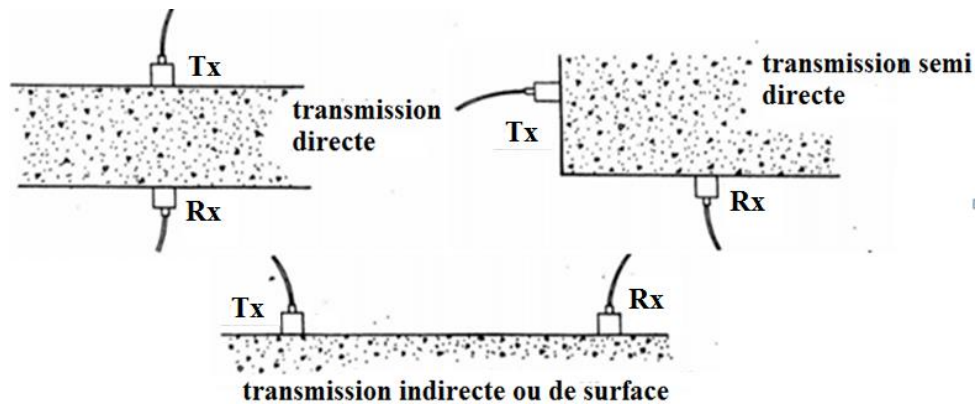


Figure 1.4 – Différents procédés de mesure avec l'ultrason (Balasubramanian, 2014).

La technique directe est la plus précise et doit être choisie lorsque cela est possible. La difficulté est d'accéder aux deux côtés. La technique semi directe est facile à utiliser, mais la distance entre les deux capteurs est moins bien définie que le cas précédent. Sa précision est généralement inférieure à la première. La technique indirecte est facilement exploitable in situ avec des configurations différentes. L'accès à une seule face est plus simple. De nos jours, les trois types de contrôle sont généralement utilisés sur site.

1.4.3 Corrélation avec les propriétés mécaniques :

En vue de connaître la relation directe entre la propagation des ondes et les propriétés mécaniques du matériau, de nombreux tests ont été développés pour corréler la résistance à la compression f_c au module d'élasticité E ou bien la vitesse ultrasonique. La corrélation avec les propriétés des matériaux peut être calibrée avec carottes extraites de la structure ou sur un échantillon cubique du même béton que la structure.

Par exemple, l'ACI -228 1.R (*méthode in situ servant à l'estimation de la résistance du béton*, American Concrete Institute) considère que V^4 est proportionnelle à E^2 et à la résistance du béton. Cependant (Stephen, 2003), précise qu'il est impossible de définir une loi générale. La norme européenne EN-13791 (NE et NF, 2007) , relative à l'évaluation de la résistance à la compression sur site des structures et des éléments préfabriqués en béton, considère une relation polynomiale d'ordre 2 entre la résistance du béton et la vitesse ultrasonore. Plusieurs relations ont été développées dans la littérature entre 1988 et 2014 reliant f_c à la vitesse de propagation V (voir tableau 1.1).

(Popovics, 2001) suggère d'évaluer les propriétés des matériaux après avoir établie une corrélation avec la vitesse en utilisant des techniques de régression multiple. Il faut garder à l'esprit que beaucoup de paramètres influencent les vitesses ultrasoniques comm la taille des agrégats, le rapport agrégat sur ciment (G/C) ou le rapport eau sur ciment (E/C), la nature du

ciment, l'âge du béton, la géométrie de la structure testée, les conditions de durcissement, la porosité, l'eau contenue dans les pores et les fissures, les dommages ainsi que les armatures.

Tableau 1.1 Corrélations entre la résistance à la compression f_c et la vitesse V (Evangelista, Shehata et col. 2003)

Auteurs	Expression	f_c (MPa)	Eprouvette	Type d'agrégats
Ravindrajah et col (1988) *	$f_c = 0,06.e^{1,44V}$	15 à 75	Cube 100mm	($D_{max}=20mm$)
Almeida (1993) *	$f_c = 0,0133.V^{5543}$ $f_c = 0,011.V^{5654}$	40,1 à 120,3	Cube 150mm	($D_{max}=25mm$)
Gonçalves** (1995)	$f_c = 0,02.V - 65,4$	18 à 42	Cylindre (70x70)mm	/
Qasrawi (2000) *	$f_c = 36,72.V - 129,077$	6 à 42	Cube 150mm	Variable
Soshiroda et Voraputhaporn (1999) *	$f_{c28} = 44,52.V_1 - 126,83$ $f_{c28} = 54,18.V_{28} - 206,27$	20 à 65	Cube 150mm	Gravier
Pascale et col** (2000)	$f_c = 10.28.V_8^{1272}$	30 à 150	Cube 150mm	Calcaire ($D_{max}=15mm$)
Elvery et Ibrahim(1976) *	$f_c = 0,012.e^{2,27V} \pm 6,4$	15 à 60	Cube 100 mm	Gravier ($D_{max}=19mm$)
Teodoru (1988) *	$f_c = 0,0259.e^{1,612V}$	2 à 24	/	/
Yun et col (1988) *	$f_c = 0,329.V - 1065$	5 à 30	Cylindre (150x300)mm	Gravier ($D_{max}=25mm$ et $D_{max}=40mm$)
(Hannachi and Guettache, 2011) *	$f_c = -0.0162V + 97.54095$ $f_c = 0.0088V - 20.2771$	9 à 38	Eprouvettes (160x320)mm, Carottes (65x130)mm	/
(Benyahia, Mohamed et col. 2010) *	$f_c = 0.525 e^{0.880 V}$ $f_c = 0.899 e^{0.844 V}$	27,5 à 32,9	/	$D_{max}=25mm$
(Nguyen, 2014) *	$f_c = (V/19,9) - 126w_m - 2980,8$	32 à 76,5	/	/

* f_c en MPa et V en km/s, ** f_c en MPa et V en m/s
 w_m : Teneur en eau massique du béton [%]

Une solution exploitée in situ ne peut donner la valeur absolue de la vitesse, elle permet juste la comparaison des différentes zones endommagées ou non. Cela permet de définir les zones

les plus suspectes de la structure sur laquelle il est important d'améliorer les essais ou de développer d'autres tests complémentaires (Abraham et Dérobert, 2003). Des études expérimentales ont permis d'établir une relation générale entre la qualité du béton et la vitesse de propagation des ondes ultrasonores (tableau 1.2). Une vitesse élevée de propagation des impulsions, indique généralement un béton de bonne qualité.

1.4.4 Domaines d'application :

Cette technique est connue pour son efficacité au laboratoire, ainsi que sur le terrain. En outre, elle peut être utilisée pour le contrôle de la qualité, ainsi que pour l'analyse de la détérioration. Elle peut fournir un moyen d'estimation de la résistance bien qu'il n'y ait pas de relation physique entre la force et la vitesse. Cette résistance peut être estimée à partir de la vitesse d'impulsion par un graphique de corrélation préétabli entre les deux paramètres (figure 1.3).

Tableau 1.2 Qualité du béton et vitesse de propagation des impulsions (Solis-Carcaño et Moreno, 2008)

Qualité du béton	Vitesse de propagation des impulsions (m/s)
Excellente	$V > 4575$
Bonne	$3660 < V < 4575$
Douteuse	$3050 < V < 3660$
Mauvaise	$2135 < V < 3050$
Très mauvaise	$V < 2135$

Beaucoup de travaux concernant l'utilisation de cette technique sur le béton et notamment dans l'évaluation de la qualité du béton ont été effectués, dont celles de Popovics, 2001; Safinowski, Piwakowski et col. 2007; Solis-Carcaño et Moreno, 2008; Garnier, Chaix et col., 2009.

Elle est utilisée également dans la surveillance du processus d'hydratation des pâtes de ciment, du mortier et béton par (Sadowska-Boczar, 1983; Dunn, Young et col. 1984) cités par (Malhotra et Carino, 2004). Le procédé est particulièrement utile pour détecter des changements au cours des premières heures après le gâchage du béton (Cole, 1985).

De plus, cette technique a été adoptée par de nombreux chercheurs, pour quantifier d'autres pathologies et défauts telles les fissures de surface. Cependant, il convient de souligner que l'application de cette technique a ses limites, si les fissures ont de petites dimensions ou bien si elles sont remplies d'eau ou d'autres débris qui permettent à l'onde de se propager à travers la faille. La vitesse d'impulsion ne diminuera pas de façon significative, ce qui implique que la détection de ces fissures devient quasi-impossible. (Vergara, Miralles et col. 2001) ont utilisés les méthodes ultrasonores pour estimer la porosité du mortier. Dans ces procédés, la porosité est en relation avec le bruit structurel du matériau, la vitesse du son et l'atténuation ultrasonore. Dans tous ces procédés, le mortier est considéré comme étant formé uniquement par deux phases: solide et air formé par les pores.

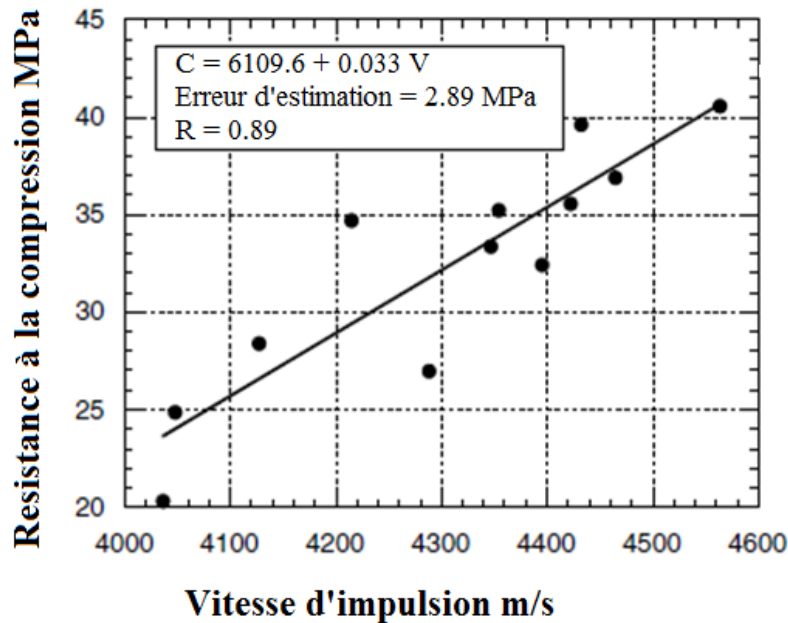


Figure 1.5 – Relation de résistance vs vitesse pour l'estimation de la résistance du béton (Malhotra et Carino, 2004).

Concernant le domaine de la géotechnique, les méthodes ultrasoniques ont été utilisées par (Balesdent, Pétraud et col. 1991) pour étudier la dispersion des fractions argileuses fines mais aussi pour la fragmentation des débris végétaux grossiers. Le travail de (Mentler, Mayer et col. 2004) s'est basé sur des expériences de dispersion par ultrasons afin d'évaluer la stabilité des agrégats du sol. L'agriculture fait également partie des domaines d'application des ultrasons. En effet, (Jamali, Kazi et col. 2007) s'en sont servi pour la détection des métaux lourds, présents dans les sols contaminés des terres agricoles servant à cultiver des légumes.

1.4.5 Avantages et inconvénients :

La méthode de la vitesse d'impulsion est un excellent moyen d'enquêter sur l'uniformité du béton. La procédure d'essai est simple et l'équipement disponible sur le marché est facile à utiliser en laboratoire ainsi que sur site. Les procédures d'essais ont été normalisées par l'ASTM et d'autres organisations. Avec la disponibilité de petits instruments numériques portables, qui sont relativement peu coûteux et facile à utiliser, le contrôle par ultrasons ajoute donc une nouvelle dimension au contrôle de la qualité du béton dans le domaine du bâtiment.

Les essais ultrasoniques peuvent être réalisés à la fois sur des échantillons au laboratoire, mais aussi sur de vraies structures en béton armé. Ce fait, combiné avec la capacité de détection des fissures internes et de surfaces sur des structures en béton, améliorent l'utilité de ces tests.

Dans la mesure où un grand nombre de paramètres affectant la vitesse de propagation de l'onde lors de la mesure, l'utilisation de cette technique n'est pas recommandée. Parmi ces facteurs on peut citer (Tarun et Malhotra 2004) :

- La présence de barres d'armature en acier, qui peut accélérer l'onde si elles sont dans la même direction que les ondes. Elles peuvent aussi disperser les ondes et réduire leur vitesse quand elles leur sont perpendiculaires.

- L'humidité, la porosité et la température du béton modifient la vitesse jusqu'à 20%.
- Le choix des capteurs (principalement la fréquence et la taille) peut modifier la vitesse de 15 ou 20%.
- La nature du béton (la taille des agrégats, la nature du ciment, la densité) modifie la vitesse de 5 à 20%.
- le temps de mesure extrêmement long, les erreurs en positionnement des capteurs et la non répétitivité du couplage des récepteurs, représentent également des défauts majeurs pour cette technique (Bin Ibrahim, Bin Ismail et col. 2002).

Pour conclure, l'inspection ultrasonore par transmission est une technique accessible qui peut fournir des informations sur l'état du béton. Dans le cas le plus simple, elle permet des comparaisons entre les différentes zones du béton dans une structure.

1.5 Impact-écho :

1.5.1 Introduction :

C'est une technique de détection des défauts et endommagements dans le béton, basée sur le contrôle du mouvement de surface résultant d'un impact mécanique de courte durée. La méthode permet de surmonter de nombreux obstacles liés à la détection des défauts dans le béton, basés sur des méthodes ultrasonores. L'une des caractéristiques clés du procédé est la capacité de traiter l'onde enregistrée dans le domaine temporel, dans un domaine fréquentiel. L'impact donne lieu à des modes de vibration, et la fréquence de ces modes est liée à la géométrie de l'objet à tester et la présence de failles.

1.5.2 Principe de l'essai :

Le principe de la technique impact-écho est illustré sur la (figure 1.4). Une impulsion de tension est introduite dans un corps d'essai par impact mécanique sur la surface. L'impact mécanique sur la surface génère à la fois des ondes de compression (ondes P), de cisaillement (ondes S) et des ondes R de surface (ondes de Rayleigh). Dans les essais d'impact-écho, l'onde P est d'une importance primordiale, car le déplacement causé par les ondes P sont beaucoup plus grandes que celles causées par les ondes S en des points situés à proximité du point d'impact.

Lorsque les ondes P remontent à la surface où l'impact a été généré, elles peuvent être utilisées pour générer des déplacements captés par un transducteur et par la suite enregistrés dans un oscilloscope numérique. L'onde enregistrée a une périodicité liée à l'épaisseur (T) de l'élément et la vitesse d'onde (V_p). La fréquence Fr des ondes P captée par le récepteur est déterminé par la transformation du signal du domaine temporel au domaine de fréquences (Carino, 2001; Carino, 2004).

Le signal tension-temps résultant est numérisé et transformé, dans un ordinateur, en signal amplitude-fréquences. Les fréquences associées aux pics dans le spectre d'amplitude résultant,

représentent les fréquences dominantes de l'onde. Ces fréquences peuvent être utilisées pour déterminer la distance à l'interface réfléchissante.

En conséquence, l'épaisseur de l'élément pourrait être définie par l'équation 1.2 (Bin Ibrahim, Bin Ismail et col. 2002; Lu, Sun et col. 2013):

$$T = V_p / 2Fr \quad (1.2)$$

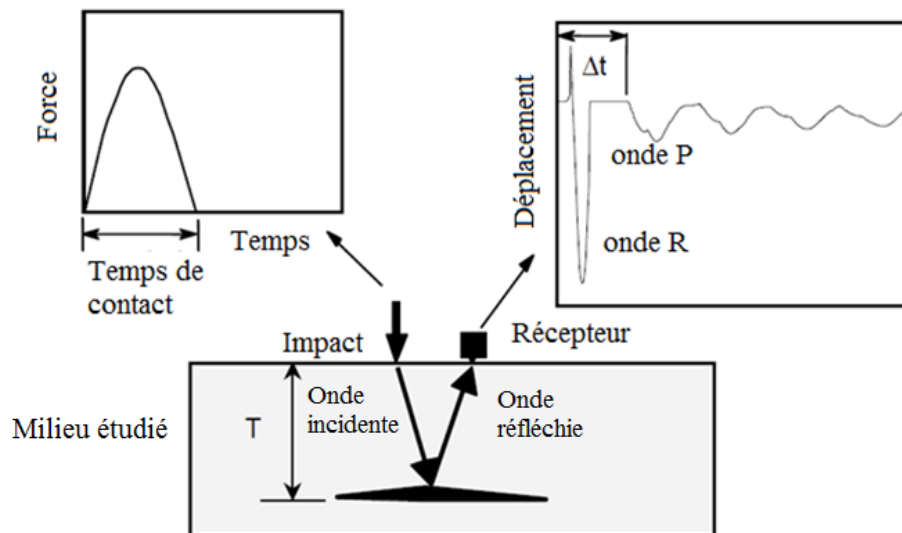


Figure 1.6 – Schéma du principe de la méthode impact-écho (Carino, 2001),

T: profondeur de l'objet testé,

Fr: fréquence dominante,

V_p : vitesse d'ondes de compression dans le matériau d'essai.

1.5.3 Applications de l'impact-écho :

La méthode impact-écho a réussi à détecter une variété de défauts, comme les vides dans le béton, les nids d'abeilles dans des éléments structuraux en béton (Carino et Sansalone, 1992). D'autres études expérimentales ont été complétées par des études analytiques pour obtenir une meilleure compréhension de la propagation des ondes transitoires dans les solides avec ou sans défauts (Cheng et Sansalone, 1995 a; Cheng et Sansalone, 1995 b).

L'application de la méthode a été étendue aux structures prismatiques, tels que les poteaux et les poutres. Néanmoins, il a été montré que des défauts peuvent encore être détectés dans les poutres et les colonnes, et des applications de terrain réussies ont été rapportés (Lin et Sansalone, 1992). Aussi (Lu, Sun et col. 2013) a testé la validité de la méthode impact-écho pour déterminer le module d'élasticité dynamique du béton.

1.5.4 Limites de la méthode de l'impact-écho :

Il est essentiel de veiller à ce que la fréquence d'impact, déterminé par la taille du roulement à billes, soit suffisamment élevée pour identifier les défauts existants. L'interaction des ondes de contrainte avec les fissures internes dépend essentiellement de la relation entre la longueur d'onde et la dimension de cette fissure ainsi que sa profondeur.

Il faut également veiller à ce que la surface du béton ne s'effrite pas sous le roulement à billes lors de l'impact, sinon la mesure est faussée. Pour la vitesse de l'onde P, déterminée par étalonnage avec une épaisseur connue, l'erreur d'épaisseur mesurée par les systèmes d'impact-écho disponibles dans le commerce est estimée à $\pm 2\%$. Cela suppose que la même vitesse de l'onde P est applicable à tous les points du test. Dans le cas d'une mesure de profondeur basée sur des relevés de la vitesse de l'onde P à partir des mesures de surface, l'erreur numérique sur l'épaisseur est de $\pm 3\%$. Cela suppose que la vitesse de l'onde P est uniforme avec la profondeur (Carino, 2004).

Pour un essai d'impact-écho réussi, il est recommandé de prendre plusieurs lectures et écarter les deux premières lectures. Cela suppose que la troisième lecture ainsi que ce qui suit sont correctes. La taille de l'objet à contrôler, joue un rôle important dans les résultats obtenus. Il est donc nécessaire d'effectuer l'essai dans plusieurs points sur la surface pour identifier les effets géométriques possibles.

Etant une méthode qualitative de contrôle dans le béton, elle ne permet pas de quantifier les différentes caractéristique physiques ou chimiques telles que: perméabilité, tortuosité, teneur en chlorure, etc (Bungey, Grantham et col. 2006).

1.6 La réflectométrie en domaine temporel

1.6.1 Introduction :

La réflectométrie en domaine temporel (RDT) est une méthode de contrôle non destructive qui repose sur un principe similaire au radar : émission d'une onde se propageant dans le milieu à caractériser, puis analyse des ondes réfléchies. La RDT est basée sur l'analyse du comportement diélectrique en champ électrique variant dans le temps qui peut être utilisé dans la détermination de la permittivité et la conductivité électrique dans une large classe de matériaux.

Depuis la fin des années 1970, la RDT a été une méthode de mesure bien connue et acceptée pour la détermination de la teneur en eau des matériaux poreux. Utilisée à l'origine pour tester des câbles de circuit électrique, la méthode RDT s'est développée rapidement à partir des années 1980, car elle est d'un emploi relativement simple et permet d'effectuer une mesure avec une incertitude inférieure à $\pm 2\%$ et avec une très bonne résolution spatiale et temporelle.

Cette technique a été adaptée en agronomie et en hydrologie depuis une vingtaine d'années pour mesurer l'humidité des sols. Elle vient au secours d'une technique de prélèvements destructive et peu précise sans un grand nombre de répétitions. Convaincus que ses possibilités n'ont pas encore été pleinement exploitées, des projets de recherche ont été mis en place en France dès 1995, qui visaient à obtenir, à partir d'une seule mesure par réflectométrie temporelle, un profil hydrique de sol, et non plus une mesure ponctuelle moyenne. A l'heure actuel la méthode RDT offre un important champ d'application notamment sur le matériau béton.

1.6.2 Principe de la RDT

La méthode RDT représente une méthodologie spécifique parmi les techniques d'impulsion de micro-ondes de mesure de l'humidité. Le principe du dispositif consiste à lancer des ondes électromagnétiques, généralement sur une ligne de transmission en parallèle insérée dans le matériau étudié et mesurer l'intervalle de temps entre le l'émission d'ondes et détecter les réflexions à partir de la fin de la ligne de transmission. L'élément fondamental dans tout équipement de RDT utilisé pour la détermination de la teneur en humidité dans des matériaux poreux est un dispositif pour observer l'écho de l'impulsion électromagnétique dans le domaine temporel.

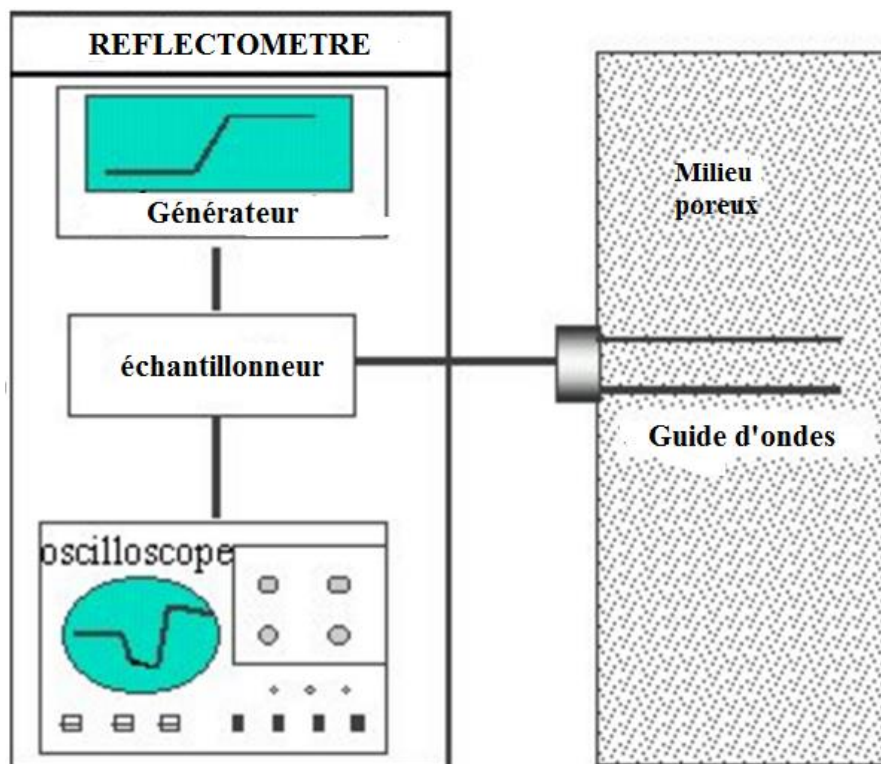


Figure 1.7 – Schéma d'un réflectomètre (Melounou, 1998).

Le dispositif de mesure est généralement constitué de quatre composantes principales (figure 1.5) : un générateur de signal, un guide d'onde, un oscilloscope et un échantillonneur (qui permet à l'oscilloscope d'atteindre des fréquences d'échantillonnage de l'ordre de plusieurs dizaines de GHz) (Melounou, 1998; Pavlík, Mihulka et col. 2012).

Le générateur de signal émet une impulsion de type échelon qui se propage via un câble coaxial le long des guides d'ondes constitués de tiges métalliques parallèles (en général au nombre de 2 ou 3). Arrivé à l'extrémité finale des guides, le front d'onde est réfléchi et repart vers l'oscilloscope qui enregistre les variations d'amplitude du signal en fonction du temps, en début du câble. La méthode est basée sur la mesure de ce temps de parcours (t) et de l'atténuation de l'amplitude de l'impulsion électromagnétique émise, on obtient alors un réflectogramme. Ce dernier se présente sous la forme d'une succession de pics, correspondant aux réflexions de l'onde incidente sur le matériau à tester (figure 1.6).

L'idée est d'analyser en détail la courbe du signal réfléchi enregistrée par le réflectomètre, en tenant compte de l'ensemble de ses coordonnées (temps de propagation et tension électrique) et non pas uniquement du temps de propagation total de l'onde dans le milieu, comme c'est le cas actuellement.

Le principe de la mesure a été développé par (Topp, Davis et col. 1980), qui ont montré que pour plusieurs types de milieux, il existe une relation empirique générale, exprimée par l'équation (1.3):

$$\theta = -0,053 + 0,029\varepsilon - 5,5 \cdot 10^{-4} \cdot \varepsilon^2 + 4,3 \cdot 10^{-6} \cdot \varepsilon^3 \quad (1.3)$$

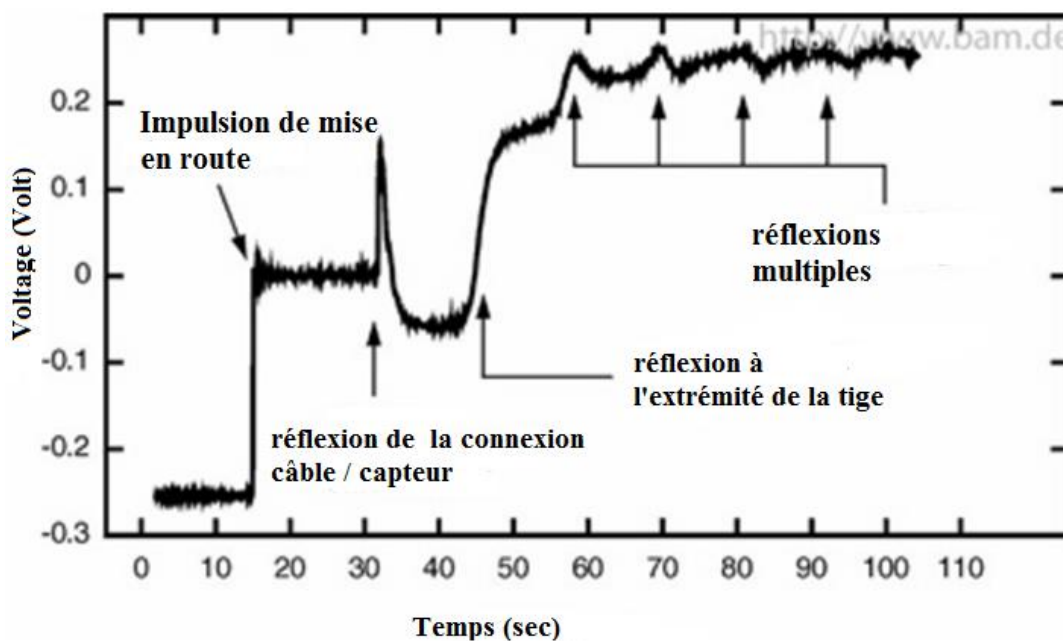


Figure 1.8 – Signal de mesure par la méthode RDT (Wiggenhauser et Kind, 2015).

L'équation (1.3) relie la teneur en eau volumique θ du milieu poreux et la constante diélectrique ε . Cette dernière est obtenue à partir du temps de parcours d'une impulsion électromagnétique à travers le milieu le long de la sonde, définie par l'équation (1.4) :

$$\varepsilon = \frac{C_{lum} \cdot t}{2L_{tige}} \quad (1.4)$$

Où C_{lum} (m/s) est la vitesse de la lumière, L_{tige} (m) est la longueur de la tige de la sonde, et t (s) est le temps de parcours de l'onde.

1.5.3 Applications :

Pendant de nombreuses années, la réflectométrie dans le domaine temporel (RDT) est appliquée comme une méthode établie pour la détermination de l'humidité et le sel contenu dans la couche inférieure du sol. Par conséquent, il est très prometteur de modifier et appliquer cette technique pour l'étude des matériaux de construction. Les applications en géotechnique, hydrologie et l'agriculture nécessitent la détermination de l'évolution temporelle de la distribution de la teneur en eau sur de plus grandes échelles pour caractériser les processus hydrauliques dans le sol et les formations rocheuses ou des structures d'ingénierie.

L'utilisation des techniques de la réflectométrie en domaine temporel permet la détermination instantanée, avec une grande précision, des humidités et la teneur d'une colonne de matériaux poreux (Dalton et Van Genuchten, 1986; Kirkham, 2005; Pastuszka, Krzyszcak et col. 2014). En effet, (Černý, 2009) affirme que la mesure de la teneur en humidité dans des matériaux poreux appartient aux applications les plus fréquentes; après plusieurs décennies d'utilisation, la méthode RDT est devenue l'une des techniques les plus reconnues dans ce domaine.

On peut citer les travaux de (Pavlík, Mihulka et col. 2012) qui se basent sur cette technique pour la mesure et la surveillance unidimensionnelle des profils de transport hydriques dans le silicate de calcium. (Aubic et Bottreau, 1982) s'est basé sur la RDT pour la détermination en tout point d'un milieu poreux, des coefficients de réflexion et en déduire à un instant donné les fractions volumétriques des différents constituants. La RDT a été aussi utilisée pour enquêter sur la façon dont l'eau et les polluants migrent à travers les couches de sols, les résultats obtenus pourront être appliqués pour des mesure de perméabilité insitu (Alimi-Ichola et Gaidi, 2005). Le procédé de la RDT a été adopté dans les bétons, pour la mesure des profils d'humidité dans des matériaux de construction tels que les bétons cellulaires (Pavlík, Jiříčková et col. 2006). (Yu, Drnevich et col. 2004) ont pu mesurer à l'aide de la RDT la teneur en eau et la teneur en ciment simultanément, à partir de laquelle le rapport E/C (eau/ciment) du béton frais peut être calculé. L'effet de la température est aussi étudié sur des bétons durcis pour déterminer les facteurs de compensation de température.

Le champ d'application de cette méthode s'est également étendu vers la surveillance et la détection des fractures et dommages dans d'importantes structures en béton (Miau-Bin, 1990), mais aussi à la détermination de la résistance mécanique du béton grâce au paramètre conductivité électrique mesuré par la RDT (Yu, Drnevich et col. 2004). (Liu, Hunsperger et col. 2002) ont employé cette technique dans la localisation et la caractérisation de la corrosion présente sur tendons de la précontrainte (figure 1.7) et sur les armatures dans les structures en béton armé.

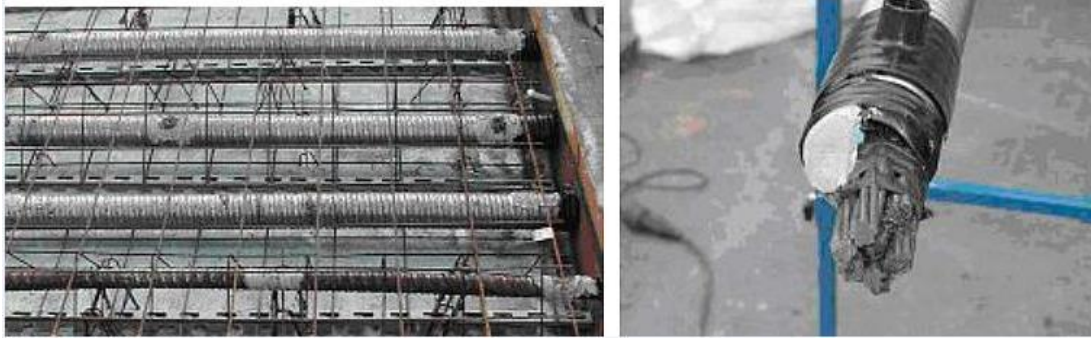


Figure 1.9 – Les câbles de précontrainte avec différents diamètres (Taffe, Borchardt et col. 2003).

Et enfin (Wiggenhauser et Kind, 2015) présente une investigation par la RDT visant à évaluer la teneur en humidité et son évolution sur la brique silico-calcaire saturée avec différentes humidités (figure 1.8).

1.5.4 Avantages et inconvénients :

La méthode de réflectométrie temporelle présente plusieurs avantages notamment celui d’être applicable sur des matériaux ayant une teneur plus élevée en sel, mais aussi de pouvoir réaliser le diagnostic en continu tout le long de l’échantillon étudié. Le matériel de la TDR adapté au terrain et relativement peu coûteux. De plus, une fois le matériel mis en place le diagnostic peut être réalisé à distance sans nécessiter la présence d’opérateurs à l’intérieur de l’ouvrage ce qui améliore la sécurité du personnel.

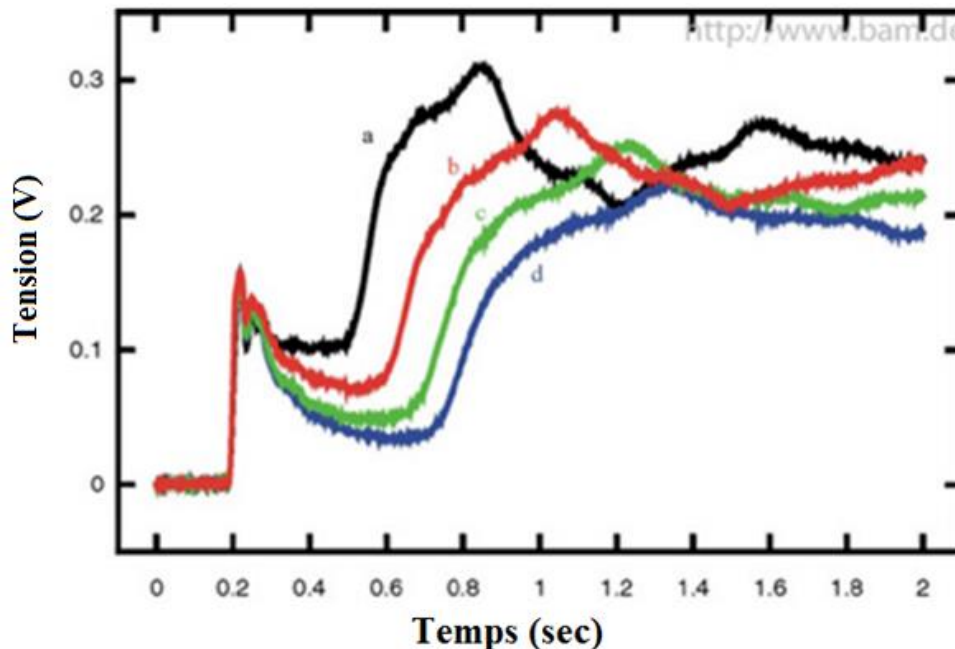


Figure 1.10 – Signal de RDT enregistré sur des briques silico-calcaires avec différentes teneurs en humidité: a) anhydre (4% en volume d'eau), b) 11% en volume d'eau, c) 22% en volume d'eau, d) la saturation en eau (30% en volume d'eau) (Wiggenhauser et Kind, 2015).

La méthode RDT présente l'avantage de permettre des mesures qui sont légèrement peu affectées par la composition du sol ou sa salinité. En revanche, des difficultés surviennent

dans les sols hétérogènes où les perturbations du milieu lors de l'insertion des tiges ou du tube sont conséquentes et se répercutent sur la qualité des mesures.

Cependant, cette méthode comprend aussi des inconvénients. En effet, un besoin fréquent du calibrage est nécessaire lors du changement des matériaux étudiés. Ce calibrage est intimement lié à la précision et influe grandement sur les résultats obtenus. Le volume échantillonné par les sondes de l'appareil est très réduit et limité, et enfin la mise en place du matériel est très délicate.

1.7 Les méthodes électriques :

1.7.1 Introduction :

Les mesures électriques constituent un moyen rapide, fiable, facile à utiliser in situ, et surtout peu coûteux. Compte tenu de ces caractéristiques attrayantes, un grand nombre d'applications ont été développées pour des mesures électriques dans divers domaines de la science et de l'ingénierie. Deux paramètres principaux de ces procédés électriques sont connus : la conductivité électrique (CE) et son inverse, la résistivité électrique (RE), qui sont souvent utilisés comme indicateurs pour évaluer l'amplitude de paramètres connus, tels que la porosité, la perméabilité, la saturation, le coefficient de diffusion, etc.

Dans un milieu poreux totalement saturé, la conductivité électrique est principalement ionique, les particules elles-mêmes ont une conductivité nulle ou parfois négligeable (Sundberg, 1932; Olphen, 1977; Friedman, 2005), le courant passe principalement par l'eau interstitielle.

Cette technique apparaît comme une méthode adaptée pour la caractérisation des matériaux de construction. Outre les essais mécaniques utilisés et reconnus par les normes, la résistivité électrique peut apporter des éléments de réponses supplémentaires, en restant une évaluation non destructive (Lataste, 2010).

La résistivité électrique est une propriété physique importante du béton et du ciment Portland qui affecte un grand nombre d'applications. La résistivité électrique (ou son inverse, la conductivité) est un paramètre important en tant que mesure de la capacité du béton pour résister au passage du courant électrique. La résistivité électrique du béton est un élément crucial dans l'estimation de la corrosion des armatures en acier dans le béton (McCarter, Chrisp et col. 2005), elle est fondamentalement liée à la perméabilité des fluides et la diffusivité des ions à travers des matériaux poreux tels que le béton. Par conséquent, la résistivité électrique peut également être utilisée comme une mesure indirecte de la capacité du béton à empêcher la pénétration des chlorures pouvant provoquer la corrosion des armatures (Whiting et Nagi, 2003).

1.7.2 Principe de la méthode :

Les mesures de résistivité électrique sur le béton armé sont souvent utilisées pour évaluer la probabilité de corrosion (Poupard, Ait-Mokhtar et col. 2004; Neithalath, 2007). Elles sont sensibles aux facteurs qui influent la corrosion des armatures : sel et humidité et permettent une interprétation plus précise des résultats de mesures électrochimiques.

En raison de leur sensibilité aux paramètres du béton sur site, la recherche est désormais orientée vers l'utilisation de la résistivité électrique pour évaluer directement les propriétés du matériau. La conduction électrique dans des matériaux poreux est décrite par la loi empirique d'Archie (équation 1.5), (Archie, 1942):

$$RE = aRE_0\phi^{-m}S^{-n} \quad (1.5)$$

Où :

RE : résistivité apparente,

ϕ : porosité,

RE₀ : résistivité de la solution dans le milieu poreux,

S : degré de saturation

a : paramètre de lithologie, n : exposant de saturation et m : facteur de cimentation appelé l'exposant Archie ; leurs valeurs sont détaillées dans le (tableau 1.3).

Cette relation empirique a été établie pour les roches, mais les travaux de (Naar, 2006; Dazères, 2010), ont montré qu'il est possible de l'utiliser pour les bétons.

Tableau 1.3 Paramètres d'Archie d'après (Naar, 2006)

Paramètres	a	m	n
Roches	0,6 à 2 (augmente avec la porosité)	1,3 à 2,2 (augmente avec la cimentation)	Aux alentours de 2
Bétons	0,1 à 0,8	4,6	2,43

La résistivité mesurée est liée à la nature et le volume des fluides dans le béton (paramètres RE₀, et le degré de saturation) ; mais aussi aux paramètres microstructuraux tels que : porosité, interconnectivité des pores et tortuosité. Ainsi, la résistivité électrique est considérée comme un indicateur des propriétés de transfert dans le béton. Des travaux récents suggèrent de l'utiliser comme un indicateur de durabilité pour caractériser les bétons (Baroghel-Bouny, 2004).

1.7.3 Mesure de la résistivité électrique (RE):

1.7.3.1 Mesure par transparence (dispositif à deux électrodes) :

La mesure dite par transparence, consiste à injecter un courant dans le matériau et évaluer la différence de potentiel qui en résulte. Il s'agit d'un moyen de mesure très bien adapté à

l'étude d'éprouvettes ou de carottes. L'échantillon est saturé et placé entre deux plaques métalliques équipées d'éponges humidifiées pour améliorer le contact électrique (figure 1.9). C'est généralement la méthode utilisée pour la détermination de la résistivité électrique au laboratoire. La résistance électrique (R en ohms) est calculée par la loi d'Ohm (équation 1.6) (Lataste, 2010):

$$R = \frac{U}{I} \quad (1.6)$$

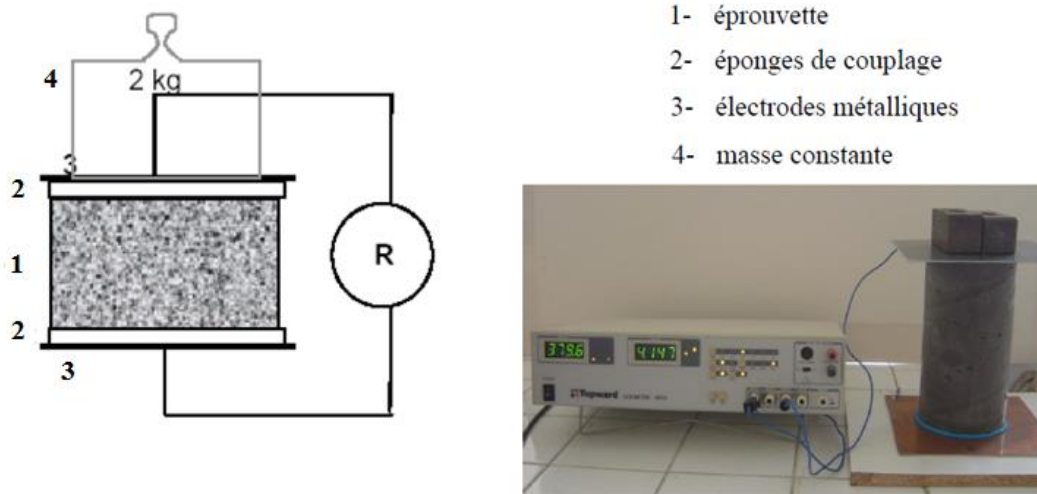


Figure 1.11 – Dispositif de mesure de la résistivité électrique par transparence (Lataste, 2010).

Enfin, la résistivité électrique du matériau est déduite par l'équation 1.7, en intégrant le facteur géométrique qui prend en considération l'espacement l (m) de la section A (m²) des électrodes.

$$RE = \frac{R \cdot A}{l} \quad (1.7)$$

1.6.3.2 Mesure à quatre électrodes :

Cette technique à quatre sondes dite de Wenner, a été mise au point pour une application in situ sur les bétons (Lataste, 2010). La technique peut être utilisée pour déterminer les résistivités rapidement et avec peu ou pas de dommages aux ouvrages en béton. Le dispositif comprend quatre électrodes (deux sondes extérieures de courant et deux sondes intérieures de tension) qui sont placées dans une ligne droite sur la surface du béton à des intervalles égaux, comme le montre la figure 1.10 (Bungey, Grantham et col. 2006).

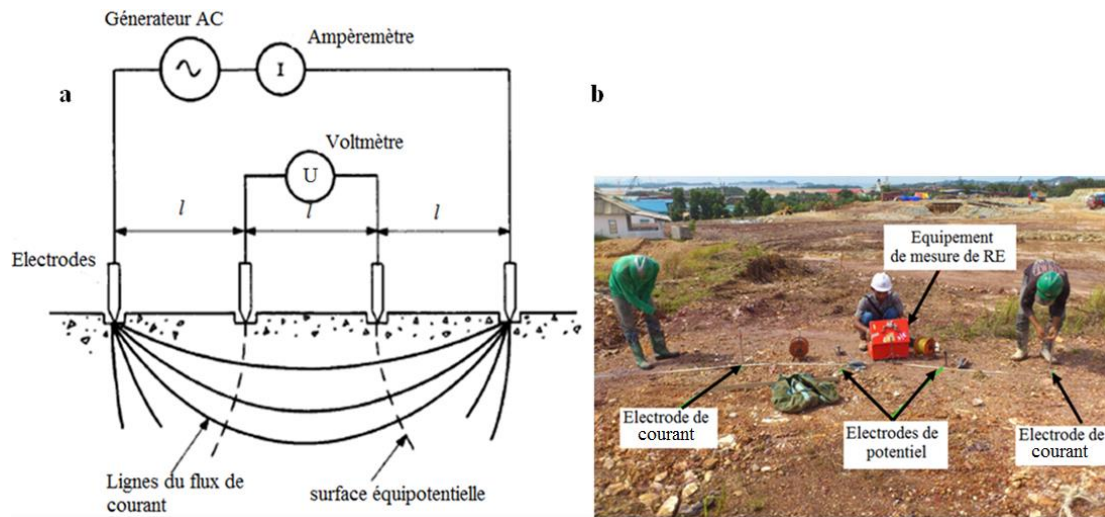


Figure 1.12 – (a) Schéma du résistivimètre de Wenner à 4 sondes (Bin Ibrahim, Bin Ismail et col. 2002); (b) Equipement de mesure de la RE (hurricane193.wordpress.com).

Tableau 1.4 Comparaison entre les dispositifs à quatre et à deux électrodes.

Quatre électrodes	Deux électrodes	Auteurs
<p>La technique la plus largement utilisée pour la mesure du champ de résistivité des bétons.</p> <p>L'influence de l'agrégat peut être évitée car l'espacement entre les électrodes interne dépasse la taille du plus grand granulat. Cela donnera une lecture de résistivité plus fiable. Un espacement de 50 mm est suffisant pour donner des lectures de résistivité relativement précises pour la plupart des structures en béton.</p> <p>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.</p> <p>Les lectures de résistivité seront plus précises pour les structures avec des dimensions relativement importantes. Des erreurs significatives se produisent lorsque des essais sont effectués sur des éléments minces en béton ou près des bords.</p> <p>Influence d'un nombre important de paramètres : (les contraintes géométriques du matériau, l'hétérogénéité du matériau, la présence</p>	<p>Mesure très influencée par la zone de béton située à proximité de l'électrode ; 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.</p> <p>La valeur de la résistivité est beaucoup plus élevée que la valeur réelle du béton, si l'électrode est placée directement au-dessus d'un granulat.</p> <p>Méthode classique, simple à mettre en place mais peu fiable compte tenu des nombreuses sources d'erreurs potentielles.</p> <p>Electrodes servent à l'injection du courant sont les mêmes servant à la prise du potentiel, ceci permet de ne pas avoir de dispersion du champ électrique.</p> <p>Méthode nécessitant l'utilisation d'échantillons et d'électrodes identiques</p>	<p>(Polder, Andrade et col. 2000)</p> <p>(Whiting et Nagi, 2003)</p> <p>(Naar,</p>

<p>d'armatures métalliques et la résistivité électrique de la couche superficielle du béton) rendent cette technique légèrement compliquée.</p> <p>Les électrodes de potentiel doivent être séparées des électrodes de courant par des séparateurs pour éviter toute perturbation. Cependant, risque de la dispersion du champ électrique.</p> <p>Le choix de la matière des électrodes est très judicieux, il est recommandé de choisir les électrodes les moins polarisables possibles.</p> <p>Méthode destinée beaucoup plus pour les essais in situ.</p>	<p>d'une mesure à une autre.</p> <p>Risque de polarisation des électrodes à basses fréquences(en dessous de 100 Hz), risque pouvant induire des erreurs de mesures considérables.</p> <p>La taille des électrodes a un effet important sur la valeur mesurée.</p>	<p>2006)</p> <p>(Bezzar, 2009)</p>
--	---	------------------------------------

Une faible fréquence du courant électrique est appliquée entre les deux électrodes extérieures et est mesurée après par les électrodes intérieurs de tension. La résistivité apparente est calculée par l'équation 1.8:

$$RE = \frac{2 \pi l U}{I} \quad (1.8)$$

Où :

U : tension mesurée,

I : courant appliqué,

l : espacement entre les électrodes.

1.6.3.3 Choix de la méthode :

Plusieurs investigations menées par plusieurs auteurs sur le choix entre les méthodes de mesure électrique à deux ou à quatre électrodes ont été établies, chacune d'elles présentant des avantages et des inconvénients pour chaque méthode. Le tableau 1.4 présente différentes appréciations des deux méthodes proposées dans la littérature.

1.7.4 Domaines d'applications :

De nombreux travaux, connus aujourd'hui, sont basés sur la mesure de la résistivité électrique ou de la conductivité électrique, que ce soit pour des sols ou des matériaux à base de ciment.

Il est bien connu que de nombreux paramètres, tels que la composition du liquide interstitiel et sa concentration, la porosité, le niveau de saturation, la minéralogie (dimension et la forme des particules), la structure interne (distribution de pores, de la forme des pores et le degré de cimentation) et la température, peut affecter la résistivité d'un système saturé (Tumidajski, Schumacher et col. 1996; Chrisp, Starrs et col. 2001; Friedman et Jones, 2001; Neithalath, 2007; Khalil et Santos, 2009).

Beaucoup de recherche se concentre sur l'utilisation de la résistivité pour surveiller la corrosion des armatures et quantifier le seuil critique de la quantité de chlorure permettant de déclencher la corrosion sur le béton armé (Poupard, Aït-Mokhtar et col. 2003; Poupard, Aït-Mokhtar et col. 2004). Dans la même thématique, (Neithalath, 2007) a utilisé ce paramètre pour le suivi de la vitesse de corrosion des armatures dans le béton armé. La CE a été utilisée pour suivre l'évolution de la concentration des chlorures dans la zone d'enrobage des ouvrages en béton (McCarter, Chrisp et col. 2005). Un tableau empirique a été présenté par beaucoup d'auteurs, notamment (McCarter, Chrisp et col. 2005; Bungey, Grantham et col. 2006), mais aussi J.F. Lataste dans l'ouvrage de (Breyse, 2012), qui donne une estimation approximative de la probabilité du taux de corrosion dans le béton armé d'après les valeurs de résistivité ou bien de conductivité électrique mesurée (tableau 1.5).

La conductivité a également été utilisée dans le contrôle de la qualité et la résistance des bétons (McCarter et Starrs, 1997; McCarter, Chrisp et col. 2005), la quantification de la stabilité des bétons autoplaçants (Mesbah, Yahia et col. 2011), le suivi du processus d'hydratation des ciments à jeune âge (Neithalath, Persun et col. 2010b), l'évaluation de la salinité et du taux de rendement des sols (Corwin et Lesch, 2005; Friedman, 2005).

La CE a permis aussi la détermination de paramètres de transport du type perméabilité ou coefficient de diffusion (Neithalath, Persun et col. 2010b; Neithalath et Jain, 2010a; Akhavan et Rajabipou,r 2013; Bezzar et Ghomari, 2013). (Wang, Gong et col. 2014) se sont focalisés sur le contrôle de l'effet des températures en utilisant la résistivité sur le béton y compris les cycles de gel-dégel pour mieux comprendre l'impact de ce phénomène sur la dégradation des structures en béton armé.

1.6.5 Avantages et inconvénients :

La méthode de la résistivité a montré, d'après ces applications, de nombreux avantages dans la quantification des caractéristiques physico-chimiques des milieux poreux tel que: porosité, tortuosité, coefficient de diffusion...) mais aussi des avantages par rapport à la technique elle-même dans son utilisation, sa mise en place ou encore l'interprétation des résultats obtenus à partir de ces mesure électriques.

La résistivité du béton est connue pour être influencée par de nombreux facteurs, dont humidité et la teneur en sel, de la température ainsi que les proportions du mélange et le rapport E/C. Parmi les inconvénients de cette méthode :

La présence des armatures en acier à proximité de l'emplacement de la mesure, entraînera une sous-estimation de l'évaluation de la résistivité du béton. La présence de couches de surface en raison de la carbonatation ou la surface de mouillage peut entraîner une sous-estimation significative ou une surestimation de la résistivité du béton.

Prendre des mesures de résistivité sur une section très petite ou près d'un bord de l'échantillon peut donner lieu à une surestimation de la résistivité réelle. Les mesures de résistivité sont fortement influencées par le paramètre température qui fluctue dans le temps (Bungey, Grantham et col. 2006).

Tableau 1.5 Seuils empiriques de résistivité/conductivité pour la corrosion des armatures (McCarter, Chrisp et col. 2005).

Résistivité (Ωm)	Conductivité (S/m)	Probabilité de corrosion
< 50	$> 2 \cdot 10^{-2}$	Très haute
50 – 100	$2 \cdot 10^{-2} - 10^{-2}$	Haute
100 – 200	$10^{-2} - 5 \cdot 10^{-3}$	faible à modérée
> 200	$< 5 \cdot 10^{-3}$	Faible

1.8 La thermographie infrarouge:

1.8.1 Introduction :

La thermographie infrarouge est une technique de détection non destructive à distance, qui s'est avérée être une méthode efficace, pratique et économique dans les tests sur le béton. Les méthodes d'auscultation par thermographie infrarouge peuvent être classifiées en deux catégories:

- Les méthodes passives, pour lesquelles aucune source de chaleur artificielle supplémentaire n'est utilisée pour effectuer l'auscultation.
- Les méthodes actives, pour lesquelles la diffusion de chaleur est provoquée par des moyens artificiels mis en place pour mener à bien l'auscultation (Defer et Maierhofer, 2012).

1.8.2 Principe et théorie :

Le système de balayage thermographique infrarouge permet de mesurer uniquement des températures de surface. Cependant, cette température est affectée par plusieurs facteurs: tout d'abord, la source de chaleur qui doit être peu couteuse et capable de donner à la surface du corps à tester, en l'occurrence le béton, une répartition uniforme de la chaleur (le soleil répond parfaitement à ces deux exigences).

Pour utiliser la thermographie infrarouge, la chaleur doit s'écouler à travers le béton sans pour autant tenir compte de la direction dans laquelle s'écoule le flux qui importe peu ou pas. Le deuxième facteur important à considérer est l'état de surface de la zone de test. Cet état a un effet profond sur la capacité de la surface à transférer l'énergie par rayonnement ; cette capacité d'un matériau à émettre de l'énergie est mesurée par l'émissivité du matériau.

D'une façon générale, la plupart des corps sont de bons émetteurs de rayonnement thermique, c'est-à-dire qu'ils rayonnent facilement de la chaleur sous forme d'énergie radiante infrarouge. L'émissivité d'un corps mesure son aptitude à émettre un rayonnement thermique. La majorité des matériaux de construction ont par exemple une émissivité de 0,9 environ (tableau 1.6), ce qui signifie qu'ils rayonnent 90% du maximum théorique d'énergie radiante correspondant à une température donnée (Mazria, 1979).

Le dernier facteur qui affecte la mesure de la température d'une surface de béton est l'environnement qui entoure cette surface. Différents paramètres sont à prendre en considération : le rayonnement solaire, la couverture nuageuse, la température ambiante, la vitesse du vent et l'humidité de surface (Weil, 2004).

Tableau 1.6 Émissivité totale à 20°C pour des matériaux de construction classiques (Defer et Maierhofer, 2012).

Matériaux	Béton	Asphalte	Brique rouge	Plâtre	Sol sec	Sol humide
Emissivité	0,92	0,93	0,93	0,91	0,9	0,95

Planck affirme que tous les objets dont la température est supérieure à zéro, émettent un rayonnement infrarouge (figure 1.11). Cependant, ce rayonnement ne devient visible pour l'homme qu'à une température supérieur à 500° C.

Un équipement de surveillance infrarouge a été développé (figure 1.12) permettant de détecter l'émission infrarouge et de la visualiser sous forme d'image. La gamme sensible de l'appareil se situe entre 2 – 14 μm , pour une température comprise entre 40 – 2000°C. La gamme à utiliser est de 2 – 5,6 μm , et pour une température entre -20° C et des températures ambiantes la gamme est de 8 – 14 μm . (Defer et Maierhofer 2012) quant à eux disent que le rayonnement infrarouge couvre la gamme spectrale de 0,78 – 1000 μm ; mais pour une application standard dans la thermographie infrarouge, la gamme 1,5 – 14 μm est utilisée.

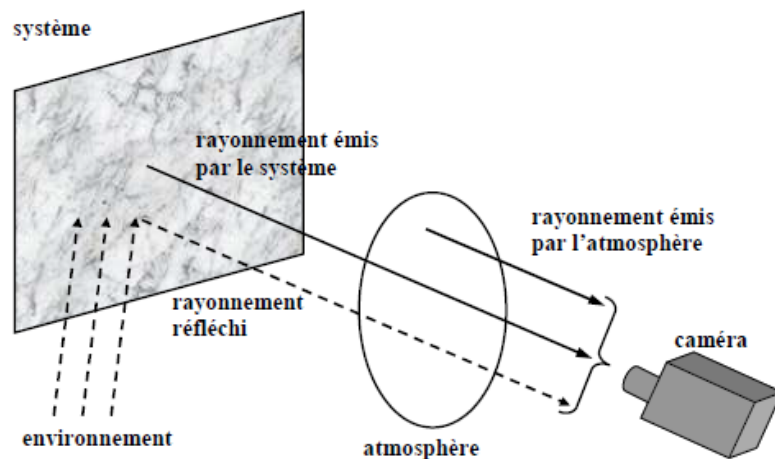


Figure 1.13 – Composition du rayonnement reçu par une caméra infrarouge (Naar, 2006).

1.8.3 Quelques applications de la méthode :

La thermographie infrarouge, qui a été utilisée avec succès aux Etats-Unis dans les applications de génie civil, est de plus en plus appliquée en Europe comme une technique non destructive. L'utilisation fréquente et le développement de cette méthode en ont fait un critère de choix pour l'évaluation de l'isolation thermique des bâtiments.

L'utilisation de la thermographie infrarouge trouve diverses applications dans le génie civil notamment dans : les tabliers de pont en béton, voies de circulation des aéroports, revêtements défectueux sur les bâtiments, perte d'énergie dans les bâtiments (Bin Ibrahim, Bin Ismail et col. 2002).

On peut citer d'autres travaux basés sur l'emploi de cette technique comme : l'identification des zones détachées les unes des autres (délaminées), dans une structure en béton mais aussi étudier la structure interne d'un pont en maçonnerie (Grinzato, Vavilov et col. 1998; Balaras et Argiriou, 2002; Clark, McCann et col. 2003), évaluer et mesurer des flux thermiques dus au phénomène de convection (Carlomagno et Cardone, 2010) et déterminer le coefficient de transfert thermique dans les couches de revêtement des bâtiments (Fokaides et Kalogirou, 2011).

(Theodorakeas, Avdelidis et col. 2014) ont montré expérimentalement et numériquement l'effet du potentiel de refroidissement thermographique dans la caractérisation quantitative des couches de mosaïque en plâtre situées sous différentes couches de couverture en mortier. De plus, la thermographie infrarouge peut être appliquée comme outil pour le diagnostic précoce des détachements et décollements des couches de plâtre sur les façades des bâtiments (de Freitas, de Freitas et col. 2014).



Figure 1.14 – *Appareil de thermographie infrarouge (Defer et Maierhofer, 2012).*

1.8.4 Avantages et limites :

Hormis le principal avantage de la thermographie infrarouge qui se trouve être le caractère non destructif permettant de conserver l'intégrité de la structure auscultée, cette technique présente de nombreux autres avantages, l'équipement est sans danger et totalement sûr car il n'émet aucun rayonnement. Il enregistre uniquement un rayonnement thermique naturellement émis à partir du béton, il présente aussi une large capacité d'évaluation puisqu'une caméra infrarouge est capable de contrôler simultanément la température en plusieurs points à l'intérieur d'une même zone thermique.

L'avantage final et, sans doute, principal de l'auscultation infrarouge est la possibilité de traiter une grande surface, contrairement aux autres méthodes non destructives qui sont pour la plupart ponctuelles ou linéaires. Ainsi, la thermographie infrarouge est capable de former une image en deux dimensions de la surface d'essai, montrant l'étendue des anomalies internes.

Il existe malgré tout, quelques limites ou inconvénients à cette méthode. Tout d'abord, il n'est pas possible de déterminer la profondeur ou l'épaisseur d'un vide. Il faut aussi tenir compte de l'effet de l'état de surface car la caméra infrarouge enregistre un rayonnement provenant d'une surface, ce qui veut dire que la mesure est très sensible à sa qualité. Il est donc recommandé de nettoyer de tout élément indésirable. Enfin, il n'est pas recommandé 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 (Bin Ibrahim, Bin Ismail et col. 2002; Bungey, Grantham et col. 2006; Defer et Maierhofer 2012; de Freitas, de Freitas et col. 2014).

1.9 Radiographie :

1.9.1 Introduction:

L'utilisation de la radiographie aux rayons X ou bien gamma sur les bétons s'est développée très lentement. Les premiers travaux dans ce domaine ont été réalisés en 1949 par (Mullins et Pearson), qui ont utilisé les rayons X pour montrer les variations de densité dans le béton ; mais aussi la localisation des barres d'acier. Une autre étude en 1979, s'est consacrée à l'étude sur la contrainte d'adhérence sur poutres en béton précontraint (Mitchell, 2004). Les méthodes radioactives se sont développées de façon constante au cours des dernières années, et bien que généralement coûteuse avec d'importantes questions de sécurité qui la rendent plus appropriée aux conditions de laboratoire, leurs applications sur le terrain se multiplient. Elles peuvent être utilisées dans l'évaluation des ponts en béton précontraint afin d'établir l'emplacement et l'état des câbles de précontrainte, le contrôle de la qualité de jointoiement du béton ainsi que la localisation et l'étendue des vides dans le béton.

1.9.2 Principe de la méthode:

La radiographie en génie civil peut concerner un grand nombre de structures. Théoriquement, les limites sont uniquement liées à la profondeur de pénétration des rayons et à la vitesse d'exposition de l'émetteur. Elle peut être utilisée sur le béton armé ou précontraint, la pierre, le mortier et l'acier. Etant une technique de transmission, il est donc nécessaire d'accéder aux deux faces opposées de la structure. Une face est mise en évidence par la source et le film sensible est placé sur l'autre face (Bungey, Grantham et col. 2006).

En radiographie, le rayonnement est soit de rayons X ou rayon gamma. Les rayons gamma sont émis par une source artificielle (Cobalt 60 ou Iridium 192). La figure 1.13 illustre un exemple des sources citées (Balayssac, 2012). Dans le cas des rayons X, des accélérateurs sont

utilisés pour obtenir une énergie plus élevée. Pour les applications habituelles, l'atténuation du rayonnement à travers le matériau est mesurée avec un film sensible situé sur la face opposée (figure 1.14) (Mitchell, 2004).

Généralement, la radiographie industrielle est en mesure d'observer: La présence de cavités à l'intérieur du béton, localisation de tendons, localisation de l'armature ainsi que le diamètre des barres d'armature, détection des câbles cassés dans certains cas.

La source radiographique est choisie en fonction du champ de l'enquête (taille de la cible, épaisseur de l'élément en béton, conditions de mise en œuvre et de la radioprotection). Le poids de la source est lié à sa capacité de pénétration à travers le matériau. Le tableau 1.7 présente quelques exemples des caractéristiques des sources radioactives.



Figure 1.15 – Source d'Iridium 192 (Balayssac, 2012).

Pour les récepteurs, l'utilisation de films photographiques (émulsion) est très habituelle et les différentes catégories de films sont définies par les normes. Le film est toujours associé à un filtre et un écran de renforcement.

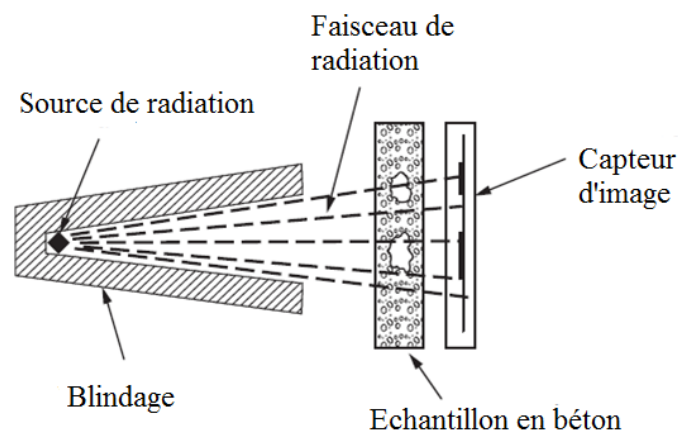


Figure 1.16 – Schéma de principe de la radiographie (Mitchell, 2004).

Tableau 1.7 Caractéristiques de la Source (Balayssac, 2012).

Sources	Demi-vie radioactive	Poids de la source (kg)	Épaisseur maximale (cm)
Iridium 192	74	25	30
Cobalt 60	5,3	120	40
Cobalt 60	5,3	350	65
Rayons X		45 à 120	130

Le choix du film est fait en fonction de l'épaisseur de l'élément, la sensibilité requise ainsi que le temps d'exposition. La qualité d'image dépend de l'émetteur, la distance entre la source et le film, l'incidence des rayons, le type du film, l'écran de renfort et le filtre. La distance entre la source et le film photographique dépend de l'épaisseur de l'élément mesuré.

1.9.3 Avantages et limites :

L'important avantage de cette technique est sans doute son large éventail d'application puisqu'elle peut être utilisée pour localiser la position des armatures dans le béton mais aussi estimer le diamètre ainsi que la profondeur à laquelle se trouvent ces armatures. Elle peut également révéler la présence de vides, les fissures et les matières étrangères ; elle reste très utilisée dans l'évaluation des constructions en béton précontraint.

Quelques inconvénients de la radiographie :

Une section relativement épaisse nécessite une grande énergie et représente un réel danger pour la santé de l'utilisateur. Le matériel est assez lourd et lent à mettre en place, le coût est extrêmement élevé et la forme complexe des structures, peut rendre difficile l'accès aux deux faces pour effectuer l'auscultation (Bin Ibrahim, Bin Ismail et col. 2002; Mitchell 2004).

1.10 Conclusion :

Chacune des méthodes, présentées dans ce chapitre, a ses propres caractéristiques selon le principe physique auquel elle obéit. Elles présentent donc toutes des avantages et des inconvénients tant au niveau de leurs sensibilités aux différents facteurs que de leur utilisation sur site, ces caractéristiques sont récapitulées dans le tableau 1.8.

Lors d'une auscultation non destructive d'une structure, le but est de caractériser une pathologie suspectée, pouvant être déclenchée par plusieurs phénomènes. La complexité et l'hétérogénéité du matériau béton ne rendent cette caractérisation que plus difficile, or toutes les méthodes n'offrent pas la possibilité de définir ces phénomènes. Ainsi, le choix de la méthode à adopter se fait en premier lieu en fonction des phénomènes recherchés et des paramètres à quantifier. Le plan économique est aussi important lors du choix de la méthode non destructive.

Tableau 1.8 Récapitulatif des méthodes non destructives citées

Méthodes	Avantages	Inconvénients	Références
Inspection visuelle	<ul style="list-style-type: none"> -Ne demande aucun outil électrique. -Permet d’avoir une indication préliminaire de l’état de la structure. -Possibilité de détection de quelques pathologies telles que : fissuration, écaillage, coloration de la surface, tassement différentiel ou déplacement, croissance végétative, nid d’abeille, ressuage, efflorescence. 	<ul style="list-style-type: none"> -Permet uniquement d’avoir une idée sur les dégradations superficielles. -Nécessite une familiarisation avec la structure avant l’inspection (parcourir les plans détaillés de l’ouvrage, examiner les documents disponibles (spécifications techniques, rapports de tests antérieurs, détails des matériaux utilisés,...). - Requiert un œil expert, et une expérience importante dans le domaine de l’identification des pathologies. 	(Bungey, Grantham et col., 2006)
Scléromètre	<ul style="list-style-type: none"> - Méthode non destructive, peu coûteuse et rapide. - Applicable au laboratoire et in situ. 	<ul style="list-style-type: none"> - Il ne sert qu’à déterminer l’homogénéité du béton dans les structures et non pas à quantifier la résistance à la compression. - Déconseillé de l’utiliser contre une surface rugueuse. - il est recommandé de ne pas l’utiliser au jeune âge ou (résistance à la compression inférieure à 7 MPa) pour ne pas endommager la surface du béton. 	(Malhotra, 2004) (Bin Ibrahim, Bin Ismail et col. 2002).
Transmission ultrasonique	<ul style="list-style-type: none"> -Excellent moyen d’enquêter sur l’uniformité du béton. -Procédure simple et disponibilité de l’équipement. -Essai réalisable sur échantillons au laboratoire et sur des structures réelles. -Capacité de détection de fissures interne et de surface sur des structures en béton 	<ul style="list-style-type: none"> -La présence de barres d’armature en acier peut accélérer ou bien disperser l’onde sonore. -L’humidité, la porosité et la température du béton modifient la vitesse jusqu’à 20%. -Le choix des capteurs (principalement la fréquence et la taille) peut modifier la vitesse de 15 ou 20%. - La nature du béton (la taille des agrégats, la nature du 	(Malhotra et Carino, 2004) (Garnier, Chaix et col., 2009)

		ciment, la densité) modifient la vitesse de 5 à 20%.	
Impact-écho	<ul style="list-style-type: none"> -Très bon outil de contrôle de qualité du béton. -Déetecte les défauts et anomalies dans les éléments structuraux en béton. 	<ul style="list-style-type: none"> -La fréquence d'impact, déterminée par la taille du roulement à billes, doit être suffisamment élevée pour identifier les défauts existants. -Une surface d'un béton effritée lors de l'impact risque de fausser la mesure. -Il est recommandé de prendre plusieurs lectures pour avoir une mesure correcte. - Plus la taille de l'objet à contrôler est importante, plus il est nécessaire d'effectuer l'essai dans plusieurs points sur la surface pour identifier les effets géométriques possibles. 	<p>(Carino, 2001)</p> <p>(Carino et Sansalone, 1992)</p> <p>(Lin et Sansalone, 1992)</p> <p>(Lu, Sun et col., 2013)</p>
RDT (réflectométrie en domaine temporel)	<ul style="list-style-type: none"> - Applicable sur des matériaux ayant une teneur élevée en sel. - Permet un diagnostic en continu tout le long de l'échantillon étudié. - Le matériel est adapté au terrain et relativement peu coûteux. 	<ul style="list-style-type: none"> - Calibrage nécessaire lors du changement des matériaux étudiés. - Volume échantillonné par les sondes de l'appareil, très réduit et limité. - La mise en place du matériel est très délicate. 	<p>(Černý, 2009)</p> <p>(Yu, Drnevich et col., 2004)</p> <p>(Pavlík, Jiříčková et col. 2006)</p> <p>(Pavlík, Mihulka et col., 2012)</p>
Méthode de la résistivité électrique	<ul style="list-style-type: none"> - L'estimation de la corrosion des armatures en acier dans le béton. - Permet de quantifier la perméabilité des fluides et la diffusivité des ions à travers des matériaux poreux. - Quantification de paramètres physiques et chimiques dans les milieux poreux tels que : porosité, tortuosité, diffusion, salinité, teneur en chlorures, etc. 	<ul style="list-style-type: none"> - La présence d'armatures entraîne une sous-estimation de la résistivité du béton. -La présence de couches de surface dues à la carbonatation ou la surface de mouillage peut modifier la résistivité du béton. -La taille de l'échantillon et le point de mesure surestime la résistivité réelle. -Les mesures de résistivité sont fortement influencées par le 	<p>(Bungey, Grantham et col., 2006)</p> <p>(Lataste, 2012)</p>

		changement de température, humidité, saturation, concentration de chlorures, porosité et distribution porale...	
Thermographie infrarouge	<ul style="list-style-type: none"> - Equipement sans danger, risque zéro au niveau rayonnement. - Large capacité d'évaluation, (contrôle de la température en plusieurs points à l'intérieur d'une même zone thermique). - Possibilité de traiter une grande surface, 	<ul style="list-style-type: none"> - Incapacité à déterminer la profondeur ou l'épaisseur d'un vide. - l'effet de l'état de surface influe grandement sur la sensibilité de la mesure. - Les actions climatiques (vent, pluie,...) risquent de fausser la mesure infrarouge. 	<p>(Bin Ibrahim, Bin Ismail et col. 2002). (Weil, 2004) (Defer et Maierhofer, 2012) (de Freitas, de Freitas et col., 2014)</p>
Radiographie X	<ul style="list-style-type: none"> - Large éventail d'applications, (localisation des armatures dans le béton, estimation du diamètre et profondeur de ces armatures, repérer les vides, les fissures et matières étrangères) 	<ul style="list-style-type: none"> - Section épaisse nécessitant une grande énergie représente un réel danger pour la santé de l'utilisateur. - Matériel lourd et lent à mettre en place. - Coût extrêmement élevé. - La forme complexe des structures, rend difficile l'auscultation. 	<p>(Balayssac, 2012)</p>

En effet, il n'est pas utile de choisir une méthode relativement couteuse. Un autre critère de choix dans une procédure non destructive, le temps de la mise en place et la facilité de l'utilisation du matériel par l'utilisateur.

Le relevé des données et leurs interprétations sont sans doute l'étape la plus délicate dans une démarche non destructive, effectivement les résultats peuvent différer en fonction du lieu, l'environnement ou encore de l'expérimentateur lui-même. Il devient donc difficile de quantifier les résultats expérimentaux et définir des seuils de sensibilité des techniques. D'un autre coté une mauvaise interprétation peut mener à une compréhension erronée du phénomène physique qui est à l'origine de la dégradation de l'élément structurel.

L'objectif de notre travail se focalise sur l'emploi d'une technique non destructive peu couteuse et très simple à mettre en place permettant de quantifier des caractéristiques physiques ou chimiques (porosité, tortuosité, coefficient de diffusion...) dans les matériaux poreux : bétons, sables, briques, etc. Pour atteindre cet objectif, notre choix s'est porté sur l'utilisation des méthodes électriques, basées sur la mesure de la CE/RE pour plusieurs raisons, notamment la fiabilité de cette technique en matière de précision ; mais aussi la possibilité d'interpréter ces résultats vu les nombreux travaux réalisés dans le domaine. A ce stade, il n'est plus question de détection de vides dans le béton ou bien la mesure de la

résistance à la compression, mais plutôt d'aller vers le fond des choses en essayant de voir et comprendre ce qui se passe à l'intérieur du matériau à l'échelle microscopique.

Afin de parvenir à cette quantification par la méthode de la CE/RE, il est question de faire un choix entre les deux méthodes présentées au cours de ce chapitre (partie 1.6) à savoir la méthode à 2 électrodes et celle à 4 électrodes, les deux méthodes présentent beaucoup d'avantages et un certain nombre d'inconvénients. Toutefois, la méthode à quatre électrodes semble être bien plus compliquée à mettre en place et est surtout destinée aux mesures in situ puisqu'elle nécessite des corps de grande dimension. L'autre méthode à 2 électrodes semble avoir fait ses preuves vu le nombre de chercheurs à avoir utilisé ce dispositif (Hansson et Hansson 1983; Gu, Xu et col. 1993; Corwin et Lesch 2005; McCarter, Chrisp et col. 2005; Robinson et Friedman 2005; Bezzar et Ghomari 2009; Topçu, Uygunoğlu et col. 2012; Bezzar et Ghomari 2013; Chang, Song et col. 2013), non seulement pour la simplicité et la rapidité de la mise en place mais aussi parce qu'elle est beaucoup plus destinée à des mesures en laboratoire.

CHAPITRE II

CHAPITRE II : PROPRIETES PHYSICO-ELECTRIQUES DES MATERIAUX POREUX :

2.1 Introduction :

Une des principales caractéristiques des matériaux est leur capacité ou pas à conduire le courant électrique. En effet, les matériaux sont classés par cette propriété, qui les divise en conducteurs, semi-conducteurs et non-conducteurs. Ces derniers sont souvent appelés isolateurs ou diélectriques.

Ce chapitre traite de l'application des méthodes électriques utilisées en génie civil basées principalement sur la mesure de la RE ou bien la CE, paramètres sensibles à la variation des facteurs intrinsèques (porosité, tortuosité, structure porale, etc.) et extrinsèques (température, humidité, etc.).

La première partie présente le phénomène de conduction électrique dans les milieux poreux saturés et les différents phénomènes qui entourent cette conduction, en passant par la forme la plus simple de la loi d'Ohm. La caractérisation de cette conduction se base sur la simple mesure de la CE/RE avec le dispositif à deux électrodes qui est, d'après l'étude bibliographique détaillée dans le chapitre I, le moins encombrant possible et le plus simple à utiliser.

La seconde partie se focalise sur la quantification des différents paramètres physico-chimiques des milieux poreux pouvant être déterminé électriquement ; paramètres comme : porosité, tortuosité ou encore coefficient de diffusion. L'influence des paramètres environnementaux comme la température ou bien la saturation sur la CE est également étudiée, un état de l'art détaillé vient étoffer cette partie englobant les travaux antérieurs effectués dans ce domaine.

2.2 Conduction électrique dans les matériaux poreux :

2.2.1 Introduction :

Les recherches liées aux mesures électriques sur les matériaux poreux consistent à caractériser l'opposition de la matière à l'écoulement du courant électrique, comprenant l'évaluation de plusieurs paramètres tels que : la résistance électrique, la conductivité électrique, la permittivité électrique, etc. L'utilisation de ces mesures s'est développée au cours du temps allant du simple fait de mesurer une résistance à la compression jusqu'à l'indentification de facteur difficile à quantifier tel que la tortuosité.

Les paramètres RE/CE sont importants en tant que mesure de la conduction électrique dans les matériaux poreux, celle ci est fondamentalement liée à la perméabilité des fluides et la diffusivité des ions à travers des matériaux poreux tels que le béton. Par conséquent, la CE peut également être utilisée comme une mesure indirecte de la capacité du béton à laisser

pénétrer des solutions chargées en espèces chimiques qui peuvent provoquer l'amorçage de la corrosion des armatures (Whiting et Nagi, 2003).

2.2.2 Mesure des paramètres électriques des milieux poreux :

Une multitude de théories ont été développées pour expliquer la conduction dans les milieux poreux. Ces théories peuvent être divisées en deux catégories. La première catégorie utilise les théories des matériaux composites qui sont essentiellement indépendantes de la nature physique du milieu. Ces théories tentent de prédire la CE en fonction de la CE de chaque composant. Dans la seconde approche, des relations empiriques sont établies entre la CE ou RE du matériau dans son ensemble et la CE de la phase conductrice, en ajustant les données expérimentales à des équations simples telles que de la loi d'Archie (Archie, 1942). La conduction électrique dans les matériaux tels que les bétons humides est essentiellement électrolytique (Hammond et Robson, 1955; Friedman, 2005) cela veut dire que seule la phase liquide permet de faire passer le courant électrique. En effet, dans un système diphasique (eau- solide), considérant évidemment que le milieu est complètement saturé, la conduction électrique est principalement ionique, car les particules solides elles-mêmes ne sont pas considérées comme conducteurs électriques (Sundberg, 1932; Olphen, 1977; Friedman, 2005). Le courant passe principalement par l'eau interstitielle. Cependant dans les milieux contenant de l'argile, la conduction se produit dans les pores et sur la surface des particules d'argiles chargées électriquement (Ait Saadi, 2003).

La loi d'Ohm régit la conduction électrique dans les matériaux poreux ; elle est définie comme l'intensité d'un courant électrique continu I en (A) passant à travers un élément conducteur (phase liquide d'un milieu poreux saturé). Elle est directement proportionnelle à la différence de potentiel ΔU en (V) traversant l'élément conducteur, et inversement proportionnelle à la résistance R en (Ω), de cet élément. Cette loi est décrite par la formule (2.1) (Ait Saadi, 2003; Naar, 2006; Andrade et d'Andréa, 2010; Du Plooy, Lopes et col., 2013):

$$I = \frac{\Delta U}{R} \quad (2.1)$$

Il est connu que la loi d'Ohm est applicable à la majorité des matériaux qu'ils soient solides, solutions, ou milieux poreux. Elle est valide à condition qu'il n'y ait pas d'effets dus à la mesure elle-même (réactions électrochimiques aux électrodes, génération de gaz, électrolyse dans les solutions aqueuses, flux électrocinétique qui pourrait altérer la structure du milieu poreux, la génération de chaleur, qui à son tour affecte le pouvoir conducteur du solide ou de la solution) (Ait Saadi, 2003).

Dans l'équation (2.1), R est la résistance électrique qui est fonction des propriétés géométriques du matériau (voir figure 2.1). La mesure de la résistance d'un échantillon de différentes dimensions montre que la résistance électrique est proportionnelle à la longueur (l)

et inversement proportionnelle à la section des électrodes (McCarter, Chrisp et col., 2005; Topçu, Uygunoğlu et col., 2012; Hornbostel, Larsen et col., 2013) :

$$R = RE \frac{l}{A} \quad (2.2)$$

Où :

R = résistance en ohms,

RE = résistivité en ohms.m,

l = longueur en m,

A = surface des électrodes en m².

L'équation (2.2) peut aussi être exprimée en termes de CE qui est l'inverse de la RE:

$$CE = \frac{1}{R} \cdot \frac{l}{A} \quad (2.3)$$

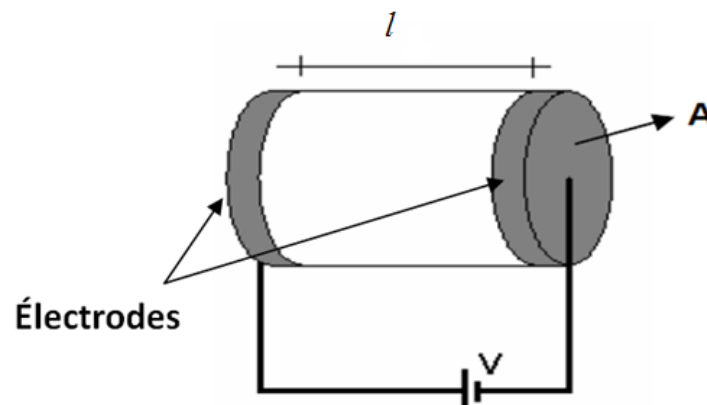


Figure 2. 1– Propriétés géométriques influençant la mesure de la résistance électrique (Rajabipour, 2003).

La conductivité de béton, est fonction de plusieurs paramètres comme la géométrie de la microstructure, la teneur en humidité de l'échantillon, et la conductivité de la solution des pores. La procédure de mesure de la conductivité d'un matériau poreux est légèrement différente lorsque des courants alternatifs (CA) sont utilisés. La forme équivalente de la loi d'Ohm pour les CA est représentée par l'équation (2.4) (Rajabipour, 2003), dans laquelle Z est l'impédance électrique et est encore une forme d'opposition à l'écoulement de l'électricité. En d'autres termes, l'impédance est la capacité d'un corps à se laisser traverser par un courant électrique (Lauer, 2004) :

$$I = \frac{U}{Z} \quad (2.4)$$

L'impédance électrique est un nombre complexe composé de composantes réelles et imaginaires. La partie réelle de l'impédance (Z') est appelée la résistance, tandis que la partie imaginaire (Z'') est appelée réactance (équation 2.5).

$$Z = Z' + iZ'' \quad (2.5)$$

Des études ont montré, dans la plus part des matériaux poreux, qu'à des fréquences inférieures à 100 kHz, l'impédance devient purement résistive et ne dépend que de la partie réelle, la partie imaginaire tend alors vers zéro ($Z'' = 0$), et donc $Z = Z' = R$. L'impédance devient alors indépendante de la fréquence et est gouvernée par la conduction ohmique (Dias, 1972; Rinaldi et Cuestas, 2002; Bezzar et Ghomari, 2009; Bezzar et Ghomari, 2013).

2.3 Paramètres influençant la conductivité électrique dans les matériaux poreux :

Dans cette partie, nous essayerons d'identifier les différents paramètres affectant la mesure de la CE ou bien la RE tels que : porosité, degré de saturation ou encore tortuosité ; mais aussi de discuter leur effets en se basant sur les données disponibles dans la littérature. Il s'agit des paramètres qui gouvernent le transport des particules dans les solutions interstitielles à travers le réseau poreux des matériaux et par conséquent influant sur leurs propriétés électriques.

2.3.1 Effet de la fréquence :

La fréquence électrique est un paramètre très important au cours d'une mesure électrique, chaque méthode de mesure agit dans un domaine de fréquence propre à elle. En ce qui concerne la mesure de la (CE/ RE), le choix du domaine de fréquence varie d'un auteur à un autre en fonction du dispositif utilisé, les matériaux étudiés mais aussi le type d'électrodes. Le tableau (2.1) illustre quelques valeurs de fréquences adoptées dans la littérature.

Tableau 2.1 Valeurs de fréquences pour la mesure de la résistivité électrique (Elkey et Sellevold, 1995) :

Référence bibliographique	Courant injecté	Fréquences	Types d'électrodes
Hammond et col., 1955	CA	0,002 – 25 kHz	Plaque en laiton
Monfore, 1968	CA (2 – 8 V)	0,1 -10 kHz	Plaque en laiton
Bhargava <i>et col.</i> , 1978	CA (0,5 à 1,5 V)	0,1 à 50 kHz	/
Woelf <i>et col.</i> , 1980	CA (6 V)	60 Hz	Tige mince
Hansson <i>et col.</i> , 1983	CC (3 à 9 V)	/	Plaque d'acier percée (3x3cm)
Hope <i>et col.</i> , 1985	CA	1 kHz	Tige en laiton ou acier
Cabrera <i>et col.</i> , 1994	CA (10 V)	/	Plaque en laiton

(Rinaldi et Cuestas, 2002) explique qu'à des fréquences < 1 kHz, le comportement électrique d'un échantillon saturé devient non linéaire. Cette non linéarité est due à un phénomène appelé polarisation des électrodes (cf. figure 2.2). Par conséquent, des mesures de conductivité électrique à des fréquences > 1 kHz ont été considérées comme indépendantes

des effets des électrodes. A cet effet, des études ont été faites dont celle de (Bezzar et Ghomari, 2009) adoptant une fréquence de 20 kHz comprise dans le domaine [5 Hz - 550 kHz].

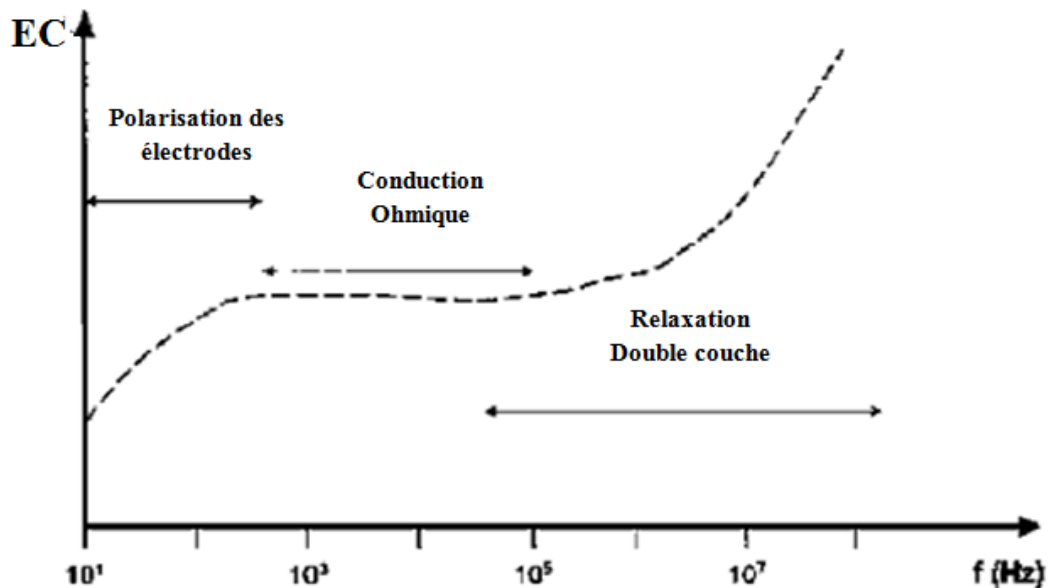


Figure 2.2 – Courbe de conductivité observée dans un sol argileux, mesurée dans une cellule à deux électrodes (Rinaldi et Cuestas, 2002).

2.3.2 Effet de la température :

Comme tout matériau poreux, les propriétés électriques du béton sont affectées par la température. Ce phénomène se complique d'avantage avec la modification de la chimie de l'eau interstitielle qui se produit en même temps que le changement de température. En effet, à des températures élevées, plusieurs ions vont se dissoudre dans l'eau des pores, puis se cristalliser à des températures basses. Dans le cas des fluides purs et des solutions ioniques, la mobilité ionique augmente avec l'augmentation de la température, cela s'explique par le fait que la solution devient moins visqueuse ; ceci concerne la majorité des milieux poreux (Ait Saadi, 2003).

Il est indiqué dans plusieurs recherches, notamment celles de (Elkey et Sellevold, 1995) qu'il y a une sensibilité des valeurs de la RE/CE d'environ 3% par degré Celsius (avec une température de référence à 21° C). La résistivité présente des valeurs importantes pour des basses températures et pour des températures plus élevées, la résistivité diminue (figures 2.3 et 2.4). Ce changement de résistivité est variable en raison de la mobilité des électrons à des températures différentes. Lorsque la température augmente, les électrons se déplacent plus vite provoquant plus grande conductivité électrique, réduisant ainsi la résistivité (Sengul, 2014).

Par ailleurs, on trouve dans les recherches de (Corwin et Lesch, 2005) que la conductivité électrique de la solution électrolytique augmente à un taux d'environ 1,9% par ° C (avec une température de référence de 25° C). Les travaux menés par (Chang, Song et col., 2013)

confirment également cette tendance ; la RE décroît avec la hausse de température et inversement pour la CE.

La conductivité électrique mesurée à une température (T_e) donnée (en ° C), peut être ajustée à une conductivité de référence à 25° C, notée (CE_{25}), en utilisant les équations 2.6 et 2.7 (Corwin et Lesch, 2005) :

$$CE_{25} = \alpha \cdot CE_{T_e} \quad (2.6)$$

Où α est un facteur de compensation de température qui peut être approximé par la relation :

$$\alpha = 0,4470 + 1,4034 \cdot e^{-T_e/26.815} \quad (2.7)$$

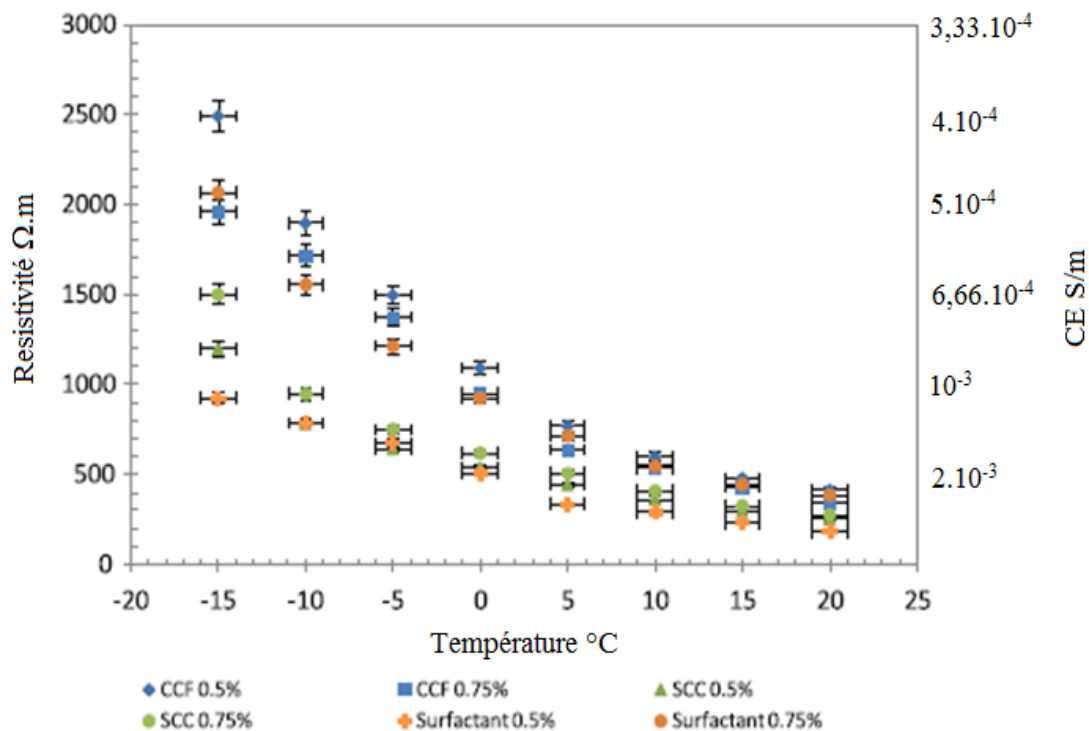


Figure 2.3 – Résistivité électrique en fonction de la température pour différentes compositions de béton (Chang, Song et col. 2013).

La valeur de α pour le béton dans les deux états saturés et partiellement saturés est égale à $0,035^{\circ} C^{-1}$. (McCarter, Chrisp et col., 2005) ont proposé pour compenser cet effet de variation de température, en rapportant les mesures de conductivité en béton à une conductivité équivalente à une température de référence prédéfinie (20° C pour McCarter), l'application d'une formule de correction de température. L'équation 2.8, qui est applicable aux solutions électrolytiques, a été utilisée pour quantifier l'effet de la température sur la conductivité du béton :

$$CE_{ref} = \frac{CE_{T_e}}{[1 + \alpha(T_e - T_{e_{ref}})]} \quad (2.8)$$

Où CE_{ref} est la conductivité de l'échantillon à la température de référence et CE_{Te} est la conductivité mesurée à la température Te .

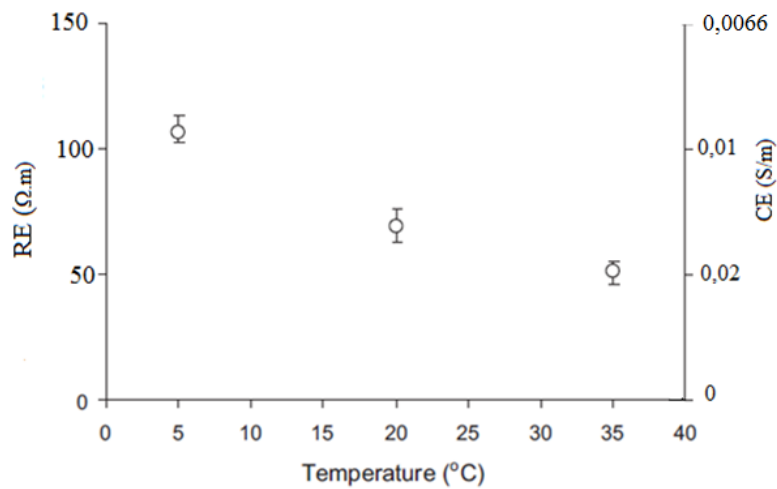


Figure 2.4 – Influence de la température sur la RE/CE (Sengul, 2014).

(Ait Saadi, 2003) préfère raisonner en terme de résistivité électrique et propose que la résistivité RE_{Te} d'un milieu poreux à la température Te (°C) peut être reliée à une résistivité électrique RE_{ref} standard mesurée à 18° C (température de référence) par l'équation 2.9 :

$$RE_{Te} = \frac{RE_{ref}}{1 + \alpha(t - 18)} \quad (2.9)$$

Où α est un paramètre empirique qui est approximativement égal à $0,025^{\circ} C^{-1}$.

Toutefois, la conformité de ces études suggère que ce phénomène de température est indépendant des autres aspects du béton, telle que la porosité. Il serait plus utile de comparer les effets de la température sur la RE du béton et sur la même solution ionique dans les pores de ce béton.

2.3.3 Effet de la porosité :

La conduction du courant électrique dans le béton est électrolytique, cela veut dire que le courant circule uniquement à travers le liquide des pores interconnectés, les particules solides sont des corps inertes (Polder, Andrade et col. 2000). Nous rappelons cependant, que s'il y'a présence de particules argileuses, la conduction se produit dans les pores et sur la surface des particules d'argiles, chargées électriquement (Ait Saadi, 2003).

La conduction dépend donc de la porosité efficace du matériau. En effet, il convient de différencier entre la porosité totale qui est le rapport entre le volume total des vides et le volume total du matériau et la porosité efficace qui est plutôt le rapport entre le volume total des vides communicants et le volume total du matériau. Cette dernière pouvant être inférieure à sa précédente en raison de la non connectivité de tous les pores.

La porosité représente l'une des caractéristiques principales qui influent sur la conductivité électrique des matériaux poreux. Par exemple, pour un matériau poreux saturé, plus la

porosité efficace est élevée, plus la résistivité électrique est basse et par opposition la conductivité est élevée (Gu, Xu et col., 1993).

(Basheer et Nolan, 2001) ont constaté que la porosité au niveau de la couche de surface du béton représente un moyen de pénétration de différents agents et liquides agressifs qui peuvent causer la détérioration du béton armé (figure 2.5).

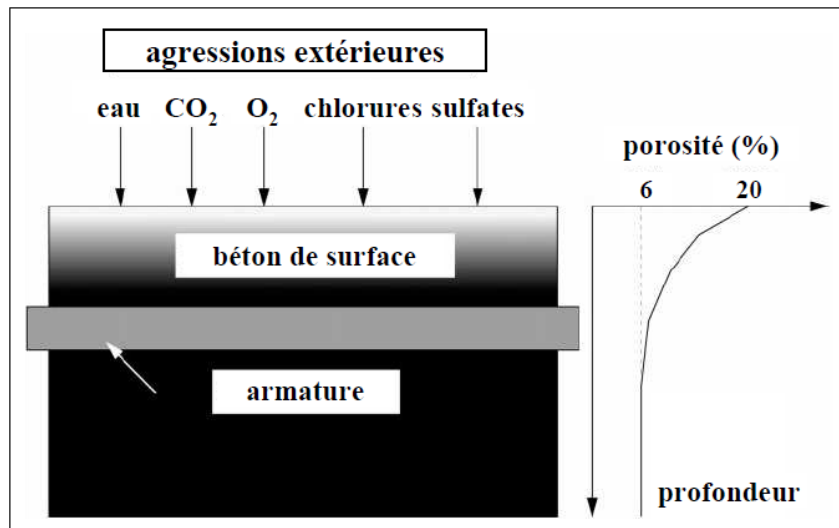


Figure 2.5 – Pénétration de substances agressives extérieures (Basheer et Nolan, 2001; Naar, 2006).

Plusieurs chercheurs se sont intéressés à la relation qui existe entre la porosité et la conductivité électrique du matériau (Archie, 1942; Tumidajski, Schumacher et col., 1996; Robinson et Friedman, 2005). Des modèles ont été développés reliant ces deux grandeurs, initialement développés pour les roches sédimentaires ; mais peuvent aussi être appliqués à tous les types de roches et autres matériaux cimentaires. En général, la relation de conduction dans les matériaux poreux est décrite par la loi empirique d'Archie (1942). Dans le cas d'un matériau totalement saturé, la formule d'Archie peut s'écrire de manière plus simplifiée (Friedman, 2005; Han, Best et col., 2015):

$$\frac{CE}{CE_0} = \frac{1}{F} = \phi^m \quad (2.10)$$

Où : CE est la conductivité électrique apparente du milieu poreux, CE₀ la conductivité électrique de la solution interstitielle présente dans les pores, le facteur F est dit facteur de formation qui représente l'effet de la microstructure localisée sur la conductivité électrique du matériau, et est égal au rapport de la conductivité de la solution interstitielle sur la conductivité électrique apparente, ϕ est porosité du milieu, m est le facteur de cimentation ou facteur de porosité appelé aussi exposant d'Archie, qui varie en fonction du milieu (tableau 2.2).

Tableau 2.2 Exposants Archie (m) de différents milieux poreux présentés dans la littérature (Friedman, 2005).

Milieu poreux	porosité	m	Auteurs
Sable propre	0,12 – 0,35	1,3	Archie, 1942
Grès consolidés	0,12 – 0,4	1,8 – 2	
Bille de verre	0,37 – 0,40	1,38	Wyllie et Gregory, 1955
Mélanges binaires de billes	0,147 – 0,29	1,31	
Cylindres	0,33 – 0,43	1,47	
Disques	0,34 – 0,45	1,46	
Cubes	0,19 – 0,43	1,47	
Prismes	0,36 – 0,52	1,63	
Sables marins	0,35 – 0,50	1,39–1,58	
Billes de verre	0,33 – 0,37	1,20	
Sable de quartz	0,32 – 0,44	1,43	
Sable de quartz roulé	0,36 – 0,44	1,40	
Sable schisteux	0,41 – 0,48	1,52	
Billes de verre fondu	0,02 – 0,38	1,50	Sen et col., 1981
Billes de verre fondu	0,1 – 0,4	1,7	Schwartz et Kimminau, 1987
Grès	0,05 – 0,22	1,9–3,7	Doyen, 1988
Billes de verre poly-dispersées	0,13 – 0,4	1,28–1,40	de Kuijper et col., 1996
Billes de verre fondu	0,1 – 0,3	1,6–1,8	Pengra et Wong, 1999
Grès	0,07 – 0,22	1,6–2,0	
Calcaires	0,15 – 0,29	1,9–2,3	
Tuf bulgare altéré	0,15 – 0,39	2,4–3,3	Revil et col., 2002
Tuf mexicain altéré	0,5	4,4	
Billes de verre	0,38–0,40	1,35	Friedman et Robinson, 2002
Sable de quartz	0,40–0,44	1,45	
Particules de tuf	0,60–0,64	1,66	

L'influence de la porosité sur ce paramètre électrique (CE/RE) a été expliquée par (Marquis 2002) figure (2.6). Cette figure montre l'influence de la porosité sur la résistivité ou bien la CE, pour une roche saturée en eau douce, pour différentes valeurs de m . Il a été remarqué que pour une porosité comprise entre 0 et 50 %, plus m est élevé, plus la RE est réduite.

Une autre forme de la loi d'Archie est connue et utilisée par plusieurs chercheurs (Ait Saadi, 2003; Naar, 2006; Khalil et Santos, 2009), celle-ci intégrant une autre constante a qui est un paramètre de lithologie, associé au milieu poreux ; sa valeur tourne généralement autour de 1.

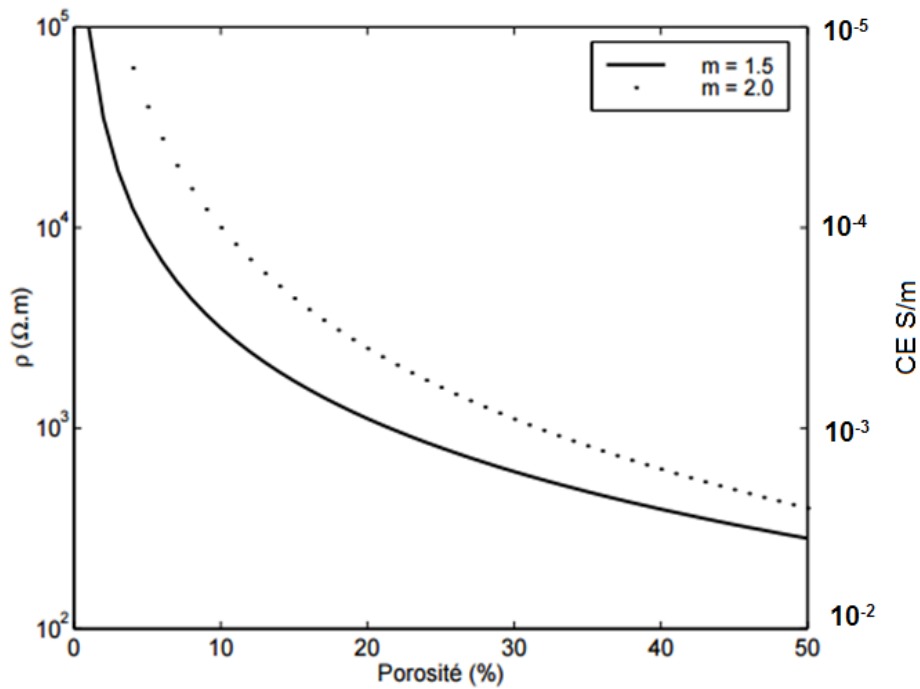


Figure 2.6 – Influence de la porosité sur la RE / CE (Marquis, 2002).

Le (tableau 2.3) englobe quelques valeurs des constantes a et m , recueillies de la littérature. Cette forme de l'équation d'Archie s'écrit comme suit :

$$\frac{1}{F} = \frac{CE}{CE_0} a \cdot \phi^m \quad (2.11)$$

Où : CE est la conductivité électrique du matériau saturé, CE_0 est la conductivité électrique du fluide contenu dans les pores. L'équation (2.11) est appelée première loi de Archie, qui n'est valable que dans les milieux totalement saturés. Lorsque le support n'est pas complètement saturé, cette relation est appelée seconde loi d'Archie et s'écrit sous la forme suivante (Naar, 2006; Khalil et Santos, 2009):

$$\frac{1}{F} = \frac{CE}{CE_0} a \cdot \phi^m \cdot S^n \quad (2.12)$$

S est le degré de saturation d'un milieu et n est l'indice de saturation (généralement égal à 2). La CE/RE d'un milieu saturé est donc sensible à la porosité, à la CE/RE du fluide interstitiel, aux caractéristiques du solide et à la structure des pores.

L'emploi de cette formule d'Archie pour les matériaux à base de ciment, en particulier pour les bétons, a pu être validé par (Naar, 2006). Dans le cas où la CE du fluide varie entre 3,7 et 33 S/m, a varie de 0.1 à 0.8 (Snyder, Feng et col., 2003). En ce qui concerne le béton, $a = 0,028$ et m prend des valeurs > 3 , et peut aller jusqu'à 4,6 (Naar, 2006; Dauzères, 2010) ; le facteur n est généralement ≈ 2 .

Un autre modèle de mesure se basant sur la conductivité électrique, théorie de Katz-Thomson, applicable aux matériaux cimentaires, relie le facteur de formation aux propriétés physiques des matériaux poreux. Ce modèle permet la prédiction de la porosité du milieu poreux à partir de l'essai d'intrusion au mercure (El-Dieb et Hooton, 1994; Nokken et Hooton, 2008), l'expression de Katz-Thomson est écrite comme suit :

$$\frac{1}{F} = \frac{d_{max}^e}{d_c} \phi \cdot S(d_{max}^e) \quad (2.13)$$

Où :

d_c : dimension caractéristique de la taille des pores, (diamètre critique des pores).

$d_{max}^e = 0.34 d_c$

$S(d_{max}^e)$ est la fraction du volume poreux interconnecté de diamètres supérieurs à d_{max}^e

Tableau 2.3 Valeurs publiées des constantes d'Archie (a) et (m) selon (Khalil et Santos, 2009).

Lithologie	a	m	auteurs
Sables	0,47 – 1,8	1,64 – 2,23	Hill et Milburn, 1956
	0,62 – 1,65	1,3 – 2,15	Carothers, 1968
	1 – 4	0,57 – 1,85	Porter et Carothers, 1970
	0,48 – 4,31	1,2 – 2,21	Timur et col., 1972
	0,004 – 17,7	0,02 – 5,67	Gomez – Rivero, 1977
Carbonates	0,73 – 2,3	1,64 – 2,1	Hill et Milburn, 1956
	0,45 – 1,25	1,78 – 2,38	Carothers, 1968
	0,33 – 78	0,39 – 2,63	Gomez – Rivero, 1977
	0,35 – 0,8	1,7 – 2,3	Schon, 1983

2.3.4 Effet de la concentration des chlorures :

L'eau contenue dans les pores, constitue l'un des chemins les plus importants du courant électrique dans un système poreux saturé. Ainsi, la conductivité du milieu poreux est dépendante de celle de la solution présente à l'intérieur des pores de ce système. Plus la conductivité de l'eau des pores est élevée, plus la conductivité du système est importante

aussi. La conductivité du fluide des pores dépend du type du fluide, de la nature de l'espèce chimique, de sa concentration, et de la température (Ait Saadi, 2003; Friedman, 2005).

La figure 2.7, met en évidence la relation linéaire de la concentration des chlorures sur la conductivité électrique d'une solution. En effet, plus la concentration est importante et plus les conduction sont élevées. D'autre part, la mobilité des ions dans une solution augmente avec la hausse de la température, qui augmente aussi la conductivité de la solution.

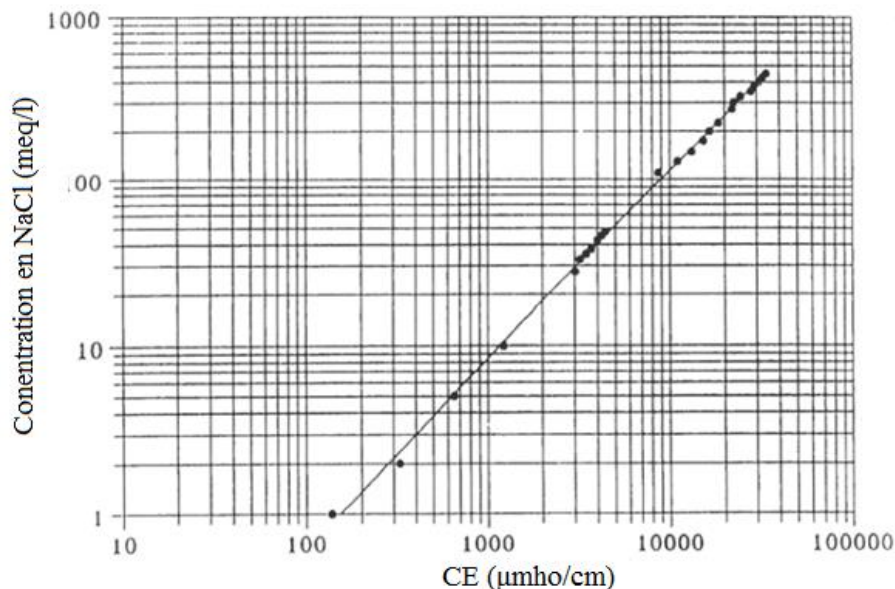


Figure 2. 7 – Concentration en NaCl en fonction de la conductivité de la solution (Ait Saadi, 2003).

La conductivité électrique d'une solution est fortement liée à sa concentration en ions, puisque la charge des ions en solution facilite la conductance d'un courant électrique. Ceci n'est par contre valable que pour des mesures de CE effectuées sur des échantillons contenant une seule espèce chimique (Radiometer Analytical SAS, 2004).

Lorsqu'on utilise la mesure de la conductivité pour déterminer la concentration, il est important de travailler à température constante. La figure 2.8, représente l'évolution de la résistance électrique en fonction de la teneur en nitrate de potassium sous l'effet de la température ; on note que plus la teneur en potassium est élevée et plus la résistance électrique est faible, de même pour la RE (cf. équation 2.2). L'effet de la température est aussi notable puisque plus la température augmente et plus la résistance diminue.

L'intrusion des chlorures constitue la cause majeure de la corrosion des armatures dans les ouvrages en béton armé. L'influence des de ces chlorures sur la résistivité électrique du béton est donc capitale (Živica, 2000; Poupard, Ait-Mokhtar et col., 2004). (Elkey et Sellevold, 1995) ont étudié les additions des chlorures de calcium (CaCl_2) dans l'eau de gâchage et l'influence des ses chlorures sur la résistivité électrique. La figure 2.9 montre la relation entre le pourcentage de chlorures ajouté à l'eau de gâchage et le pourcentage de variation de la résistivité électrique des matériaux cimentaires.

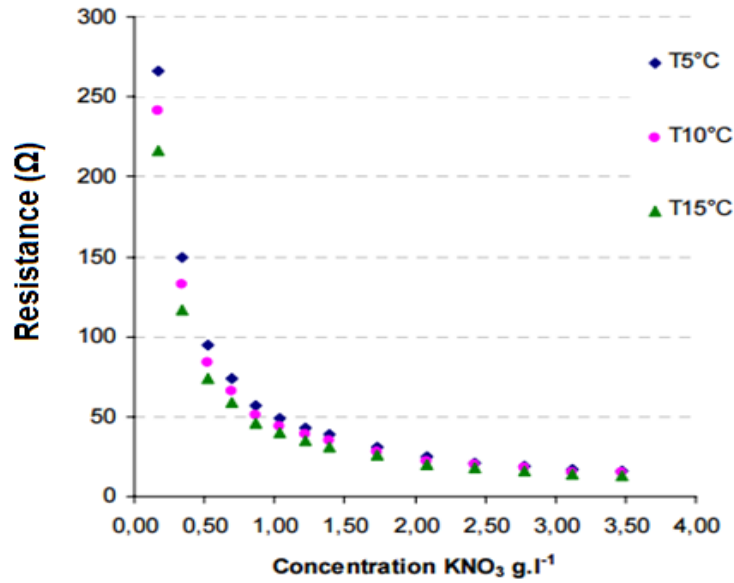


Figure 2.8 – Evolution des résistances en fonction de la concentration pour 3 températures 5, 10 et 15°C (Besson, Cousin et col.).

Il est montré aussi que la résistivité électrique diminue rapidement à de faibles concentrations et semble se stabiliser à environ 50 à 60% de sa valeur initiale. Cela signifie qu'après un certain niveau de chlorures atteint dans l'eau interstitielle, les chlorures supplémentaires n'augmentent plus la concentration ionique totale.

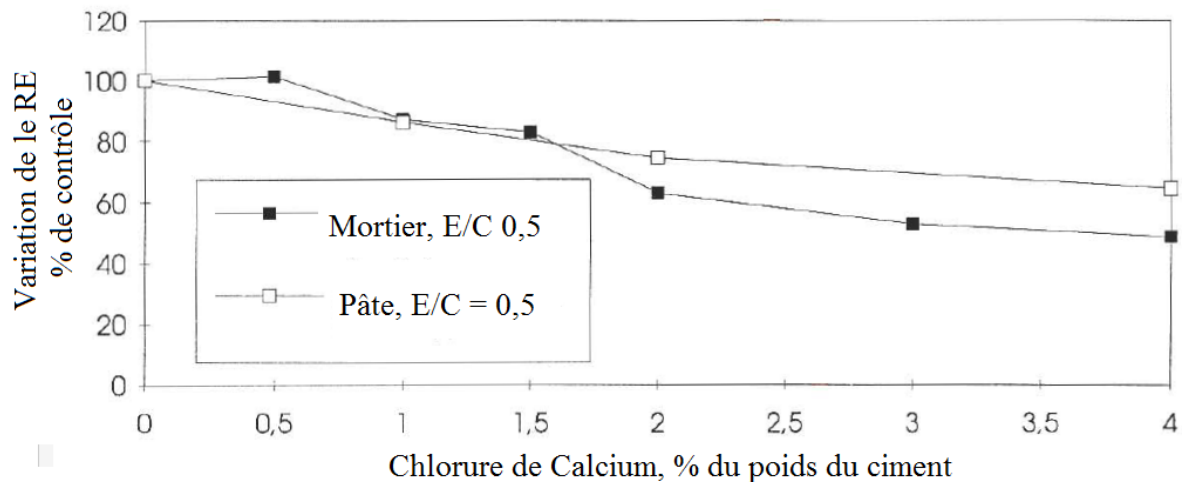


Figure 2.9 – Influence des chlorures ajoutés à l'eau de gâchage sur la résistivité électrique de matériaux cimentaires saturés (Elkey et Sellevold, 1995).

Des études sur l'effet de la concentration des chlorure de sodium NaCl sur la résistivité électrique des bétons a été étudié notamment par (Henry, 1964; Hunkeler, 1996) cités dans les travaux de (Whiting et Nagi, 2003) où un béton avec un rapport E/C de 0,44 a été testé. Les chlorures de sodium ont été ajouté à l'eau de gâchage en prenant quatre différentes concentrations allant de 0 à 31,3 g / kg.

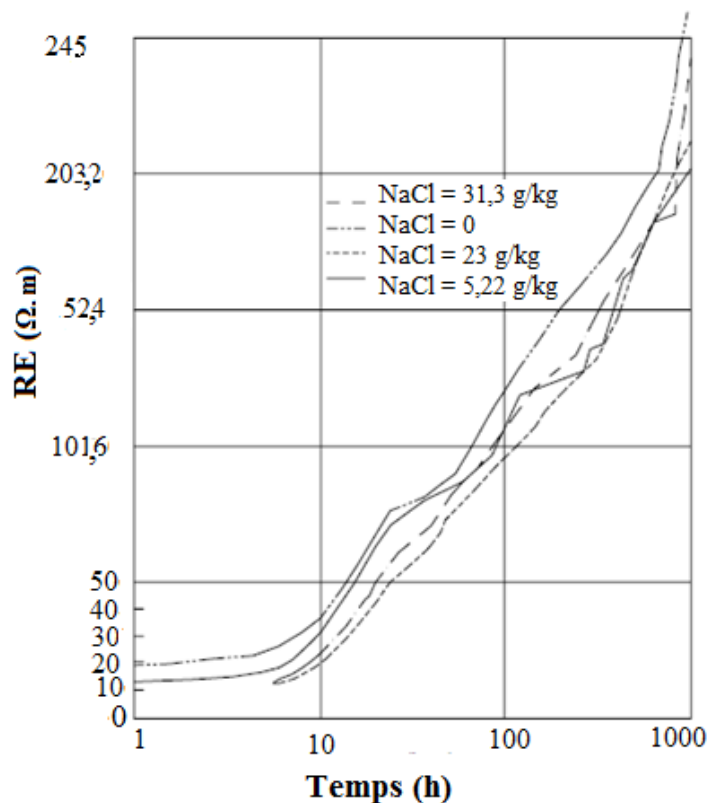


Figure 2.10 – Effet du NaCl sur la résistivité du béton (Whiting et Nagi, 2003).

La figure 2.10 illustre cette influence sur le béton puisqu'il a été constaté que le béton sans chlorures a la résistivité électrique la plus élevée au cours de la période d'essai. En revanche, les différences entre les autres bétons avec addition n'étaient pas très importantes i.e. une addition de chlorure de 0,45% réduit la résistivité du béton de 27% (Whiting et Nagi, 2003).

L'effet du chlorure de calcium sur la résistivité électrique sur de la pâte de ciment est également rapporté par (Whiting et Nagi, 2003) avec un rapport E/C de 0,5. La valeur de la résistivité électrique a diminué de 7,7 à 5,70 $\Omega.m$ avec une augmentation de la concentration de chlorure de calcium de 1 à 4% de la masse de ciment. À l'âge de 28 jours, cette résistivité diminuait de 9,1 à 6,90 $\Omega.m$ pour la même augmentation de la concentration en chlorure.

Tableau 2.4 Relations entre CE et concentration en sel, tirées de la littérature

Relation CE/RE vs. Concentration en sel	Auteurs
$RE = 41,934 \cdot e^{\left(-4,964 \frac{\phi \cdot C_s}{a_w}\right)}$	Zhang, Cao et col., 2014
$C_{Cl^-} (mmol/l) = -1,71 + 11,45 C \cdot E$ (à 25° C)	Castellote, Andrade et col., 2001
$CE = E \cdot C_0 + \sum c_i \cdot \lambda_i$ λ_i : Conductivité équivalent de l'ion i	Vedalakshmi, Devi et col., 2008
$C (NaCl) = 6,9 \cdot C \cdot E_0^{1.12} g/l$	Blewett, McCarter et col., 2003
$C = 2,491 C \cdot E^3 + 0,3846 C \cdot E^2 + 17,75C \cdot E - 9,7213$	Bezzar et Ghomari, 2009

Le tableau 2.4 met en revue, quelques relations empiriques trouvées dans la littérature, corrélant la CE/RE à la concentration des sels présente dans différents milieux poreux. (Castellote, Andrade et col., 2001) se sont basés sur la relation entre la concentration et la CE/RE dans l'évaluation de la diffusion des chlorures sur les bétons. (Blewett, McCarter et col., 2003) utilise leur relation pour mesurer la CE afin de suivre le mouvement ionique des espèces chimiques à travers les argiles saturés et d'identifier la quantité de chlorure (NaCl) présente dans les solutions interstitielles. (Vedalakshmi, Devi et col., 2008) déterminent la CE dans les matériaux cimentaires. (Bezzar et Ghomari, 2009) font le suivi du profil de concentration des solutions électrolytiques diffusant à travers les revêtements argileux des centres d'enfouissement technique et enfin (Zhang, Cao et col., 2014) étudient l'effet des sels sur les ciments de stabilisation des argiles en incluant l'effet de la porosité et du pourcentage de ciment.

2.3.5 Effet du degré de saturation :

De toutes les variables ayant une influence sur la résistivité électrique ou la CE des matériaux poreux, la saturation en eau est de loin celle ayant la plus grande incidence. Comme l'eau interstitielle agit comme un électrolyte à résistivité inférieure à celle de la matrice solide, la saturation est en soi un facteur majeur affectant les propriétés électriques du béton.

La figure 2.11 montre cette incidence sur les valeurs de la RE et la CE (puisque qu'elles sont proportionnelles à un facteur géométrique près). Il est constaté que plus la teneur en eau du béton augmente, plus la facilité de circulation du courant est meilleur ce qui offre donc une CE plus importante. En contrepartie, la résistance électrique du béton diminue et par conséquent la résistivité est plus faible (Whiting and Nagi 2003).

Dans un autre travail consacré à la mesure de la RE du béton, élaboré par (Whiting et Nagi, 2003), il est indiqué que la valeur de la conductivité est négligeable et presque égal à zéro à une saturation avoisinant les 40% même si la pâte cimentaire contient encore une quantité d'eau significative. Cette eau est essentiellement non conductrice et ne participe en aucun cas à la conduction électrique. Ceci est probablement dû à des forces de surface qui rendent les ions dissous dans l'eau interstitielle immobiles.

Le travail de (Sengul, 2014) a montré que la RE pour un béton ordinaire diminuait de 4% pour un degré de saturation évoluant de 90 à 100%. En général, et quel que soit le rapport E/C, l'augmentation du degré de saturation entraîne une diminution de la résistivité électrique.

Une relation empirique existe entre la résistivité électrique RE d'un milieu non saturé et celle d'un milieu saturé ; cette relation s'écrit comme suit (McNeill, 1990; Ait Saadi, 2003) :

$$\frac{RE}{RE_{sat}} = S^{-B} \quad (2.14)$$

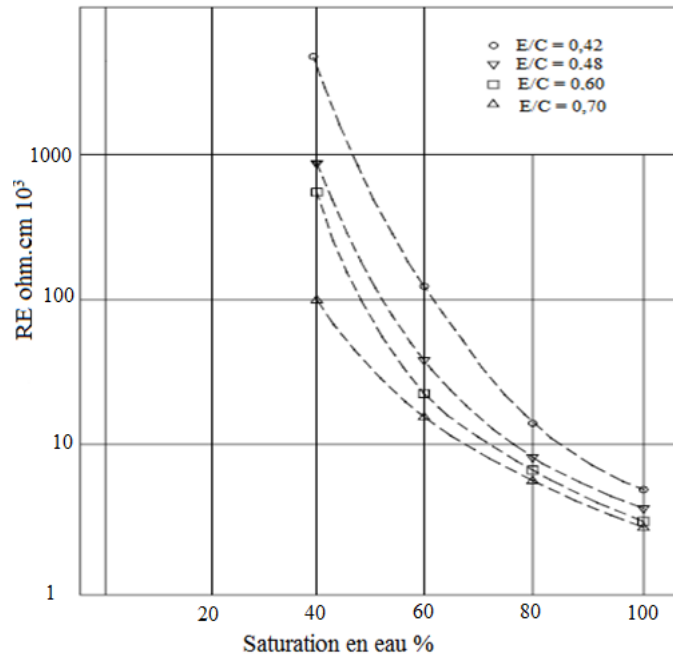


Figure 2.11 – Effet de la saturation sur la résistivité électrique du béton (Whiting and Nagi 2003).

Où S_r est le degré de saturation et B un paramètre empirique. Il est clair, vu l'équation (2.14), qu'une éventuelle augmentation du degré de saturation réduit considérablement la valeur de la résistivité. Cette équation est valable au moment où le degré de saturation est au-dessus de la valeur critique S_{cr} , qui correspond à la quantité minimale d'eau requise pour maintenir un film d'eau continu autour des particules solides (Ait Saadi, 2003).

La figure 2.12 présente l'influence de l'état humide du béton sur la résistivité électrique. Il est montré que, le béton à l'état sec a une résistivité quatre fois plus élevée par rapport à l'état saturé. Étant donné que le courant électrique est transporté par des ions circulant à travers la solution interstitielle du béton, la teneur en eau plus élevée facilite l'écoulement électrique et diminue par conséquent, la résistivité électrique observée (Sengul, 2014).

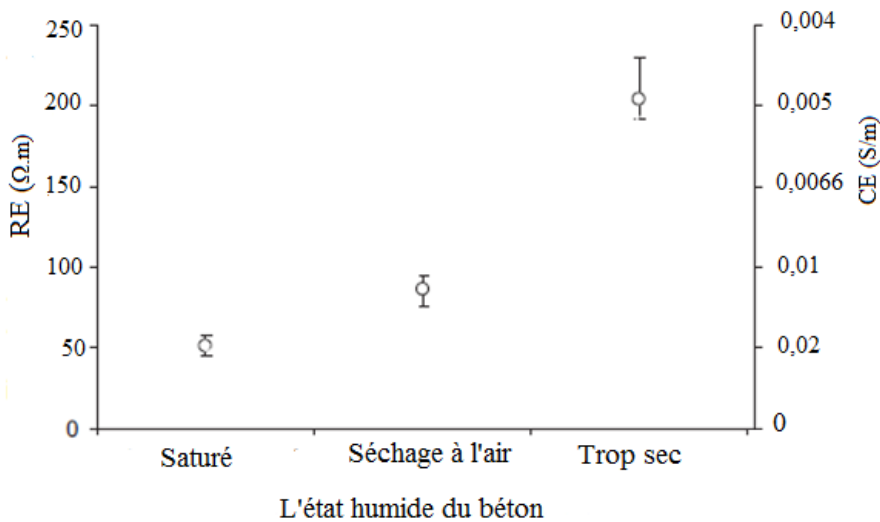


Figure 2.12 – Effet des conditions d'humidité sur la RE/CE (Sengul, 2014).

2.2.6 Effet du rapport Eau/Ciment :

Le rapport E/C dans le béton est un paramètre crucial dans la configuration de la structure porale d'un béton durci. Un rapport E/C élevé offre une structure porale grossière et continue qui permet une facilité de transfert des solutions et donc d'avoir une CE importante par rapport à un matériau avec un E/C moins important. La figure 2.13, montre que l'augmentation du rapport E/C entraîne une diminution de la résistivité électrique et par conséquent une augmentation de la CE (Elkey et Sellevold, 1995). M m³

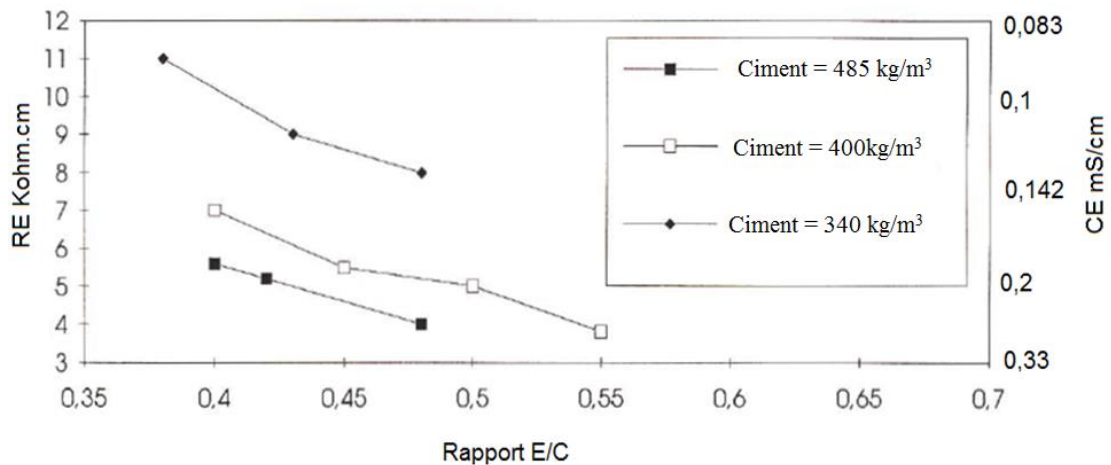


Figure 2.13 – Influence du rapport E/C sur les résistivités électriques de matériaux cimentaires saturés (Elkey et Sellevold, 1995).

La RE est fortement influencée par le rapport E/C. Il est montré que la résistivité augmente quand le rapport E/C diminue : une pate 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. La figure 2.14 présente clairement cette influence du rapport E/C sur la RE (Naar, 2006) ; pour des rapports E/C supérieurs à 0,6 les valeurs de la RE deviennent négligeable et tendent vers zéro.

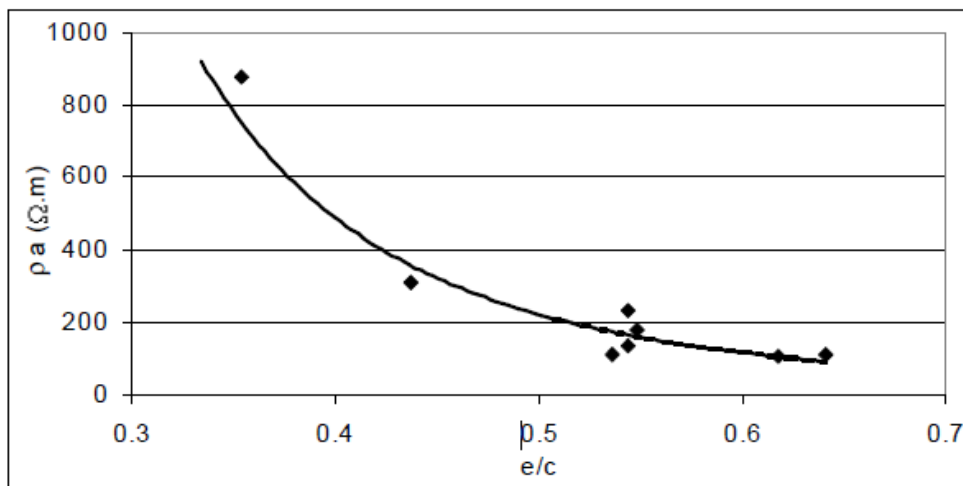


Figure 2.14 – Influence mesurée du rapport E/C sur la résistivité apparente du béton (Naar, 2006).

2.2.7 Effet de la tortuosité :

Les milieux poreux constituent une large classe de systèmes complexes. Leur espace poral est très complexe, avec des tailles de pores qui varient dans un large éventail. Mais ce qui rend les milieux poreux particulièrement complexes, c'est que les chemins qu'ils fournissent -pour l'écoulement des fluides- ne sont pas droits, mais tortueux et sinueux. Une particule doit souvent traverser un chemin qui est plusieurs fois plus long que la ligne droite entre sa source d'origine et sa destination.

Dans la littérature, la tortuosité a été définie comme étant un paramètre géométrique lié à des propriétés hydrauliques, électriques ou diffusives (Scheidegger, 1974; Sahimi, 1993; Clennell, 1997; Matyka et col., 2008). Ce paramètre purement géométrique adimensionnel important, influe sur le transfert des particules dans un milieu poreux. Le concept de la tortuosité est généralement présenté comme une sorte de facteur influençant les mouvements de transport macroscopiques pour tenir compte des chemins de transport complexes en milieux poreux et pour caractériser la structure de ces milieux.

La littérature comprend une multitude de travaux concernant l'emploi ou la détermination de la tortuosité dans les milieux poreux. (Piekaar et Clarenburg, 1967) ont utilisé une analyse géométrique pour estimer la tortuosité dans les milieux poreux fibreux, leur modèle proposé prévoit une augmentation de la tortuosité avec une porosité croissante. (Bo-Ming et Jian-Hua, 2004) et (Mei-Juan et col., 2005) ont employé une analyse géométrique 2D pour estimer la tortuosité du chemin d'écoulement dans un milieu poreux avec des particules sphériques et carrés. Une méthode expérimentale, utilisant des mesures de chute de pression à travers un lit de particules parallélépipédiques, a été utilisée par (Comiti et Renaud, 1989) pour déterminer le paramètre tortuosité. (Fellah, 2006) a proposé une méthode de réflexion ultrasonique permettant de mesurer la porosité et la tortuosité des milieux poreux. Des mesures de résistance électrique ont également été utilisés pour déterminer la tortuosité de quelques matériaux poreux comme la porcelaine, les billes de verre ou encore le grès (Garrouch et col., 2001). (Toma Dakis et Sotirchos, 1993) ont utilisé les résultats de la simulation du mouvement aléatoire pour déterminer la tortuosité en fonction de la porosité, principe qui a été utilisé par la suite par (Tomadakis et Robertson, 2005) pour obtenir l'expression de la tortuosité visqueuse du milieu poreux fibreux.

Il existe différentes notions et définitions de la tortuosité connues dans la littérature relatives au transport des solutions en milieu poreux : géométrique, hydraulique, électrique et de diffusion (Van Brakel et Heertjes, 1974; Shackelford, 1991; Shackelford et Daniel, 1991; Saripalli, Serne et col., 2002; Blewett, McCarter et col., 2003; Hudson et Aharonson, 2008; Vedalakshmi, Devi et col., 2008; Promentilla, Sugiyama et col., 2009; Vallabh, Banks-Lee et col., 2010; Lane, 2011; Bezzar et Ghomari, 2013; Ghanbarian, Hunt et col., 2013; Shackelford et Moore, 2013). Il est nécessaire d'utiliser la tortuosité avec prudence est parce que la définition exacte peut changer en fonction de l'application, et de la méthode utilisée pour la détermination de ce paramètre.

D'après (Adler, 2013; Ghanbarian, Hunt et col., 2013; Shackelford et Moore, 2013) le terme tortuosité (Λ) est donné par le rapport de la longueur (L_s) de la ligne droite macroscopique entre deux points (A et B) définissant le trajet d'un écoulement à travers un échantillon donné, et (L_g) la distance réelle géométriquement parcourue lors de cet écoulement, par la solution entre les mêmes points (figure 2.15-b). Ce rapport est défini par l'équation (2.15) :

$$\Lambda = \frac{L_s}{L_g} \quad (2.15)$$

Avec $0 \leq \Lambda \leq 1$

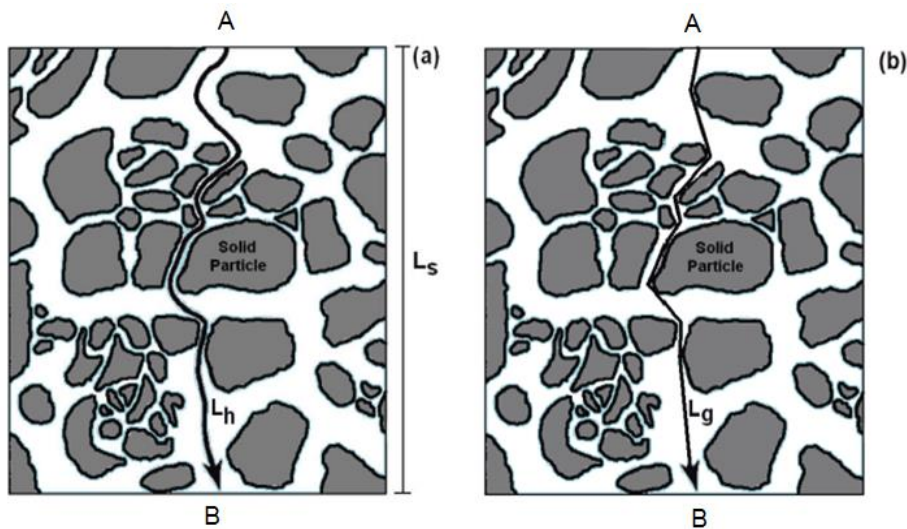


Figure 2.15 – Différents chemins d'écoulement tortueux dans un milieu poreux saturé (Ghanbarian, Hunt et col., 2013).

La figure 2.15 illustre les formes de longueurs d'écoulement dans un milieu poreux avec L_g qui représente la longueur géométrique de l'écoulement et qui suit des lignes droites et L_h qui représente la longueur hydraulique de cet écoulement ($L_h > L_g$). Dans d'autres travaux, on trouve que cette tortuosité est définie comme l'inverse de l'équation (2.15), c.à.d. le rapport du trajet d'écoulement effectif de la longueur moyenne L_g , sur l'épaisseur du milieu poreux L_s dans la direction de l'écoulement macroscopique ; et donc $\Lambda \geq 1$. (Piekaar et Clarenburg 1967; Koponen, Kataja et col., 1998; Vallabh, Banks-Lee et col., 2010; Lane, 2011; Ghanbarian, Hunt et col., 2013).

Une autre forme de tortuosité existe dans la littérature, présentée par (Clennell, 1997; Lane, 2011; Ghanbarian, Hunt et col., 2013) et qui est la tortuosité hydraulique. Elle représente le carré du rapport de la longueur hydraulique (L_h effective) sur la longueur apparente L_s (équation 2.16)

$$T_h = \left(\frac{L_h}{L_s} \right)^2 \quad (2.16)$$

Dans certains travaux (Van Brakel et Heertjes, 1974; Hudson et Aharonson, 2008; Vedalakshmi, Devi et col., 2008; Promentilla, Sugiyama et col., 2009; Shackelford et Moore,

2013), cette tortuosité sera appelée facteur de tortuosité T_m qui a une valeur supérieure à l'unité, ($\infty \geq T_m \geq 1$). Cette tortuosité a été utilisée par exemple par (Lane, 2011) pour prédire la perméabilité dans un milieu poreux en prenant une valeur de $(\sqrt{2})$; mais aussi des valeurs comprise entre 1,41 et 1,58. La valeur de $\sqrt{2}$ a été adoptée également par (Piekaar et Clarenburg, 1967) pour des mesures électriques réalisées sur des milieux fibreux.

(Pisani, 2011) a trouvé des tortuosités comprises entre 1 et 3 pour des matériaux de porosités comprises entre 0,4 et 0,7. (Umnova, Attenborough et col., 2005) ont évalué cette tortuosité entre 1,03 et 1,81 pour des porosités qui varient dans l'intervalle 0,38 à 0,93, en utilisant une méthode acoustique sur des matériaux poreux rigidifiés avec des fibres.

Lors d'une mesure électrique basée sur la circulation d'un courant électrique à travers un milieu poreux saturé, on parle de tortuosité électrique qui d'après (Tindall, Kunkel et col., 1999; Wong 1999; Ghanbarian, Hunt et col., 2013; Saomoto et Katagiri, 2015), représente le carré de la longueur moyenne du chemin électrique sur L_s , ayant des valeurs comprises entre 1 et 1,5.

Une compréhension de la relation entre la tortuosité hydraulique et électrique d'un matériau poreux est relativement difficile à identifier. Certains auteurs attestent que la tortuosité électrique et hydraulique sont équivalentes (Wyllie et Spangler, 1952; Zhan, Schwartz et col., 2010). Cependant, d'autres chercheurs comme (Suman et Ruth, 1993; Saomoto et Katagiri, 2015) réfutent complètement cette théorie et affirment que les deux tortuosités ne sont pas semblables ; mais plutôt reliées par un facteur empirique. (Saomoto et Katagiri, 2015) ont pu estimer ce facteur à une valeur inférieure à 1,2 pour des porosités $\geq 0,5$. (Ghanbarian, Hunt et col., 2013) ont qualifié ces deux tortuosités comme étant équivalentes, suite aux résultats trouvés à partir de mesures électriques utilisant le pont de Wheatstone. Les valeurs des tortuosités hydraulique et électrique étaient relativement équivalentes et avaient des valeurs comprises entre 1,25 et 1,5. On parle aussi de tortuosité diffusive dans le domaine de diffusion des solutions électrolytiques à travers les milieux poreux ; cette tortuosité est exprimée géométriquement comme étant le carré de la longueur du chemin de diffusion d'une espèce chimique rapportée à L_s . D'après (Ghanbarian, Hunt et col., 2013; Saomoto et Katagiri, 2015) cette tortuosité est plus ou moins égale à la tortuosité électrique définie précédemment.

La tortuosité diffusive est parfois définie comme le rapport du coefficient de diffusion d'une espèce chimique dans une solution libre D_0 sur le coefficient de diffusion effectif D^* de la même espèce chimique dans un milieu poreux. Ce rapport représente le facteur de formation F (Ghanbarian, Hunt et col., 2013; Shackelford et Moore, 2013). Dans d'autres travaux, cette tortuosité est reliée au facteur de formation en incluant l'effet de la porosité (Bear et Bachmat, 1991; Dormieux et Lemarchand, 2000; Saripalli, Serne et col., 2002; Shackelford et Moore, 2013) ; toutefois, on parle de coefficient de diffusion apparent du milieu poreux D_i .

D'après la littérature, lorsqu'on parle de tortuosité hydraulique, électrique ou bien diffusive on parle à priori de la même tortuosité que nous noterons T_m qui a des valeurs supérieures à l'unité. (Shackelford et Moore, 2013) présente la même définition de cette tortuosité, mais

avec une appellation différente. Ils la présentent comme étant le facteur de tortuosité géométrique (τ_m) qui prend la valeur ($\tau_m \leq 1$), pour tenir compte de la réduction du gradient de concentration macroscopique et pour corriger la direction non parallèle des voies effectives à travers laquelle les espèces chimiques doivent diffuser. Mathématiquement parlant, elle représente l'inverse de la tortuosité donnée par l'équation (2.16).

$$\tau_m = \left(\frac{L_s}{L_h}\right)^2 \quad (2.17)$$

Pour les sols saturés, les valeurs de τ_m sont comprises entre [0.01 – 0.84] et entre [0.025 – 0.57] pour les sols non saturés (Shackelford, 1991; Shackelford et Daniel, 1991). (Bear, 1972; Epstein, 1989) quand à eux définissent également la tortuosité hydraulique comme étant l'inverse de T_m ; cette tortuosité prend des valeurs inférieures à l'unité, comprises entre 0.56 et 0.8 (Bear 1972; Ghanbarian, Hunt et col., 2013).

Jusqu'à l'heure actuelle, aucune technique ou méthode de mesure connue ne peut estimer réellement ce facteur. Par contre, plusieurs modèles basés sur le facteur de formation, peuvent relier le facteur de tortuosité aux paramètres électriques d'un matériau poreux saturé, telle la conductivité ou bien la résistivité électrique (Promentilla, Sugiyama et col., 2009; Lane, 2011; Ghanbarian, Hunt et col., 2013) :

$$T_m = F \cdot \phi \quad (2.18)$$

Avec ϕ porosité du milieu, $T_m \geq 1$

Une autre relation linéaire théorique établie par (Rhoades et Oster, 1986) existe, reliant la conductivité électrique d'un milieu poreux saturé à la conductivité électrique de l'eau interstitielle CE_0 et un facteur de tortuosité ≤ 1 (Paris, Chaumont et col., 2003; Bezzar et Ghomari, 2013) :

$$EC = \tau_m \cdot \theta_w \cdot EC_0 + EC_{GS} \quad (2.19)$$

Où θ_w est la teneur en eau volumique du matériau poreux, τ est un facteur de transmission lié à la tortuosité du milieu poreux (≤ 1), CE_0 est la conductivité électrique de l'eau des pores en S/m et CE_s est la conductivité électrique de la phase solide.

Cette relation permet d'obtenir le facteur de tortuosité géométrique τ en traçant la CE du matériau saturé en fonction de la CE_0 (figure 2.16). La pente de cette courbe par analogie avec l'équation (2.19) représente le produit ($\tau \cdot \theta_w$) et l'intersection entre la courbe et l'axe des ordonnées représente la conductivité des grains solides CE_{sg} . (Nulle dans le cas des matériaux granulaires) (Jackson, 1975).

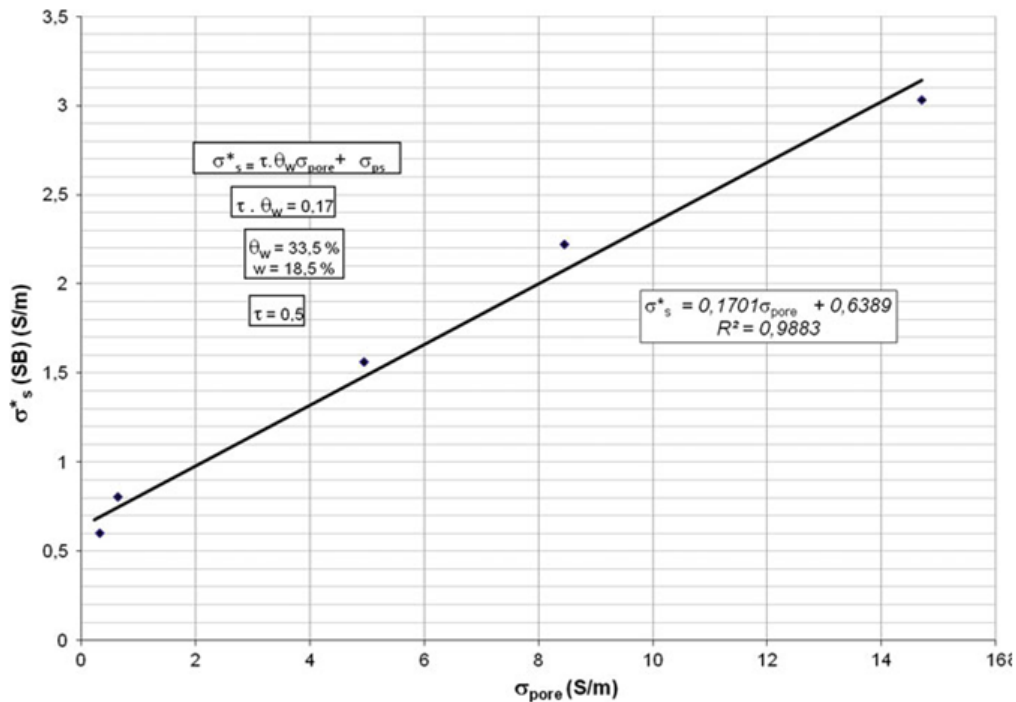


Figure 2.16 – Facteur de tortuosité géométrique (τ) obtenu par la relation de Rhodes et Oster, 1985 (Bezzar et Ghomari, 2013).

Il existe un autre modèle reliant la tortuosité géométrique au facteur de formation appelé équation de Nernst–Einstein (équation 2.20), permettant d’avoir l’influence directe de la tortuosité sur les paramètres électriques des matériaux poreux et qui peut être utilisée pour les espèces ioniques non réactives reliant la diffusion et la conductivité ionique (Blewett, McCarter et col., 2003; Nokken et Hooton, 2008; Neithalath et Jain, 2010a).

$$\frac{D_i}{D_0} = \frac{EC}{EC_0} = \phi \cdot \tau_m \quad (2.20)$$

2.4 Phénomène de Diffusion dans les milieux poreux :

Pour de nombreux ouvrages en béton, la caractérisation de leur durabilité passe par l’étude de la diffusion ionique et plus particulièrement par celle des ions chlorures. Cette durabilité est dans la plupart des cas, liée à l’aptitude du matériau à résister à la pénétration d’agents agressifs (Gagné, 2000). La reconnaissance du phénomène de diffusion des chlorures dans le béton et l’élaboration d’un modèle de prédiction pour estimer la durée de vie des structures en béton soumis à une exposition à long terme, est vitale pour les environnements marins agressifs.

La diffusion est un processus irréversible fondamental qui désigne la tendance naturelle d’un système à rendre homogènes les concentrations des espèces chimiques présentes en son sein. Ainsi, la diffusion est un phénomène qui se traduit par le transport moléculaire à travers la phase liquide dans un milieu poreux totalement ou partiellement saturé, où les ions chlorures se déplacent sous l’effet de l’agitation aléatoire d’espèces soumises à un gradient de potentiel chimique ou gradient de concentration ; cela veut dire qu’il y aura transport de matière

chimique de la zone la plus concentrée vers la zone la moins concentrée (Gagné, 2000; Ismail, 2006; Mercado et Hugo, 2012). Par conséquent, lorsqu'une différence de concentration d'une espèce donnée existe entre deux points d'un matériau poreux, au sein duquel le déplacement de l'espèce est possible, la diffusion est à l'origine du transfert de cette espèce, notamment à travers la solution porale du matériau. Lorsque la différence de concentration se vérifie par rapport au milieu environnant le matériau, les différentes espèces peuvent alors être emmenées à pénétrer ou à quitter celui-ci par échange avec ce milieu extérieur (Ollivier, Carcassès et col., 2002).

2.4.1 Mesure du coefficient de diffusion :

En plus des propriétés physiques élémentaires telles que la porosité, le coefficient de diffusion est un paramètre fondamental pour décrire la pénétration des chlorures dans les matériaux poreux, notamment les matériaux cimentaires comme le béton. De nombreuses méthodes expérimentales ont été développées pour comprendre les phénomènes de transport des chlorures, mesurer le coefficient de diffusion et prédire la durabilité potentielle d'une structure.

Dans un milieu poreux, la diffusion des espèces ioniques se déroule dans la phase liquide du matériau, en d'autres termes à travers le réseau poreux. Par conséquent, le ratio entre la quantité de l'espèce ionique transférée par diffusion à travers un milieu poreux donné D_i et la quantité de la même espèce diffusée dans une solution infiniment diluée D_0 devrait être dépendant de la géométrie, c'est-à-dire la tortuosité, la porosité et la constrictivité de la structure poreuse. Cette dépendance peut être décrite par l'équation 2.21 (Bear et Bachmat, 1991; Dormieux et Lemarchand 2000; Saripalli, Serne et col. 2002) :

$$D_i = \frac{D_0 \delta \phi}{T_m} \quad (2.21)$$

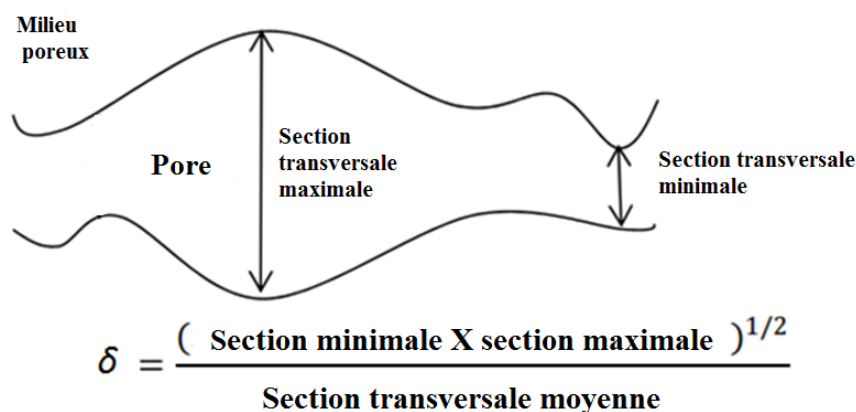


Figure 2.17 – Schéma définissant la constrictivité (Takahashi, Seida et col., 2009)

La constrictivité est un facteur adimensionnel qui tient compte de la variation de la section transversale des pores connectés. C'est un rapport entre la plus grande et la plus petite section transversale d'un volume représentatif de l'espace poral (figure 2.17). La constrictivité ne peut être déterminée indépendamment. (Szenknect, 2003) estime que pour un milieu poreux

constitué de particules sphériques de même diamètre, la constrictivité vaut environ 0.75 ; mais approche généralement de l'unité (Van Brakel et Heertjes, 1974; Faurel, 2012).

Par analogie, du fait que la phase solide de ce milieu poreux peut effectivement être considéré comme un diélectrique, le ratio entre la quantité d'espèce ionique transférée par conduction électrique à travers le même matériau qu'auparavant (CE) et la quantité de la même espèce mobilisée (par conduction électrique) en solution infiniment diluée (EC_0) devrait être égal au ratio précédent (McKee 1981; McCarter, Starrs et col., 2000; Mercado et Hugo, 2012).

L'équation de Nernst-Einstein (équation 2.28) peut être utilisée pour établir cette relation entre la diffusivité et la conductivité électrique d'un milieu poreux (McKee, 1981; McCarter, Starrs et col., 2000; Blewett, McCarter et col., 2003; Mercado et Hugo, 2012; Olsson, Baroghel-Bouny et col., 2013; Torres-Luque, Bastidas-Arteaga et col., 2014). Une fois cette relation établie, le contrôle de la CE peut être utilisée comme méthode indirecte du contrôle de la diffusivité vis a vis des chlorures (Sengul et Gjorv, 2007).

$$\frac{1}{F} = \frac{EC}{EC_0} = \frac{D_i}{D_0} \quad (2.22)$$

De l'équation (2.22), le rapport entre la constrictivité δ et le facteur de tortuosité T_m représente le facteur de tortuosité géométrique τ_m (Shackelford et Moore, 2013), sachant que : $\tau_m = 1 / T_m$, et à partir des équations 2.18, 2.22, on aura :

$$D_i = \phi \cdot \tau_m \cdot D_0 \quad (2.23)$$

Il est à noter que le coefficient de diffusion effectif D^* est le rapport du coefficient D_i sur la porosité du milieu (Shackelford et Daniel, 1991; Bezzar et Ghomari, 2013): $D^* = D_i / \phi$. L'équation (2.23) devient :

$$D^* = D_0 \cdot \tau_m \quad (2.24)$$

L'équation 2.24 définit le coefficient de diffusion effectif D^* d'une espèce chimique dans un milieu poreux, comme étant égal au produit du coefficient de diffusion libre D_0 de la même espèce chimique en phase liquide et le facteur de tortuosité géométrique τ_m (Shackelford 1991; Shackelford et Daniel, 1991; Bezzar et Ghomari, 2013; Shackelford et Moore, 2013).

2.4.2 Détermination du profil de concentration :

La loi de Fick décrit la variation de la concentration dans le temps et dans l'espace. Le résultat de ce couplage définit ce que l'on appelle par la seconde loi de Fick décrite par la formule suivante (Larbi, 2013; Shackelford et Moore, 2013) :

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_0 \frac{\partial C}{\partial x} \right) \quad (2.25)$$

Le coefficient de diffusion libre D_0 en solution, représente le paramètre principal régissant la diffusion d'une espèce chimique en solution aqueuse et est affecté fondamentalement par plusieurs paramètres tels que la température, la viscosité, la concentration du soluté, etc.

La diffusion des ions chlorures a été communément admise pour être régie par la loi de Fick conventionnelle (Song, Jiang et col., 2014). Parmi les travaux utilisant cette seconde loi de Fick, on trouve les travaux de (Ahl et Lü, 2007) qui ont étudié la diffusion du NaCl dans la brique destinée à la construction dans un environnement agressif. (Shackelford et Daniel, 1991) s'en sont servi pour suivre l'évolution de la diffusion d'espèces chimiques dans un sol argileux compacté. (Farahani, Taghaddos et col., 2015) s'est basé sur cette loi pour prédire le coefficient de diffusion des chlorures, qui pénètrent dans les bétons constituant les structures situées dans un environnement marin, et élaborer un béton contenant de la fumée de silice afin de mieux résister à ces agressions.

Si le coefficient de diffusion D_0 est indépendant de la position x , l'équation 2.25 devient alors (Blewett, McCarter et col., 2003; Shackelford et Moore, 2013) :

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_0 \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (2.26)$$

L'équation 2.26 est la forme la plus commune de la deuxième loi de Fick régissant la diffusion transitoire unidimensionnelle des espèces chimiques en solution aqueuse.

Lorsqu'on a affaire à un milieu poreux, la diffusion des espèces chimiques en solution aqueuse peut être perturbée. En premier lieu, avec l'existence de particules solides qui forment alors des chemins de diffusion tortueux, cette tortuosité réduit considérablement le gradient de concentration macroscopique. Deuxièmement, il peut y avoir des interactions entre les espèces chimiques de diffusion et les milieux poreux solides susceptibles de compromettre directement la masse des espèces diffusées en solution ou entraîner des interactions physico-chimiques qui affectent la microstructure du milieu lui-même (Malusis et Shackelford, 2002).

Ainsi, pour un gradient de concentration unidirectionnel et pour une espèce chimiquement inerte la seconde loi de Fick exprimée en fonction du coefficient de diffusion effectif devient (Blewett, McCarter et col., 2003; Bezzar et Ghomari, 2013; Shackelford et Moore, 2013) :

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D^* \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (2.27)$$

Dans le cas de la figure 2.18 qui présente la diffusion en régime transitoire, le matériau soumis à la diffusion est désigné comme étant un milieu semi infini, cela veut dire que la concentration des chlorures au niveau de la face supérieure de l'échantillon est toujours égale à zéro et que l'équilibre n'est jamais atteint. Les conditions initiales dans ce cas, sont comme suit :

$$C(x \leq 0, t = 0) = C_0; C(x > 0, t = 0) = 0; C(x = \infty, t > 0) = 0$$

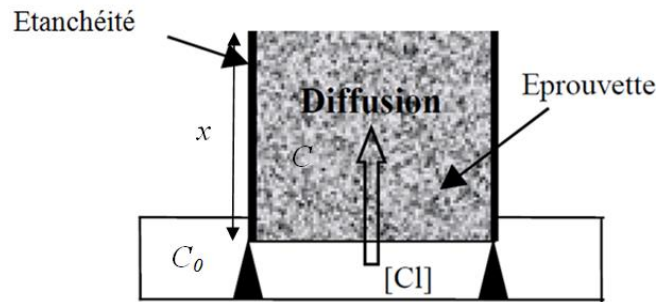


Figure 2.17 – Essai d’immersion – régime transitoire (Ismail 2006).

Dans de telles conditions, la seconde loi de Fick présentée précédemment peut s’écrire sous la forme suivante (Blewett, McCarter et col., 2003; Bezzar et Ghomari, 2013):

$$\frac{C}{C_0} = \text{Erfc}\left(\frac{x}{2(D^*t)^{1/2}}\right) \quad (2.28)$$

Cette équation est une solution mathématique proposée par (Crank, 1975) et applicable dans le cas d’une diffusion naturelle dans un milieu semi infini. Où C_0 (constante) est la concentration du soluté non-réactif dans le réservoir source, C la concentration à l’instant t et la position x , et Erfc la fonction d'erreur complémentaire.

2.5 Conclusion :

L’analyse bibliographique élaborée dans ce chapitre, nous a permis de comprendre les phénomènes qui régissent le transfert dans les matériaux poreux. En premier lieu, la conduction électrique qui est principalement électrolytique, (particules solides électriquement infranchissable), dépend de plusieurs paramètres tels que la quantité de chlorures présente dans l’eau interstitielle ou encore la structure porale du milieu étudié. Ensuite, l’importance de la CE/RE dans la caractérisation physique ou électrique des matériaux est d’un grand intérêt pour la compréhension des phénomènes qui se produisent à l’intérieur des milieux poreux, phénomènes pouvant provoquer la dégradation du matériau béton. Cette CE est influencée par plusieurs paramètres intrinsèques tels que la porosité, la tortuosité, ou encore d’autres paramètres environnementaux comme la température, le degré de saturation, la quantité de chlorures dû aux attaques extérieures. Tout cela nous permettra, d’anticiper l’évolution de la CE ou bien la RE en fonction de la variation de l’un de ces paramètres.

Ce développement nous a permis aussi de voir en détail le paramètre tortuosité avec ses différentes définitions, et de voir aussi son influence sur les propriétés de diffusion des espèces chimiques dans les milieux poreux. La mesure électrique du coefficient de diffusion est illustrée également dans ce chapitre ; cette mesure passe par le paramètre CE suivant la relation de Nernst-Einstein. Cette relation met aussi en relation la tortuosité avec les paramètres de diffusion (coefficient de diffusion de l’espèce chimique dans une eau libre et le coefficient de diffusion de cette même espèce dans le milieu poreux étudié).

L'objectif est de pouvoir déduire le coefficient de diffusion de l'espèce chimique présente dans la solution interstitielle au sein du matériau poreux, sans passer par des essais de diffusion qui prennent un temps relativement important. Pour le programme expérimental préconisé au cours de ce travail de recherche, un dispositif de mesure non destructif électrique obéissant à la loi d'Ohm va être utilisé, avec une cellule à deux électrodes, en appliquant un courant électrique alternatif, durant toute la durée du programme. Le présent travail concerne essentiellement le transfert dans les milieux poreux totalement saturés, mais aussi il est supposé qu'il n'y ait aucune interaction entre l'espèce chimique et le milieu poreux et donc nous nous intéressons beaucoup plus au transfert des chlorures à travers un milieu poreux non réactif et totalement saturé. Les essais de diffusion auxquels nous nous intéressons dans le chapitre suivant, sont des essais de diffusion naturelle, sous régime transitoire, sur une multitude de milieux poreux : billes de verre, sables, briques et bétons. L'utilisation de la conductivité électrique va nous permettre de suivre cette diffusion dans le temps et de déterminer les profils de concentrations des chlorures.

CHAPITRE III

CHAPITRE III : PROTOCOLE EXPERIMENTAL

3.1 Introduction :

Ce chapitre présente le programme expérimental préconisé dans notre travail de recherche. Dans une première partie, nous présentons des montages électriques issus de la littérature, parmi lesquels nous choisissons la méthode la plus appropriée en fonction des avantages et inconvénients de chaque montage. Nous voyons également le principe de la méthode pour pouvoir l'appliquer sans difficultés ainsi que la procédure du calibrage du circuit électrique.

Après, nous nous intéressons aux matériaux que nous testons et à leurs propriétés, à la préparation des échantillons et aux méthodes de mesures. Nous montrons les protocoles expérimentaux pour mesurer les propriétés physiques de ces matériaux tel que la porosité, la tortuosité, la concentration des chlorures, etc.

Et pour terminer nous expliquons la cellule de diffusion utilisée pour les essais en régime permanent, et comment procéder au suivi de l'évolution de la diffusion par la méthode électrique adoptée. Les matériaux utilisés dans notre programme sont les billes de verre de différents diamètres, un sable quartzé de différentes classes, deux sortes de briques, un mortier et un béton ordinaire.

3.2 Choix du circuit :

Plusieurs méthodes connues, permettent d'effectuer des mesures électriques pouvant caractériser des paramètres tels que la résistance électrique, l'impédance, etc. Chacune de ces méthodes présentent des avantages et des inconvénients. Il faut tenir compte des exigences de mesure ; mais aussi des conditions d'utilisation afin de choisir la méthode la plus appropriée, compte tenu des facteurs influençant les mesures à l'exemple de la gamme de fréquence, la précision de mesure et la facilité de fonctionnement.

Lors d'un choix de méthode, nous sommes obligés de faire des compromis car il n'y a pas de méthode unique qui inclue toutes les capacités de mesure. La figure 3.1, illustre quelques montages de circuit et méthodes de mesure d'impédance couramment utilisées. Le tableau 3.1 répertorie les avantages et les inconvénients de chaque méthode de mesure, ainsi que la gamme de fréquence des instruments

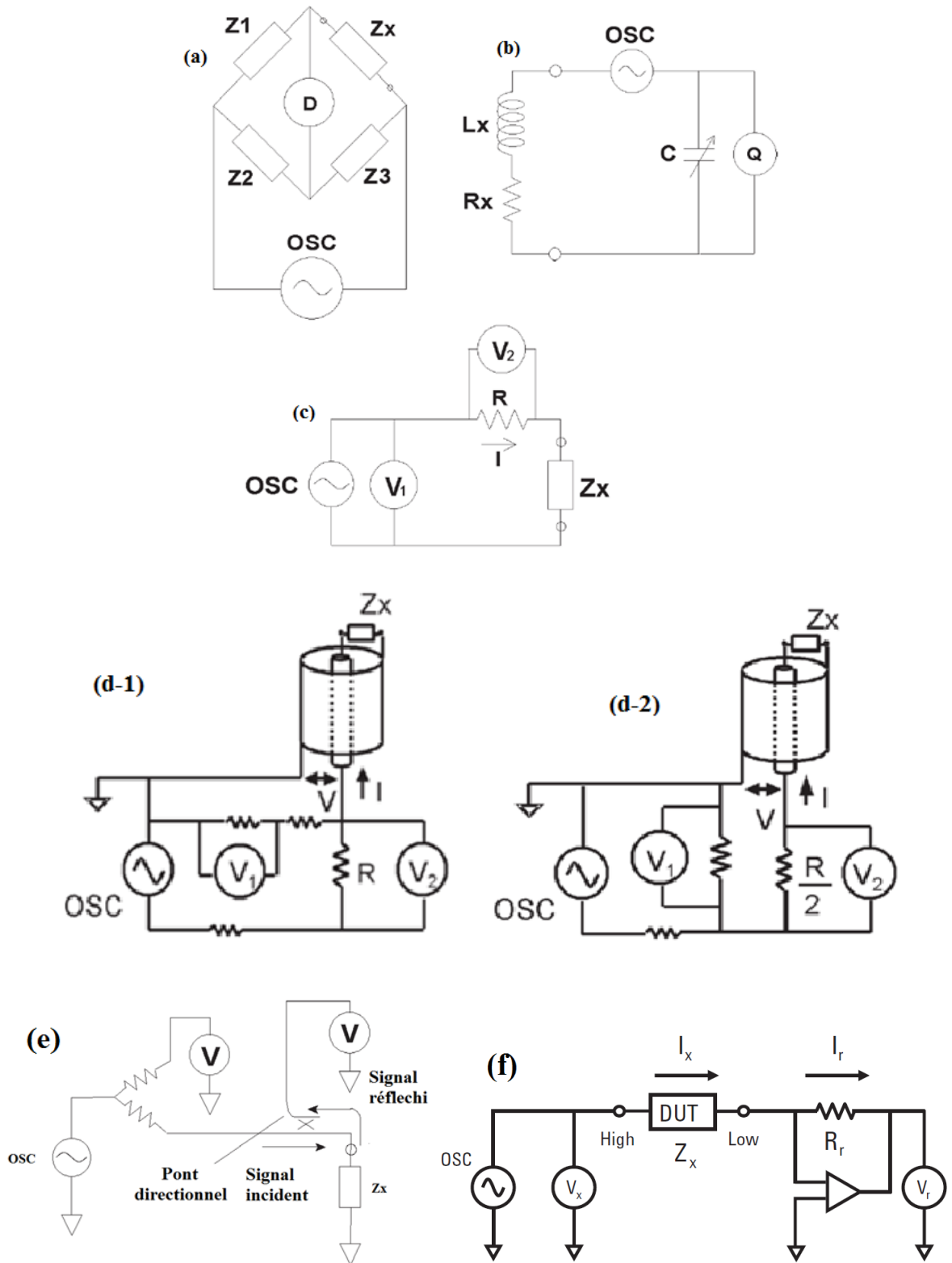


Figure 3. 1– Circuits de mesure d'impédance, (a) pont de Wheatstone, (b) méthode de résonance, (c) méthode I-V, (d-1) méthode RF I-V pour les basses impédances, (d-2) méthode RF I-V pour les hautes impédances, (e) méthode d'analyse de réseau, (f) méthode du p pont auto-équilibré (Okada et Sekino 2003).

Tableau 3. 1 Les méthodes communes de mesure d'impédance.

Méthode	Avantages	Inconvénients	Domaine de fréquence
Pont de Wheatstone	<ul style="list-style-type: none"> • Haute précision type (0.1%), • Large couverture de fréquences en utilisant différents types de ponts, • Faible coût. 	<ul style="list-style-type: none"> • Besoin d'être manuellement équilibré, • Couverture de fréquences étroite avec un seul instrument. 	Jusqu'à 300 MHz
Méthode de résonance	<ul style="list-style-type: none"> • Bonne précision. 	<ul style="list-style-type: none"> • Doit être accordée à la résonance, • Mesure d'impédance de faible précision. 	10 kHz à 70 MHz
Méthode I-V	<ul style="list-style-type: none"> • Facilité d'utilisation, • Adapté aux besoins de test de la sonde. 	<ul style="list-style-type: none"> • Gamme de fréquence de fonctionnement limitée. 	10 kHz à 100 MHz
Méthode RF I-V	<ul style="list-style-type: none"> • Haute précision (type 1%) et une large gamme d'impédance à hautes fréquences. 	<ul style="list-style-type: none"> • Gamme de fréquence de fonctionnement limitée par le transformateur utilisé dans le test. 	1 MHz à 3 GHz
Méthode d'analyse de réseau	<ul style="list-style-type: none"> • Large gamme de fréquences, • Bonne précision lorsque l'impédance inconnue est proche de l'impédance caractéristique. 	<ul style="list-style-type: none"> • Recalibrage nécessaire lorsque la fréquence de mesure change, • Plage de mesure d'impédance étroite. 	300 kHz et plus
Méthode du pont auto-équilibré	<ul style="list-style-type: none"> • Couverture en fréquence large. • Haute précision sur une large plage de mesure d'impédance. 	<ul style="list-style-type: none"> • Pas de variation élevée de fréquences disponible. 	20 Hz à 110 MHz

Parmi les méthodes proposées ci-dessus, nous choisissons la troisième méthode (I-V) à cause de la facilité d'utilisation et de son principe ; rajoutant à cela la rapidité des résultats et la disponibilité du matériel constituant le circuit au sein de notre laboratoire.

3.3 Montage du circuit

La méthode choisie peut avoir deux configurations possibles comme le montre les figures 3.2 et 3.3. Le premier montage (figure 3.2) est composé d'un générateur de basse fréquences [1 Hz – 10 MHz] qui sert à injecter le courant électrique, deux résistances R et R_x montées en série et d'un oscilloscope placé en parallèle afin de mesurer la tension du circuit électrique. La figure 3.3, illustre la seconde configuration de la méthode adoptée ; la seule différence avec la précédente réside dans l'utilisation de multimètres pour la mesure de la tension. *Pour la suite*

des mesures électrique, le circuit utilisant l'oscilloscope est adopté pour sa précision comparée aux multimètres.

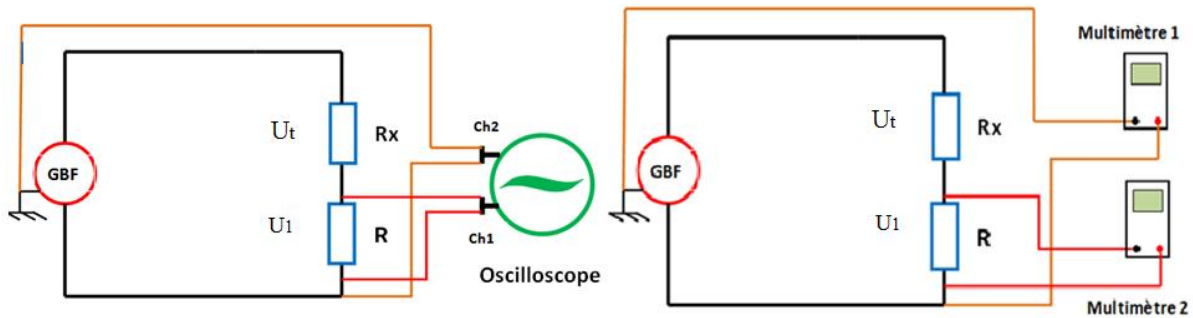


Figure 3.2 – Configuration utilisant l'oscilloscope.

Figure 3.3 – Configuration utilisant les multimètres.

3.4 Principe de la mesure :

Le principe de la méthode de mesure électrique adoptée dans ce travail est relativement simple. Elle se base sur la loi d'Ohm, qui traduit le comportement d'un courant électrique traversant un dipôle (résistances électriques dans notre cas) en fonction de la tension à ses bornes.

L'impédance inconnue (Z_x), peut être calculée à partir des valeurs mesurées de tension et de courant selon l'équation (3.1). Le courant est calculé à l'aide de la mesure de tension (V_1) aux bornes d'une résistance de faible valeur connue avec précision (R). Dans le cas d'une impédance résistive, la loi d'Ohm s'écrit comme:

$$Z = R = \frac{U}{I} \quad (3.1)$$

Avec $R_{eq} = R + R_x$

U : représente la tension totale du circuit, notée U_t , avec $U_t = (R_x \cdot I) + (R \cdot I)$

Et la résistance R_x s'écrit sous la forme suivante (équation 3.2):

$$R_x = \left(\frac{U_t}{I} \right) - R \quad (3.2)$$

3.5 Calibrage du circuit (essais préliminaires):

Avant toute utilisation du matériel de mesure électrique, il est nécessaire de procéder à un calibrage du circuit électrique et de faire des essais préliminaires pour valider le montage. Pour cela, nous avons placé des résistances de valeurs données [$100 \Omega - 1 \text{ M}\Omega$] (valeur réelles) en R_x en faisant varier aussi la valeur de la résistance R entre [$10 \Omega - 100 \text{ k}\Omega$] avec pour condition ($R \ll R_x$). Nous mesurons donc la valeur pratique de R_x ; le but étant de comparer les valeurs pratiques de R_x avec les valeurs réelles.

Lors du calibrage du circuit électrique, il a été constaté que d'autres paramètres influençaient fortement nos mesures. Ces paramètres sont la fréquence électrique (f_r) et la tension du générateur (V_{pp}). Pour voir l'influence de (f_r) et afin de déterminer un intervalle de

fréquences approprié, nous avons fait varier la fréquence entre 1Hz et 10 MHz pour des valeurs données de R et R_x (par exemple : $R= 15\Omega$ et $R_x = 100\Omega$), ensuite nous avons effectué des mesures de la résistance R_x . L'objet de cette mesure est de comparer les valeurs réelles et pratiques de R_x . Pour ce qui est de la tension du générateur, la valeur de V_{pp} a été variée entre 1 et 10 Volts pour des valeurs données de R et R_x dont voici quelques exemples : $R = 15\Omega$, $R_x = 100\Omega$; $R = 5\Omega$, $R_x = 100\Omega$; $R = 5\Omega$, $R_x = 220\Omega$), là aussi le principe est de voir le rapprochement des valeurs réelles et pratiques de R_x .

3.6 Essais sur solutions salines en NaCl :

Les essais consistent à préparer des solutions de différentes concentrations en NaCl, entre 5 et 117 g/l. Un volume donné est prélevé de chaque concentration, placé dans une cellule de mesure remplaçant la composante R_x dans le circuit (figure 3.4), afin d'effectuer la mesure électrique.

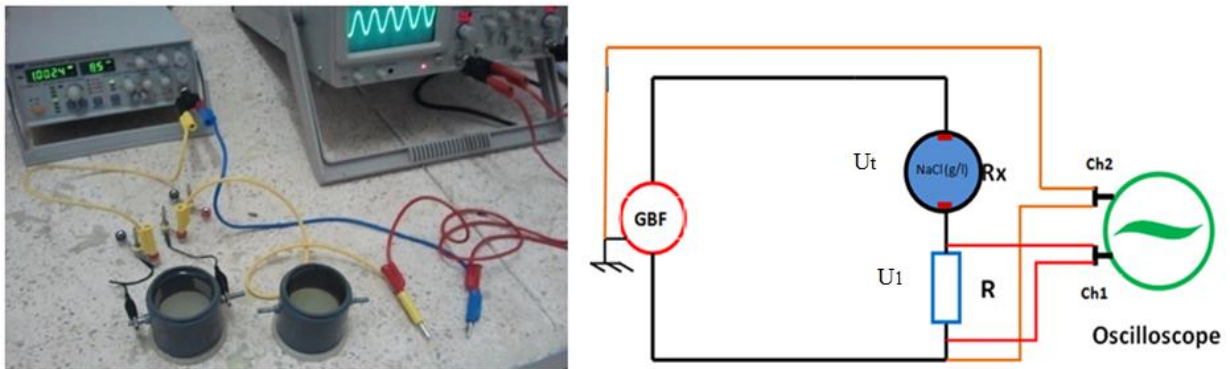


Figure 3.4 – Essai de mesure de R_x sur une solution de NaCl.

3.6.1 Caractéristiques de la cellule :

La cellule de mesure est un cylindre en PVC avec un diamètre (l) de 50 mm et une hauteur de 50 mm, équipé de deux électrodes en acier inoxydable ou en cuivre de dimensions (A) (30 x 50 mm) (figure 3.5), similaire à celle utilisée dans la littérature (Blewett, McCarter et col., 2003; Bezzar et Ghomari 2009), fixées à la mi-hauteur de la cellule et reliées par des câbles électriques à l'appareil de mesure.

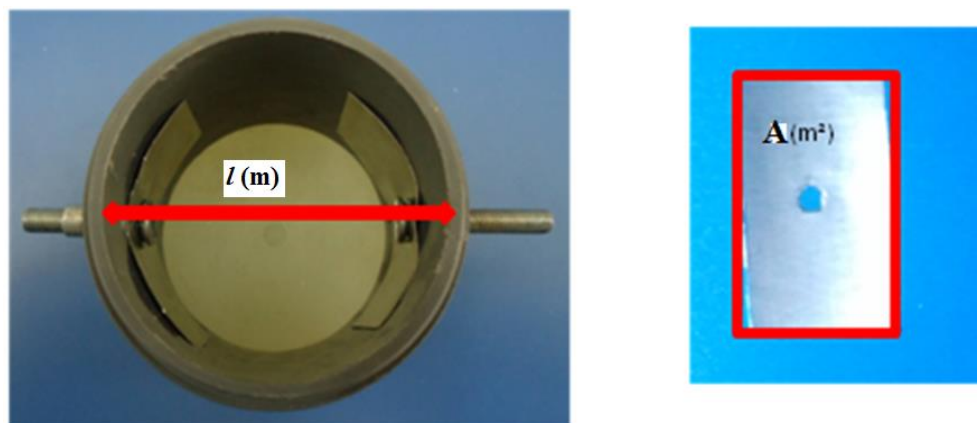


Figure 3.5 – Caractéristiques de la cellule de mesure.

Nb : pour toutes les mesures électriques qui suivent utilisant le circuit électrique choisi (figure 3.2), les paramètres tension du générateur et fréquence électrique ont été pris respectivement 8.5 V et 20 kHz.

3.6.2 Choix du type d'électrodes :

Pour le choix des électrodes, nous avons eu à choisir entre des électrodes en cuivre ou en acier inoxydable. Pour trancher entre les deux, des essais de mesures de résistances sur des solutions en NaCl de différentes concentrations sont effectuées avec deux cellules en PVC, comme le montrent les figures 3.6 et 3.7. Chacune d'elle, est équipée avec une paire d'électrodes de matière différente. Nous avons également pris plusieurs valeurs de R (10Ω , 15Ω ,...). Les essais ont été effectués en appliquant une fréquence de 1 kHz et une tension du générateur V_{pp} de 8.5 Volts. Ensuite pour vérifier l'influence de la fréquence sur les essais avec des solutions salines, nous avons pris une solution saline de concentration donnée et y avons appliqué plusieurs valeurs de fréquences telles que 1, 10 et 20 kHz en employant une tension du générateur égale à 8,5 V et en utilisant une résistance R de 5Ω . Les essais réalisés ont été répétés plus de 3 fois pour avoir une meilleure précision.

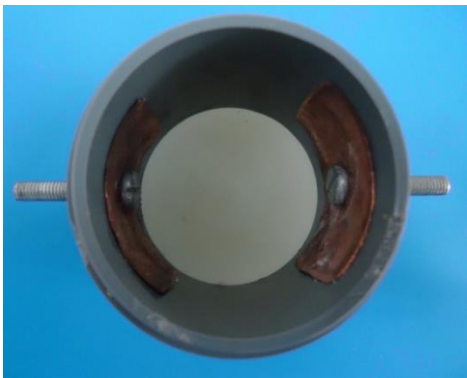


Figure 3.6 – Electrodes en cuivre.

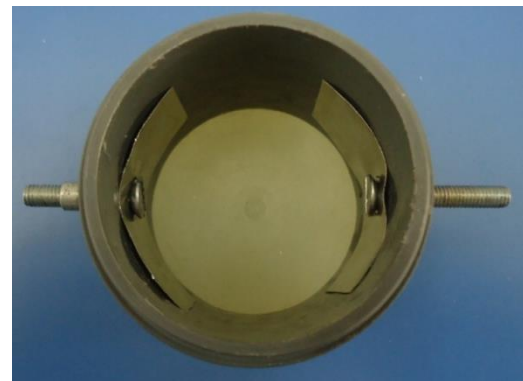


Figure 3.7 – Electrodes en acier inoxydable.

Dans la partie qui suit, les mesures électriques sont effectuées en utilisant les électrodes en acier inoxydable, qui offrent des résultats beaucoup plus précises que ceux trouvés avec par les mesures utilisant les électrodes en cuivre.

3.7 Détermination de la conductivité (CE) :

Le moyen le plus simple et le plus rapide de mesure d'une conductivité électrique est le conductimètre (figure 3.8). Beaucoup de modèles existent dans le marché et diffèrent selon leurs fonctionnalités et leurs précisions. Dans cette partie qui constitue encore une étude préliminaire, nous tentons d'estimer la conductivité électrique d'une solution avec deux méthodes : une méthode utilisant le circuit électrique et une autre utilisant un conductimètre numérique pour comparer les valeurs et s'assurer de la fiabilité du circuit adopté.

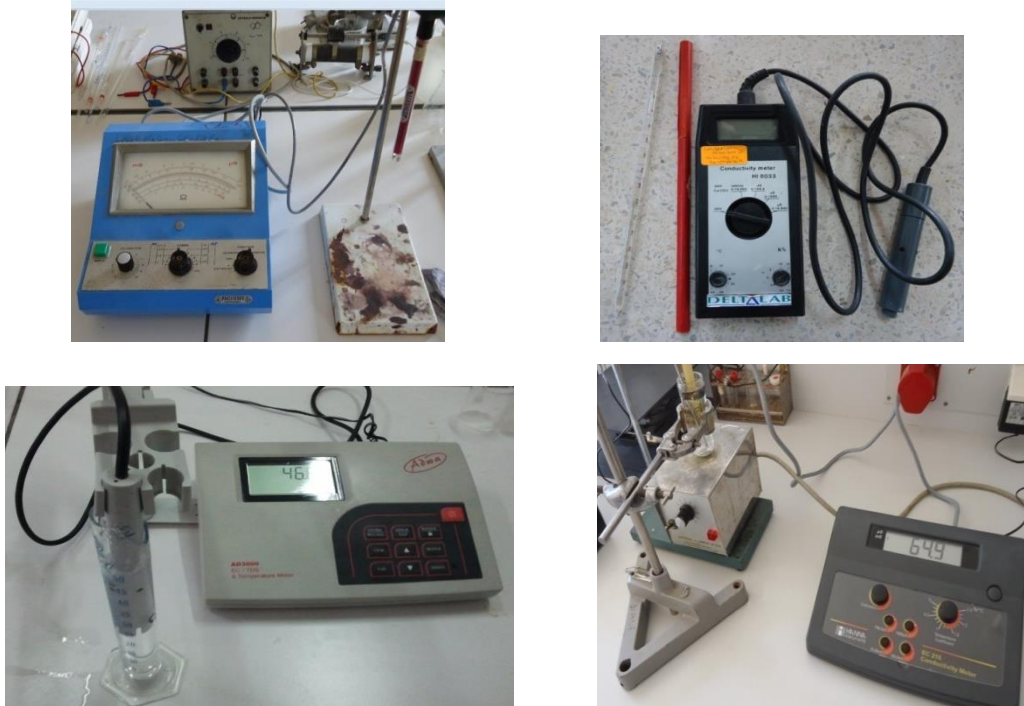


Figure 3.8 – *Différents types de conductimètres.*

Pour cela des solutions salines de NaCl de différentes concentrations variant entre 5 à 117 g/l sont préparées, pour lesquelles la CE est mesurée d’abord avec le conductimètre ; où un volume prélevé de chaque concentration est mis dans une fiole pour les besoins de la mesure (figure 3.8) et ensuite avec le circuit électrique (figure 3.4) où l’on mesure une résistance électrique R_x transformée ensuite en conductivité en utilisant l’équation (2.3). L’essai est répété 3 fois pour chaque concentration dans les deux méthodes avec rinçage du récipient contenant la solution après chaque utilisation pour ne pas avoir une accumulation de sel qui fausse les résultats.

3.8 Caractéristiques des matériaux utilisés :

Plusieurs milieux poreux de différentes caractéristiques ont été utilisés dans notre programme expérimental. Ces caractéristiques sont représentées dans le tableau 3.2.

3.8.1 Billes de verre :

Il est connu dans le domaine du transport des fluides dans les milieux poreux, l’utilisation de billes de verre comme étant un matériau pouvant simuler le comportement d’un milieu poreux tel que les sables, graviers ou autres. (Wong, Koplík et col., 1984) ont utilisé des billes de verre pour identifier l’influence de la structure porale sur les paramètres conductivité et perméabilité des roches.

(Dias, Mota et col., 2005) se sont basés sur des mixtures de bille de verre de différences tailles pour former un modèle granulaire que l’on exploite pour déterminer la porosité, la perméabilité, la tortuosité et aussi l’effet de paroi entre les particules de tailles différentes. On

retrouve aussi le travail de (Friedman et Robinson 2002) qui consiste à faire des mesures de CE de plusieurs matériaux notamment des perles de verre mono sphériques.

Tableau 3. 2 Caractéristiques des matériaux poreux utilisés.

Milieu poreux	Classe granulaire	Formulation	Rapport E/C	Densité	CE _{GS} (S/m)
Billes de verre	1.5, 2, 3 et 4 mm	/	/	2.53	0
Sables	(0.25 – 0.5), (0.5 - 1) et (1 - 2) mm	/	/	1.6	0
Brique silico calcaire	/	/	/	1.9	0
Brique rouge en terre cuite	/	/	/	1.96	0
Mortier	Sable (0-4) mm CEM II/A 42,5	1/3	0.5	2	0
Béton ordinaire quaternaire	Sable (0-4) mm + gravillon (4-8) mm + gravier (8-16) mm + gravier (16-25) mm	BO ¹	0.5	2.3	0
CE _{GS} : conductivité électrique des grains solides					

Dans cette partie du programme, nous avons utilisé des billes de verre mono sphérique ayant des diamètres de 1.5, 2, 3 et 4 mm (figure 3.9). Notons que lors d'une mesure électrique, un seul diamètre est utilisé à la fois, en d'autres termes le milieu poreux est constitué uniquement de bille de même diamètre.



Figure 3. 9 – Les différents diamètres de billes de verre utilisés.

¹ Boukli Hacène, S. M. A. (2009). Contribution à l'étude de la résistance caractéristique des bétons de la région de Tlemcen, Thèse de Doctorat, Université Abou Bekr Belkaid - Tlemcen Algérie, ibid.

3.8.2 Sables :

Un sable de carrière siliceux quartzueux est utilisé, et comme on peut le voir dans la figure 3.10, trois différentes classes de ce sable ont été préparées pour la suite des essais : 1 - 2 mm ; 0.5 - 1 mm et 0.25 – 0.5 mm (figure 3.10). Ces classes de sable ont été obtenues au laboratoire suite aux étapes suivantes :

Une quantité donnée de sable de carrière, de diamètre compris entre 0 et 4 mm est prélevée, rincée plusieurs fois avec à l'eau du robinet afin de se débarrasser des fines et impuretés. Un séchage total à 105° C est effectué à l'aide d'une étuve électrique, ensuite un tamisage manuel a été réalisé pour séparer les trois classes de sable indiquées.



Figure 3. 10 – (a) classe de sable 1 – 2 mm, (b) classe de sable 0.5 – 1 mm, (c) classe de sable 0.25 – 0.5) mm.

3.8.3 Briques :

Deux différentes briques sont utilisées dans cette partie : la brique silico calcaire et la brique rouge en terre cuite. Toutes les deux sont couramment utilisées dans le domaine de la construction en maçonnerie Des carottes de 45 mm de chaque type de brique (figure3.11) ont été récupérées à l'aide d'une carotteuse (voir figure 3.12).



Figure 3. 11– Carottes de briques de 45 mm.



Figure 3. 12 – Dispositif de carottage.

3.8.4 Matériaux cimentaires :

Pour les éprouvettes en béton, des moules en PVC de 11 x 22 cm ont été préparé et équipés de paires d'électrodes en acier inoxydable de dimensions 30 x 50 mm, fixées à mi-hauteur

comme le montre la figure 3.13. Le béton utilisé est un béton ordinaire avec un E/C de 0,5, ses caractéristiques sont récapitulées dans le tableau 3.2.

La confection et le remplissage des éprouvettes s'est fait en respectant la norme NE 12390-1. Après 24h, les éprouvettes sont immergées dans un bac pendant 28 jours afin d'assurer une hydratation complète, ensuite ces éprouvettes sont découpées de façon à récupérer des échantillons de 5 cm du cœur de chaque éprouvette, qui sont après placés dans une étuve à 65° C. Un suivi de la masse est effectué toutes les 24 heures jusqu'à stabilisation de la masse et le séchage total des échantillons.



Figure 3. 13 – Moules 11x22 cm en PVC pour la confection des éprouvettes de béton.

En ce qui concerne les échantillons de mortier, la figure 3.14 montre les moules en PVC utilisés pour la confection de nos corps d'épreuve. Les moules sont de forme cylindrique de 11cm de diamètre et de 5cm de hauteur, équipés de paires d'électrodes en acier inoxydable. Le mortier utilisé est un mortier ordinaire (1/3) avec un rapport E/C de 0,5. Le remplissage s'est fait en trois temps, une vibration est appliquée au moment du remplissage pour éliminer les vides.



Figure 3. 14 – Eprouvettes de mortier de 11cm de diamètre.

Après 24 heures, les éprouvettes sont placées dans un bac contenant de l'eau pendant 28 jours pour une hydratation complète, ensuite un séchage à l'étuve à 65° C est programmé jusqu'à stabilisation de la masse des échantillons.

N.B. il est à noter que les visser qui apparaissent de part et d'autre sur les moules accueillant les éprouvettes en béton et en mortier et servant à la mesure électrique, ont été protégés et bien nettoyés pour empêcher tout risque de corrosion pouvant perturber la mesure.

3.9 Influence de la fréquence:

Cette partie traite de l'impact de la fréquence sur les mesures électriques étudiées afin de déterminer la gamme de fréquence appropriée pour notre travail. Même après avoir réalisé des tests de fréquences préliminaires, réalisés uniquement avec des résistances électriques au cours du calibrage du circuit (§ 3.5), nous ne pouvions affirmer que le domaine de fréquences déduit pouvait également être valable pour les mesures effectuées sur les milieux poreux utilisés.

Pour remédier à cela, d'autres tests, basés sur l'emploi de milieux poreux totalement saturés sont réalisés. L'essai consiste à faire des mesures électriques de résistance électrique ou de CE de la cellule en PVC de diamètre 50 mm (figure 3.5), équipée de deux électrodes en acier inoxydable placées à mi-hauteur, en faisant varier la fréquence entre 1 et 10 MHz.

La mesure est réalisée sur la cellule remplie à raz avec un milieu poreux, tel que les billes de verre ou bien les sables, saturé avec une solution saline de concentration comprise entre 0 et 117 g/l. L'essai est réalisé 3 fois pour tous les diamètres de billes ou classes de sables pour un problème de reproductibilité.

3.10 Essais de porosité

3.10.1 Porosité accessible à l'eau :

La mesure de la porosité à l'eau a été réalisée en utilisant deux méthodes: l'une directe fondée sur des rapports volumétriques et une autre indirecte utilisant la méthode électrique.

3.10.1.1 Méthode directe :

Pour les billes de verre, l'essai a consisté à déterminer la porosité de chaque diamètre, en utilisant l'équation 3.3, qui représente le volume des vide V_v sur le volume total V_c représente le volume total de la cellule en PVC).

$$\phi = \frac{V_v}{V_c} \quad (3.3)$$

Avec $V_v = V_c - V_s$

V_s : volume des grains solides qui remplit la cellule en PVC qui équivaut au rapport de la masse d'une quantité de matériau sur sa masse volumique absolue.

Pour déterminer la masse volumique absolue, on plonge 50 g de billes de verre dans un récipient gradué contenant un volume initial de 50 ml d'eau (figure 3.15), la différence des volumes final et initial représente le volume absolu des 50g de billes de verre.



Figure 3. 15 – *Méthode de l'éprouvette graduée.*

A ce stade, on peut déduire le volume V_s correspondant à la cellule. L'essai consiste à laisser couler les billes à une hauteur normalisée, comme on peut le voir sur la figure 3.16 (essai de LECHATÉLIER), et remplir le moule jusqu'à avoir un cône et puis araser avec une règle le surplus et on procède par la suite à la pesée pour chaque diamètre.



Figure 3. 16 – *Méthode de remplissage de la cellule.*

Les mêmes procédures de mesures volumétriques ont été utilisées pour les sables employées dans cette partie, pour cela 3 différentes classes de sables.

Pour les autres matériaux, à savoir les briques, mortier et béton les tests de saturation à vide ont été adoptés, conformément à la norme recommandée par l'AFPC-AFREM modifiée.

L'essai consiste à placer des échantillons dans un dessiccateur relié à une pompe à vide (figure 3.17), et de procéder en premier lieu au dégazage pendant 24 heures, principe qui sert à chasser toutes les bulles d'air présentes dans l'échantillon, s'en suit ensuite une demi saturation avec de l'eau distillée pendant 24 heures, et enfin la saturation totale pendant environ 6 heures.

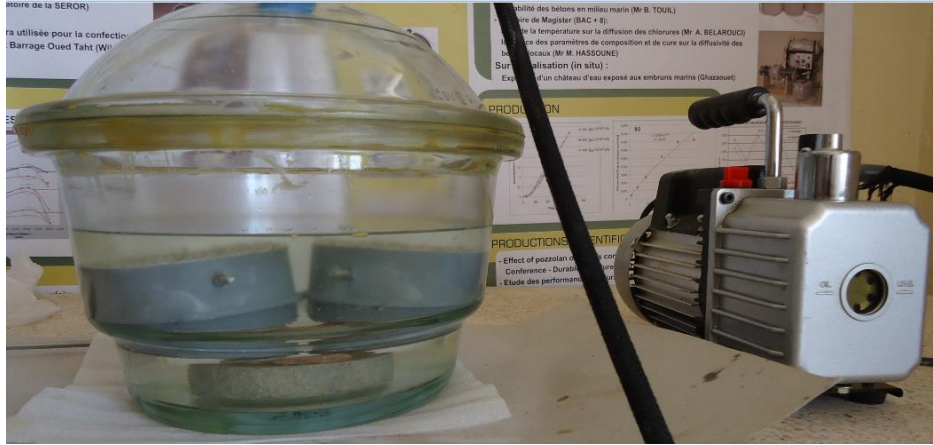


Figure 3. 17 – Saturation sous vide selon AFPC-AFREM modifiée.

Après la saturation, on procède comme suit :

- Pesée de l'échantillon saturé dans l'eau : M_{eau} ,
- Pesée de l'échantillon saturé à l'air : M_{air} ,
- Séchage de l'échantillon à 105° C jusqu'à séchage complet,
- Pesée de l'échantillon sec : M_{sec} .

Ainsi, la porosité pour les briques et les matériaux cimentaires peut être calculée selon l'équation 3.4 :

$$\phi = \frac{M_{air} - M_{sec}}{M_{air} - M_{eau}} \cdot 100 \quad (3.4)$$

3.10.1.2 Méthode indirecte :

La méthode indirecte consiste à faire des mesures de résistance électrique de la cellule (figure 3.5), remplie à raz avec des particules constituant le milieu poreux (billes de verre, sable) totalement saturé avec des solutions salines à différents concentrations de NaCl allant de 5 à 117 g / l. Chaque essai correspondant à une classe granulaire donnée a été répété 3 fois pour diminuer les incertitudes.

Des carottages sur les briques silico-calcaire et terre cuite a été effectuée pour récupérer des échantillons avec 45 mm de diamètre, qui serviront à la mesure indirecte de la porosité. Chaque carotte est équipée avec des électrodes en acier inoxydable pour la mesure électrique, fixées avec des colliers de serrage en acier afin de maintenir les électrodes en place et assurer parfaitement le contact entre l'électrode et la carotte (figure 3.18). Un film protecteur et isolant est utilisé pour empêcher le contact entre le collier et l'électrode ; contact pouvant perturber la mesure électrique. Une colle silicone est appliquée sur les vis servant de points de mesure pour empêcher toute possibilité de corrosion au contact de la solution saline.



Figure 3. 18 – Carottes en briques servant à la mesure électrique.

Pour les matériaux mortier et béton, des éprouvettes de 110 mm de diamètre et 50 mm de hauteur séchées préalablement à 65° C ont été utilisées. Une couche de silicone est aussi appliquée sur les vis pour éviter le risque de corrosion.

La saturation pour les briques ainsi que pour les matériaux cimentaires a été effectuée en utilisant une pompe à vide (AFPC-AFREM modifiée) avec des solutions salines de NaCl de concentration comprise entre 5 à 117 g / l.

3.10.2 Porosité accessible au mercure.

La pométrie au mercure est une méthode d'investigation des milieux poreux, elle consiste à faire pénétrer le mercure dans les pores du matériau sous pression croissante. En fonction de l'accroissement de cette pression, le mercure va pénétrer et remplir les pores les plus fins.

Les appareils les plus puissants sur le marché permettent de faire varier la pression de 3 kPa à 400 MPa, donnant accès aux pores dont la taille va de 400 μm à 3 nanomètres environ (Daïan 2007).

Les essais de pométrie à mercure ont été effectués au sein du laboratoire GeM (Laboratoire de recherche en génie civil et mécanique) à l'IUT de Saint-Nazaire en France sous la direction du Pr A. Khelidj. Les essais sont réalisés uniquement sur les briques et les matériaux cimentaires. En effet, des échantillons cubiques de (1,5 x 2 x 1) cm (figure 3.19) ont été découpés à l'aide d'une scie électrique (figure 3.20), ensuite mis dans une étuve à 60° C jusqu'à stabilisation de la masse.



Figure 3. 19 – Echantillons cubiques de (1,5 x 2 x 1) cm.



Figure 3. 20 – Scie électrique servant à découper les échantillons cubiques (Laboratoire Gem).

Après séchage total, l'échantillon est placé dans le pénétromètre (figure 3.21) qui sera scellé par la suite pour être soumis à l'injection du mercure comme le montre la figure 3.22.

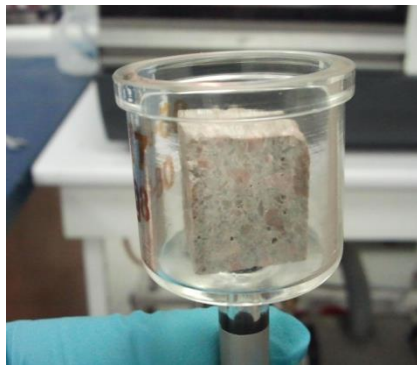


Figure 3. 21– Pénétrromètre

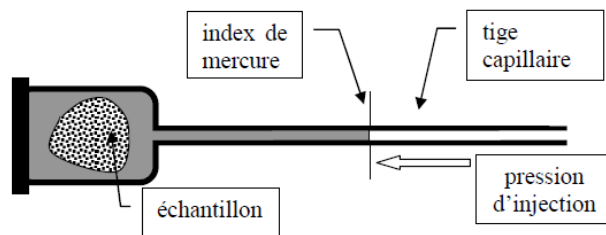


Figure 3. 22– Schéma de remplissage d'un pénétromètre

Le pénétromètre est placé en premier lieu dans le premier compartiment à basse pression (pression de 2 MPa) pour ensuite aller dans le second compartiment à haute pression pouvant atteindre les 400 MPa (figure 3.23). L'acquisition des données est faite automatiquement à l'aide d'un ordinateur connecté à l'appareil.

3.11 Relation entre concentration des chlorures et CE :

Dans cette section, nous avons essayé de trouver la relation entre la CE et la concentration des matériaux testés : sable, billes de verre, briques, mortier et béton ordinaire, avec des porosités allant de 13 à 44%.

Pour les matériaux granulaires (sable et billes de verre), les échantillons ont été placés dans la cellule en PVC de 50 mm (figure 3.5) après séchage à l'étuve à 105° C, saturés ensuite avec des solutions salines (NaCl) de concentrations : 5, 10, 20, 29,5, 58,5 et 117 g/l. L'essai est répété 3 fois pour chaque diamètre de bille ou classe de sable utilisée.

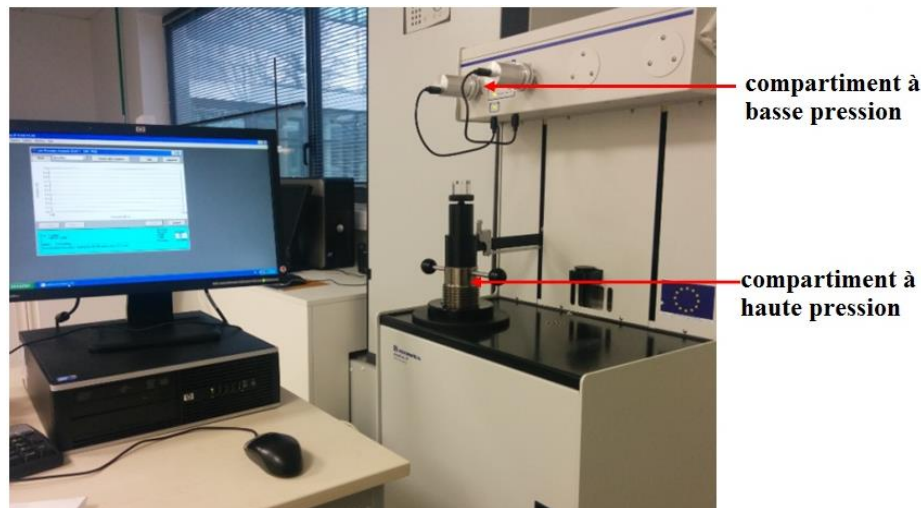


Figure 3. 23 – Porosimètre à mercure type Micromeritics (laboratoire GeM, Saint Nazaire).

Ayant une quantité réduite de billes de verres pour effectuer plusieurs essais à la fois, nous étions obligé de rincer les billes de verre avec de l'eau distillée après utilisation et les sécher à l'étuve. En ce qui concerne la brique silico-calcaire et la brique rouge en terre cuite, des échantillons de 45 mm de diamètre ont été carottés dans les briques, et ont ensuite été équipés avec des électrodes pour la mesure électrique (figure 3.18). Les éprouvettes de mortier et de béton ont été coulées dans des cellules de 110 mm de diamètre, équipées de deux électrodes, après une cure de 28 jours et un séchage à 65° C, jusqu'à stabilisation de la masse.

La saturation pour les briques et les matériaux cimentaires a été effectuée en utilisant une pompe à vide (AFPC-AFREM modifiée) avec des solutions salines de NaCl de concentration comprise entre 5 et 117 g/l.

Pour chaque concentration trois carottes de briques, séchées préalablement à 65° C jusqu'à stabilisation de la masse, sont utilisées. Pareillement pour les matériaux cimentaires, trois échantillons sont utilisés pour chaque concentration. Les mesures de la conductivité électrique (CE) ont été effectuées pour tous les matériaux et pour chaque concentration.

3.12 Essais de variation de la température :

Dans cet essai nous avons choisi de prendre trois températures, [ambiante (18°C), 30° et 40° C] et voir leurs influences sur la CE. Pour ce faire, quatre bacs en plastique ont été utilisés contenant différentes concentration de solution de NaCl (5, 10, 20, 29.5) g/l. Trois échantillons de béton ont été placés dans chaque bac de sorte qu'ils soient immergés. Tous sont saturés avec la concentration correspondante en utilisant une pompe à vide (AFPC-AFREM modifiée). Pour toutes les températures utilisées, les bacs contenant les échantillons ont été placés dans un environnement correspondant à la température voulue et ce suffisamment de temps pour que la température à l'intérieur de l'échantillon soit uniforme.

Pour la température ambiante, les bacs ont été placés au sein du laboratoire où la température de l'environnement ainsi que celle de la solution contenue dans le bac étaient contrôlées tous les jours à l'aide d'un thermomètre (moyenne de 18°C). Concernant les deux autres

températures, à savoir 30 et 40° C, une étuve automatique était utilisée pour maintenir la température voulue, là aussi les températures des solutions salines étaient mesurées tous les jours avant et après chaque essai (figure 3.24).



Figure 3. 24 – Essai de mesure de température.

Pour éviter toute possibilité d'évaporation de la solution saline, les bacs étaient en forme de récipient hermétique empêchant tout échange de fluide ou de vapeur avec le milieu extérieur. Les vis connecteurs reliés aux électrodes permettant la mesure électrique étaient protégées par de la colle silicone contre le risque de corrosion qui peut survenir suite à une exposition importante aux chlorures.

La mesure électrique était réalisée toutes les 24 heures pour suivre l'évolution de la CE sous influence de la température jusqu'à ce que la valeur de la conductivité se stabilise ; ce qui voudrait dire que la température à l'intérieur de l'échantillon est la même que celle du milieu d'immersion (solution saline).

3.13 Essais de mesure de la tortuosité :

La tortuosité est un autre facteur très important qui affecte le transport et la diffusion des chlorures en milieu poreux. Aucune méthode expérimentale n'est connue pour définir ce paramètre, cependant des relations théoriques peuvent être proposées pour le calcul de la tortuosité (chapitre 2).

Dans cette partie, la relation de Nernst-Einstein (équations 2.21, 2.28) a été utilisée pour la détermination de la tortuosité de chaque milieu poreux étudié en fonction du facteur de formation qui représente le rapport de la CE du milieu poreux saturé sur la CE_0 de la solution saturante.

Pour les billes et les classes de sables, la cellule en PVC de 50 mm de diamètre était remplie à ras avec la quantité nécessaire du matériau saturé avec une concentration donnée comprise entre 5 et 117 g/l. Les billes de verre sont rincées à l'eau distillée après chaque essai et mises à l'étuve pour le séchage.

Les carottes de briques de 45 mm de diamètre et les échantillons de matériaux cimentaires (mortier, béton) de 110 mm de diamètre, équipées de paires d'électrodes en acier inoxydable

pour la mesure électrique, étaient saturés avec les solutions salines de différentes concentrations en utilisant le principe de saturation sous vide (AFPC-AFREM modifiée).



Figure 3. 25 – Calibrage du conductimètre avec une solution de KCl.

La CE du milieu dite aussi la CE apparente est mesurée expérimentalement à l'aide du circuit électrique utilisé. La CE_0 quand à elle, est mesurée en utilisant un conductimètre numérique (Ohaus STARTER-3000C) qui a été étalonné en utilisant des solutions de KCl de concentration (0.01, 0.1, 1) mole (figure 3.25).

3.14 Essais de diffusion :

3.14.1 Préparation des cellules de diffusion:

Pour les essais de diffusion, nous avons mis en place des cellules permettant de faire une diffusion libre d'une solution saline de NaCl de concentration 29.5 g/l dans une eau distillée en premier lieu, et après dans un milieu poreux (billes de verre ou sables) saturé avec une eau distillée de concentration 0 g/l.

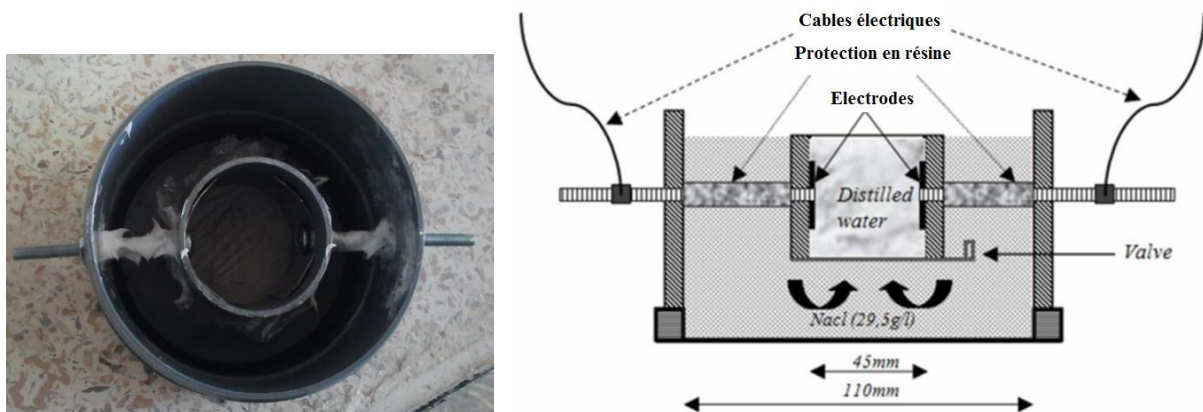


Figure 3. 26 – Cellule de diffusion libre pour une solution saline (29,5 g / l).

Les cellules comme on peut les voir dans la figure 3.26, sont constituées d'une pièce cylindrique en PVC de 45mm et de 50 mm de hauteur, équipée d'une paire d'électrodes en

acier inoxydable placée à mi- hauteur et fixée des deux cotés avec des tiges en acier sur une autre pièce en PVC de 110 mm de diamètre.

La petite cellule est équipée aussi d'un clapet fixé sur la base pour permettre le contact entre les deux volumes des cellules, elle est placée à une certaine hauteur de la base de la grande cellule de 110 mm pour permettre l'échange de particules. Les parties intérieures de la tige en contact avec la solution saline sont protégées par une matière isolante pour éviter tout risque de corrosion.

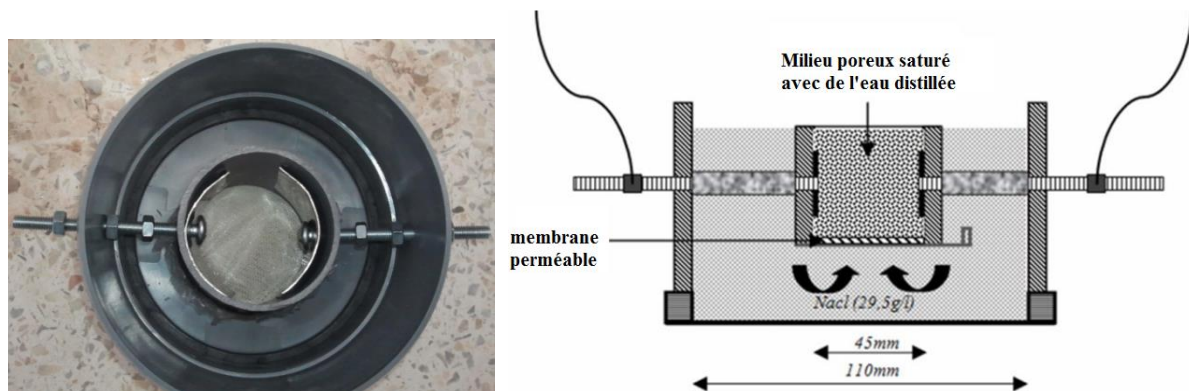


Figure 3. 27 – Cellule de diffusion cellulaire pour perles de verre et sables.

Pour les cellules utilisées pour les essais de diffusion libres dans un milieu poreux (figure 3.27), le même principe est utilisé pour mettre en place la cellule de diffusion excepté une petite membrane perméable qu'on fixe sur la base de la cellule intérieure pour contenir le matériau poreux sans pour autant perturber l'échange de particule de chlorure.

Des carottes de briques rouge et brique silico-calcaire de 45 mm de diamètre ont été préparées pour la diffusion dans les briques.

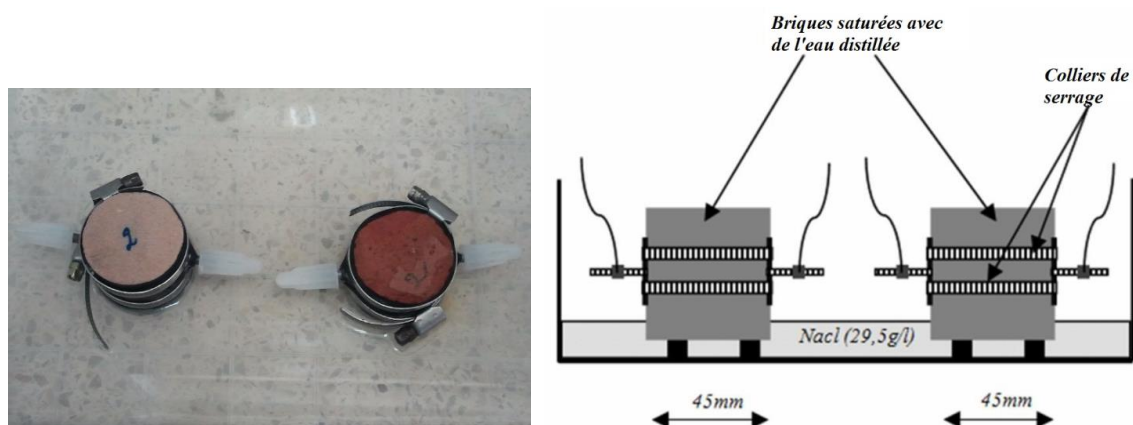


Figure 3. 28 – Tests de diffusion pour les briques.

Ces carottes sont équipées de paires d'électrodes fixées à mi-hauteur avec des colliers de serrage pour assurer un contact total de la surface de l'électrode avec la carotte. Un petit film isolant est placé entre l'électrode et le collier pour empêcher toute perturbation du signal électrique qui risque de fausser la lecture (figure 3.28).

Concernant les matériaux cimentaires, des disques de 110 mm de diamètre et de 50 mm de hauteur sont utilisés et équipés de paire d'électrodes en acier inoxydable (figure 3.29).

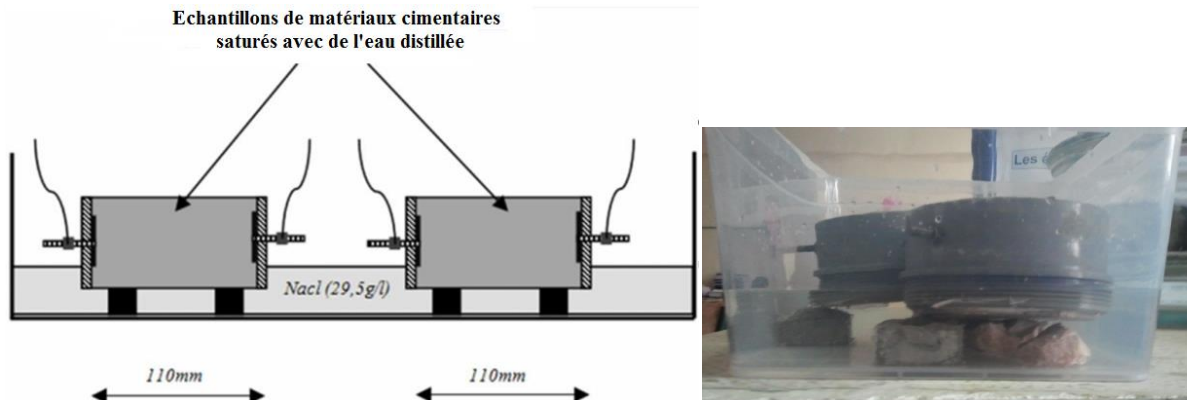


Figure 3. 29 – Tests de diffusion pour les matériaux cimentaires.

3.14.2 Essais de diffusion :

Les premiers essais de diffusion consistaient à suivre l'évolution d'une solution saline en NaCl de concentration de 29.5 g/l, mise dans la cellule de 110 mm de diamètre, dans une eau distillée placée dans la petite cellule intérieure (figure 3.26). Le clapet est ouvert délicatement pour ne pas avoir une précipitation brusque des chlorures et fausser par conséquent les résultats de l'essai.

Pour garder une concentration constante de la solution diffusante, on utilise un conductimètre numérique en vue de vérifier la CE de la solution. En cas de diminution de cette CE, on rajoute une quantité de sel dans la solution puisque nous étions dans l'incapacité de changer la solution pour une question d'équilibre de pression. La mesure électrique se fait en plaçant la cellule de diffusion dans le circuit électrique. La lecture nous donne la valeur de la conductivité de la solution présente dans la cellule intérieure. Le conductimètre est utilisé également pour avoir une mesure directe de la conductivité de la même cellule intérieure. Et pour comparer avec la mesure indirecte, la mesure est prise toutes les heures pendant le premier jour puis toutes les 24 heures.

Pour les billes de verre, nous avons choisi de procéder aux essais de diffusion que sur les diamètres 1.5 et 2 mm parce qu'ils étaient en quantité suffisante. Les billes sont placées dans la cellule intérieure où on trouve une petite membrane perméable, fixée à la base et un clapet pour permettre l'échange de particules de chlorure (figure 3.27). Les billes sont saturées en eau distillée et solution saline NaCl à 29.5 g/l et sont placées dans la cellule extérieure. Le clapet est ouvert délicatement pour lancer l'essai de diffusion. La même procédure est réalisée pour le sable de classe (1 – 2) mm. La concentration de la solution diffusante est contrôlée avec le conductimètre et la mesure électrique est effectuée avec le circuit adopté (figure 3.30) pendant toutes les heures pour le premier jour ensuite toutes les 24h.

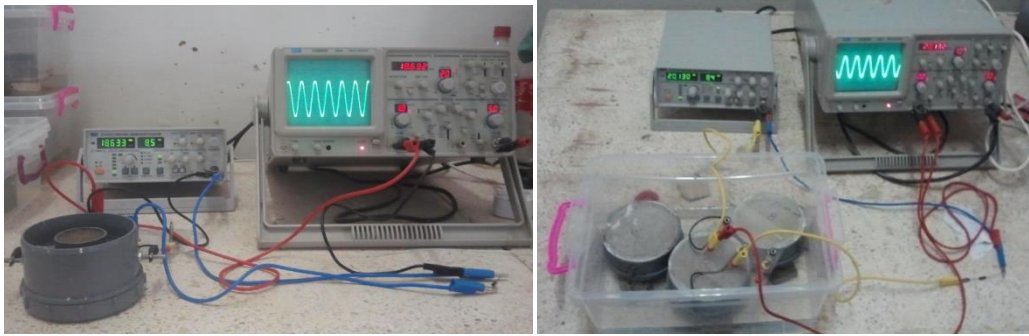


Figure 3. 30 – *Mesures électriques pour les essais de diffusion.*

Concernant les échantillons de briques et de matériaux cimentaires, ils sont saturés avec de l'eau distillée par saturation sous vide (AFPC-AFREM modifiée) puis placés dans des bacs contenant une solution diffusante de NaCl de 29.5 g/l. Trois échantillons de chaque matériau ont été utilisés pour l'essai de diffusion.

Pour le mortier, deux groupes d'échantillons placés dans des bacs différents ont fait l'objet de tests pour la diffusion. Les groupes d'échantillons avait les électrodes placées respectivement à 1.5 cm et à 3.5 cm de la base de l'échantillon. La CE est contrôlée régulièrement avec le conductimètre. Là encore, la mesure est effectuée toutes les heures pendant la première journée ensuite toutes les 24 heures (figure 3.30).

3.15 Titration des chlorures :

Les chlorures ont clairement été identifiés comme étant l'élément déclencheur du processus chimique menant à la corrosion. Lorsqu'ils se trouvent en quantité suffisante autour des barres d'acier, les chlorures peuvent se trouver dans le milieu poreux cimentaire sous plusieurs formes: libres, capables de se déplacer dans la phase liquide sous gradient de concentration et qui sont en général les agents importants dans les processus de corrosion des armatures ou fixés, interagissant avec les hydrates du ciment par des réactions physico-chimiques. La somme de ces deux états de forme de chlorures, représente les chlorures totaux.

Le travail concernant cette partie a également été réalisé au sein du laboratoire GeM. Il s'est focalisé sur la détermination de profils de concentrations des chlorures présents dans nos échantillons de mortier et de béton de 110 mm de diamètre et 50 mm de hauteur équipées de deux électrodes en acier inoxydable. Ce sont les échantillons qui ont déjà subi une phase de diffusion d'une durée de plus de 12 mois dans une solution saline en NaCl de concentration 29,5g/l.

Tout d'abord, un prélèvement de poudre est effectué suite à un grignotage à sec de l'échantillon (figure 3.31) à différentes profondeurs : 5, 10, 15 et 20 mm.



Figure 3. 31– Grignoteuse.



Figure 3. 32– Poudre servant à la titration.

La poudre issue de chaque grignotage (figure 3.32) est récupérée et stockée dans de petits sacs hermétiques (figure 3.33). La mesure de la profondeur se fait après chaque grignotage avec un pied à coulisse (figure 3.34).

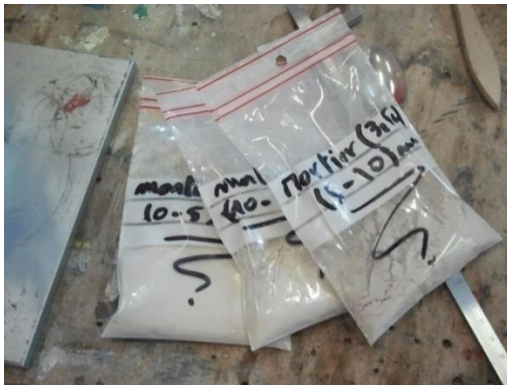


Figure 3. 33 – Stockage de la poudre du matériau.



Figure 3. 34 – Mesure de la profondeur du Grignotage

L'étape de mise en solution des chlorures totaux et libre se fait selon les modes opératoires suivant (Tahlaiti 2010) :

- Chlorures totaux :

Prendre une masse de 5 g de poudre (<0.315 mm), placée dans un bécher pour le dosage. Les étapes décrites ci-dessous ont été réalisés dans un local dont la température est de $20 \pm 2^\circ\text{C}$:

- Ajouter 50 ml d'eau distillée.
- Mettre la poudre en suspension en plaçant le bécher sur une plaque d'agitation magnétique pendant 2 minutes.
- Ajouter ensuite 100 ml d'acide nitrique dilué, obtenus en versant 20 ml d'acide HNO_3 concentré dans 80 ml d'eau distillée.

- Maintenir l'agitation pendant 30 minutes. Si la plaque d'agitation magnétique est chauffante, il est possible, sans incidence sur le résultat final, d'effectuer cette opération à une température d'environ 80° C (figure 3.35).

- Filtrer la solution, rincer soigneusement avec de l'eau distillée et compléter le filtrat jusqu'à 250 ml (V_{fiote}) dans une fiole jaugée.

- Chlorures libres :

La mise en solution des chlorures libres se fait comme suit :

- Prélever 5g de poudre relative à la profondeur voulue et mettre dans un bécher de 250 ml de volume,

- Ajouter 200 ml d'eau distillée et placer le bécher sur une plaque d'agitation magnétique pendant 3 minutes,

- Filtrer la solution. Ne rincer qu'une seule fois le bécher en utilisant environ 10 ml d'eau distillée. Ce volume a été sciemment limité pour éviter toute extraction supplémentaire de chlorures par dissolution des chloro-aluminates,

- Ajouter 2 ml d'acide concentré pour acidifier le milieu afin de stabiliser les chlorures en solution.

- Compléter le filtrat jusqu'à 250 ml (V_{fiote}) dans une fiole jaugée.



Figure 3. 35 – Agitation magnétique sous 80° C

Après avoir terminé la filtration, les solutions sont stockées dans des bocaux hermétiques comme on peut le voir sur la figure 3.36. Pour la titration des chlorures, nous avons prélevé une quantité de 50 ml de chaque solution à l'aide d'une pipette, cette quantité est mise dans un récipient qui est ensuite placé dans le titrimètre. Cette opération est répétée 2 à trois fois pour chaque solution (figure 3.37).

La concentration en chlorures totaux (C_t) est exprimée en gramme Cl^- pour 100 g de la poudre béton, par l'application de l'équation (3.5) :

$$C_t = 100 * 35,5 * C_{Ag} * V_e * 10^{-3} * \frac{1}{M_{pe}} * \frac{V_{fiote}}{V_{prélevé}} \quad (3.5)$$



Figure 3. 36– Stockage des filtrats.

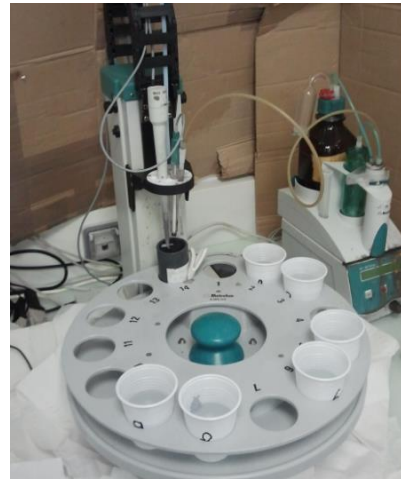


Figure 3. 37– Titration des chlorures.

M_{pe} : masse de poudre prélevée à 1md prés,

C_{Ag} (N) : concentration de la solution de nitrate d'argent utilisée pour la titration,

V_e (ml) : volume de nitrate d'argent ajouté,

$V_{prélevé}$ (ml) : volume du filtrat prélevé (50 ml),

3.16 Conclusion:

Après avoir mis en revue le programme expérimental préconisé pour notre travail et les procédures de mesure utilisées, nous pouvons retenir pour conclure ce chapitre, les informations suivantes :

Tout d'abord que le circuit utilisé ne mesure que la résistance électrique et donc l'impédance mesurée est purement résistive. En appliquant cette méthode, on ne prend pas en considération les autres phénomènes qui peuvent survenir dans les matériaux poreux comme la capacitance ou la réactance.

Le choix des matériaux a été fait de telle sorte à couvrir une gamme de porosité assez large et diversifiée, et pour qu'on puisse appliquer cette méthode à un maximum de milieux poreux.

La solution de saturation a été choisie en fonction des sels les plus dominants dans notre région à savoir le NaCl. La concentration a aussi été choisie en fonction de la mer méditerranée qui est de 29.5 g/l ; mais nous avons aussi brassé large en faisant varier la quantité de chlorures. Les essais de mesures de la porosité et de tortuosité ont été effectués parce que ces deux paramètres sont très importants, dans le domaine de l'écoulement à travers des milieux poreux, puisqu'ils gouvernent le transfert des électrolytes dans leur structure porale. Et enfin la confection des cellules de diffusion s'est basée sur la recherche bibliographique établie dans le chapitre 2. Grâce à cet état de l'art, nous avons pu faire des essais de diffusion unidirectionnels dans un régime transitoire pour tous les matériaux étudiés. La méthode choisie nous a permis de faire le suivi de cette diffusion à travers le temps en faisant une simple mesure électrique.

CHAPITRE IV

CHAPITRE IV : RESULTATS ET DISCUSSIONS

4.1 Introduction :

L'objet de ce chapitre est d'évaluer les caractéristiques physiques des milieux poreux par une méthode non destructive. En premier lieu, nous allons mettre en pratique le montage électrique qui servira à effectuer les mesures, le calibrer et aussi voir quels paramètres devrât-on étudié pour avoir une méthode opérationnelle et fiable.

Ensuite, nous allons nous intéresser à la structure interne des matériaux étudiés en évaluant d'abord la porosité accessible à l'eau par deux méthodes directe et indirecte ; mais aussi la porosité accessible au mercure, et après la tortuosité est déterminée d'une manière expérimentale. Nous verrons en détail, comment quantifier la concentration du NaCl à l'intérieur d'un matériau poreux par le biais de la méthode électrique adoptée.

Et enfin, nous étudions la diffusion des chlorures dans les milieux poreux totalement saturés, pour déterminer les coefficients de diffusion effectifs correspondants tout en étudiant l'influence de quelques paramètres comme la tortuosité et la porosité sur le phénomène de diffusion.

4.2 Calibrage du circuit :

4.2.1 Essais préliminaires :

Le tableau 4.1, présente quelques exemples de mesures préliminaires effectuées au début de notre programme expérimental. Ce tableau englobe les valeurs pratiques de R_x en fonction des valeurs réelles ou théoriques de R_x où R varie entre $10 \Omega - 100 \text{ k}\Omega$, et ce en prenant compte de la condition principale du montage utilisé, à savoir $R \ll R_x$.

A première vue, nous remarquons que les valeurs pratiques se rapprochent considérablement des valeurs réelles, avec un rapport compris entre 0,92 et 1,11. Ce qui confirme la validité de la méthode choisie et nous assure que le montage effectué fonctionne parfaitement. Cependant, ce que nous remarquons aussi c'est que la précision des valeurs varie avec l'écart entre la composante R et R_x ; plus l'écart est important et plus la précision diminue, par exemple en comparant ($R= 100 \Omega$, $R_x= 1 \text{ k}\Omega$) avec ($R= 100 \Omega$, $R_x= 1 \text{ M}\Omega$), nous pouvons clairement constater que la précision est moindre lorsque l'écart entre R et R_x est important.

Un premier effet de la fréquence est étudié aussi dans cette partie de calibrage en faisant varier la fréquence entre 1 Hz et 1 MHz, les valeurs sont généralement constantes entre 10Hz et 100 kHz et totalement indépendantes de la fréquence, au delà de ce domaine. On observe une légère différence dans les valeurs mesurées de R_x , cette différence peut être expliquée par l'effet de la fréquence ; cela veut dire que les valeurs de R_x deviennent dépendantes de la fréquence, prenant parfois des valeurs plus grandes que la valeur initiale de R_x ou plus petites.

Tableau 4. 1 Résultats préliminaires, utilisant le circuit à multimètres.

Valeur de R (Ohms Ω)	Valeur exacte de R_x (Ohms Ω)	Fréquences (Hz)						
		1	10	100	1 k	10 k	100 k	1 M
		Valeur trouvée de R_x (Ohms Ω)						
10	100	/	100.11	100.09	100.09	100.09	100.09	100.02
10	1 k	/	1.11	1.11	1.11	1.11	1.11	1.102
10	10 k	/	9.87	9.87	9.87	9.86	9.85	9.83
10	100 k	/	94.6	95.57	98.57	98.55	98.5	105.49
10	1 M	/	0.904	0.943	0.953	0.953	0.931	0.891
100	1 k	/	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06	1.112
100	10 k	/	9.8	9.78	9.78	9.77	9.77	9.2
100	100 k	/	95.49	95.47	95.47	95.47	95.47	95.45
100	1 M	/	0.963	0.963	0.962	0.962	0.962	0.953
1 K	10 k	/	10.12	10.12	10.12	10.12	10.1	10.08
1 K	100 k	/	95.4	95.1	94.6	94.58	94.56	94.5
1 K	1 M	/	0.930	0.930	0.930	0.927	0.927	0.927
10 K	100 k	/	100.76	100.75	100.75	100.75	103.54	105.52
10 K	1 M	/	0.950	0.952	0.949	0.947	0.948	0.927
100 K	1 M	/	0.960	0.967	0.95	0.97	0.97	0.94

D'autres essais préliminaires, dont quelques résultats sont représentés dans le tableau 4.2, ont été effectués afin de voir quel montage entre celui avec l'oscilloscope ou bien les multimètres doit-on utiliser.

Tableau 4. 2 Résultats de comparaison entre l'oscilloscope et les multimètres.

R (Ohm)	R_x réelle (Ohm)	R_x mesurée au multimètre (Ohm)	R_x mesurée au l'oscilloscope (Ohm)
100	1 k	0.809 k	1.066 k
200	10 k	10.6 k	9.95 k
10	500	440	476.15
220	20 k	18,58	19,23
225	50K	43,21	46,34

Les résultats de cette partie, montrent que les valeurs trouvées avec l'oscilloscope sont plus proches des valeurs réelles de R_x par rapport à celles trouvées en utilisant les multimètres. Nous déduisons que le circuit utilisant l'oscilloscope est plus précis que où la mesure se fait avec les multimètres même si l'erreur de lecture peut être considérable puisqu'elle dépend de l'utilisateur. Donc pour toutes les mesures électriques qui suivent, le circuit utilisant l'oscilloscope est adopté.

4.2.2 Influence de la fréquence :

L'exemple suivant est une mesure de R_x avec une résistance $R=15$ Ohms en faisant varier la fréquence de 1Hz à 1MHz. Les résultats obtenus sont représentés dans la figure 4.1.

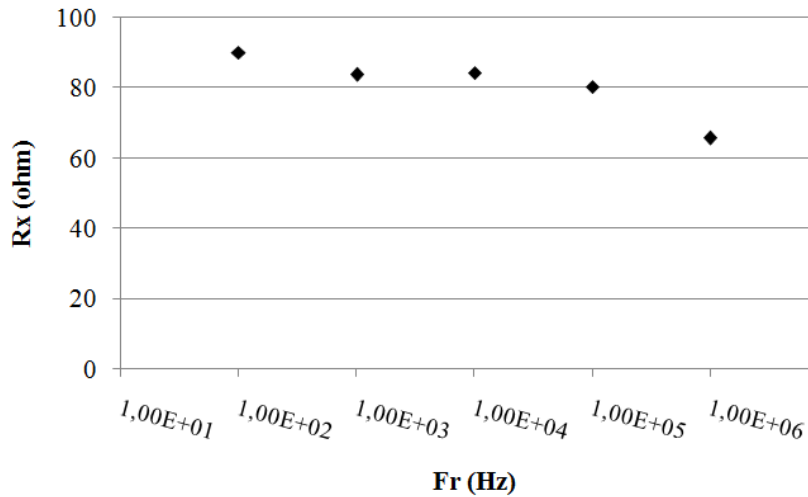


Figure 4. 1 – Influence de la fréquence (phase de calibration).

On remarque que la valeur de R_x est relativement constante dans l'intervalle 1 kHz à 100 kHz ; par contre, en dehors de cette fourchette, les valeurs de R_x se dispersent. Il est donc recommandé, au regard de ces essais préliminaires ayant servi à calibrer le circuit, de travailler dans l'intervalle des fréquences : [1 - 100 kHz] pour avoir une meilleure précision dans la mesure des résistances.

4.2.3 Influence de la tension V_{pp} :

Les figures 4.2, 4.3, et 4.4, représentent quelques exemples de mesures de la résistance R_x , pour différentes valeur de R sous une fréquence de 1 kHz, en fonction de la variation de la tension du générateur V_{pp} . Ces essais nous sont utiles, pour calibrer le circuit électrique choisi. A cette étape, ce calibrage consiste à trouver des valeurs de R_x pratiques se rapprochant le plus possible des valeurs réelles.

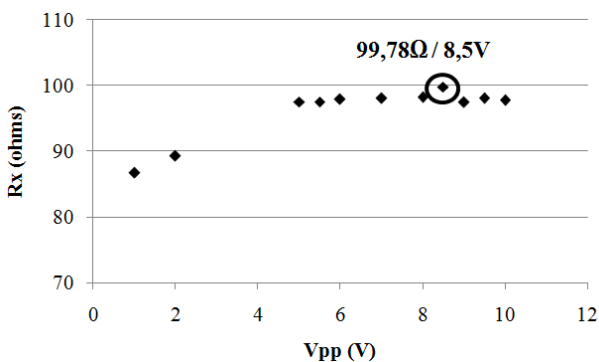


Figure 4. 2 – Variation de V_{pp} pour les composantes $R=15\Omega$, $R_x=100\Omega$, $Fr =1$ kHz

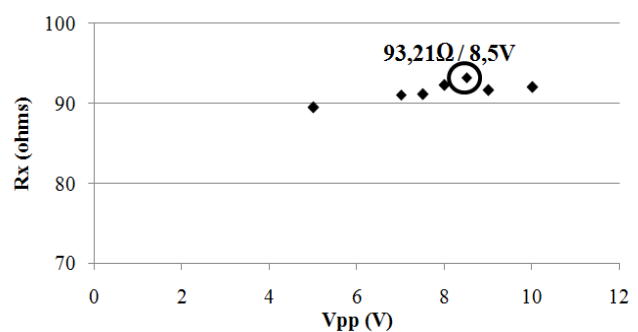


Figure 4. 3 – Variation de V_{pp} pour les composantes $R=5\Omega$, $R_x=100\Omega$, $F=1$ kHz

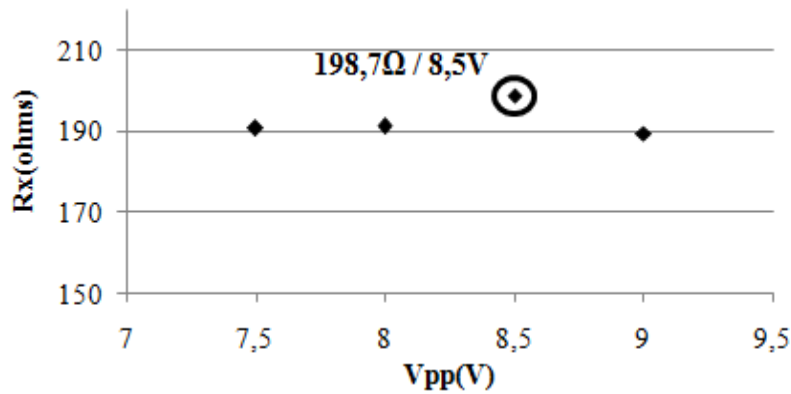


Figure 4. 4 – Variation de V_{pp} pour les composantes $R = 5\Omega$, $R_x = 220\Omega$, $f_r = 1$ kHz.

Les figures montrent clairement l'influence de ce paramètre V_{pp} sur nos mesures. Il est clair que c'est la valeur de 8.5 Volts qui donne les résultats de R_x les plus proches des vraies valeurs de la composante placée dans R_x . Si on prend l'exemple de $R_x = 100$ Ohms (valeur réelle), pour $V_{pp} = 8,5$ Volts, R_x équivaut à 99,78 Ohms.

Bien entendu, les paramètres fréquence électrique et tension du générateur étudiées, dans cette partie du calibrage, sont spécifiques pour notre circuit de mesure avec notre propre montage et nos propres composantes électriques. Il se pourrait que pour un autre montage, ces paramètres soient différents. La recherche bibliographique vient consolider cette idée, puisque chaque manipulation ou chaque méthode de mesure a ses propres paramètres. (McCarter et Starrs 1997) a utilisé une valeur de tension de 1 Volt avec une fréquence de 1 kHz. En revanche, (McCarter, Chrisp et col., 2005) ont travaillé avec signal de 100 mV sous une fréquence de 100 kHz. (Neithalath, 2007) quand à lui a utilisé une valeur de tension de 250 mV avec les fréquences [10 MHz, 1 MHz, 10 Hz et 1 Hz]. (Neithalath et Jain, 2010a) ont fixé la tension du générateur à 250 mV dans un domaine de fréquences de [10 Hz – 1 MHz]. On trouve également des valeurs de tensions du générateur, appliquées au circuit de mesure variant entre [1 – 10] V en courant alternatif (Whiting and Nagi 2003).

Les essais préliminaires réalisés jusque là, nous ont permis de constater un autre phénomène pouvant perturber les résultats, qui est le choix de la valeur de la petite résistance R . En effet, un certain rapport de grandeur entre R et R_x doit être maintenu, sinon les valeurs divergent. D'après les résultats trouvés, nous remarquons qu'il faut respecter l'intervalle : $5R \leq R_x \leq 15R$.

Ceci explique l'erreur qui augmente avec l'écart entre les deux résistances du circuit utilisé.

4.3 Essais sur solution et choix du type d'électrodes :

Les tableaux 4.3 et 4.4 présente des exemples de résultats des mesures de résistance effectuées sur des solutions salines en faisant varier la petite résistance R et en appliquant les paramètres $f_r = 1$ kHz et $V_{pp} = 8,5$ V. Nous avons utilisé pour ce faire, deux cellules (voir figures 3.6 et 3.7), l'une équipée d'électrodes en cuivre et l'autre en acier inoxydable. L'essai est répété plus de trois fois pour s'assurer de la fiabilité de la mesure.

Tableau 4. 3 Résultats de mesure de R_x d'une solution en NaCl à 5 g/l avec $R = 10\Omega$

N° d'essai	1	2	3	4	5	6
R_x cuivre (Ω)	86,53	79,40	78,64	60,75	55,52	55,29
R_x inox (Ω)	33,51	33,79	34,52	34,84	35,84	35,60

Nous remarquons très vite que les résultats de la cellule équipée d'électrodes en cuivre sont dispersés par rapport à ceux mesurés aux électrodes en inox qui montrent une plus grande stabilité (R_x avoisine en moyenne les 35Ω).

Tableau 4. 4 Résultats de mesure de R_x d'une solution de NaCl à 5g/l avec $R = 15\Omega$

N° d'essai	1	2	3	4
R_x cuivre (Ω)	55	54,58	75,85	67,14
R_x inox (Ω)	35,22	35,43	35,40	37,62

Le tableau 4.5 présente les résultats de mesures de R_x effectués sur une solution de NaCl de 10g/l en faisant varier la fréquence entre 1, 10 et 20 kHz, avec $R = 5\Omega$ et $V_{pp} = 8,5V$. Le même essai est répété plus de 3 fois pour une meilleure reproductibilité. Une légère différence est remarquée dans les valeurs trouvées, due probablement aux incertitudes de mesures ; la valeur de R_x s'est affiné encore plus avec $R = 5\Omega$ pour une solution en NaCl de 10g/l et tourne aux environs de 26Ω .

Ces essais nous ont permis de conclure que les électrodes en cuivre étaient peu fiables par rapport aux électrodes en inox. Ces dernières sont donc choisies pour le reste de notre travail car elles sont adaptées à nos mesures électriques. Nous constatons aussi, que la fréquence n'a pas vraiment d'influence sur R_x tant qu'on demeure dans l'intervalle retenu après les essais préliminaires.

Tableau 4. 5 Résultats de variation de la fréquence pour la mesure de R_x pour une solution de NaCl de concentration 10 g/l.

Fréquence (kHz)	1	2	3	4	5
1	29,12	26,95	26,22	26,42	26,97
10	28,52	26,30	25,76	25,57	26,11
20	28,02	25,9	26,36	25,29	26,68

4.4 Mesure de la conductivité électrique CE :

La figure 4.5 présente les valeurs de la CE mesurées dans une solution de NaCl à différentes concentration [5 - 117] g/l. Cette variation est représentée par une tendance linéaire croissante qui confirme que la conductivité électrique d'une solution croit proportionnellement avec l'augmentation de la concentration de la solution.

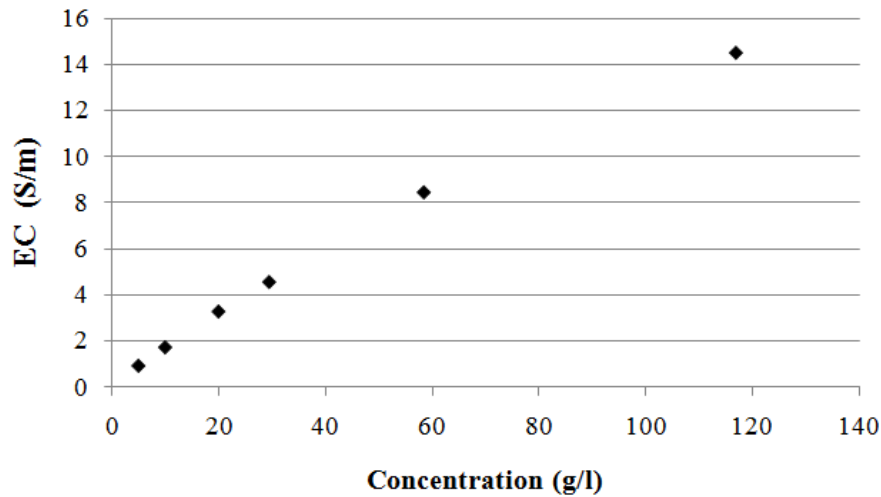


Figure 4. 5 – Mesure de CE pour une solution de NaCl à différentes concentrations.

Pour caractériser la CE en utilisant notre circuit électrique qui mesure plutôt une résistance, nous passons par l'équation 2.3 qui lie ces deux grandeurs par un facteur géométrique K , appelé constante de cellule et exprimé par le rapport de la distance séparant les électrodes (l) sur la surface des électrodes (A). Pour des électrodes de (50 x 30) mm et une cellule de 50 mm de diamètre, K a la valeur de 22,457.

Pour s'assurer de la fiabilité de notre circuit, nous tentons de déduire la constante K expérimentalement. Pour cela, nous avons effectué des mesures de résistance R_x pour des solutions de NaCl à différentes concentrations et calculer par la suite K via l'équation 2.3, tout en ayant déjà mesuré les CE des solutions avec un conductimètre. Une résistance R de 1Ω a été utilisée avec une fréquence de 20 kHz et V_{pp} de 8,5V. Les résultats obtenus sont représentés dans le tableau 4.6:

Tableau 4. 6 Calcul expérimental de la constante de cellule K .

C (g/l)	5	10	20	29,5	58,5	117
R_x (Ω)	23,2	12,68	6,8	5,4	3,44	2,11
CE (S/m)	0,95	1,75	3,3	4,68	8,46	14,5
K	22,04	22,19	22,44	25,272	29,10	30,6

Au vu des résultats du tableau 4.6, il apparaît que les valeurs de la constante de la cellule sont plus proches pour les petites concentrations que pour les grandes ($K= 22,45$). Par contre pour les grandes concentrations, la valeur est relativement éloignée. Cela est peut être encore dû aux incertitudes des résistances utilisées.

4.5 Influence de la fréquence sur la mesure électrique dans les matériaux poreux :

Un grand nombre de tests de variation de la fréquence électrique effectués sur nos matériaux, saturés avec des solutions de NaCl à différentes concentrations, nous a permis de constater l'influence de la fréquence sur la CE. La figure 4.6 est un exemple, parmi les essais réalisés,

sur des billes de verre de 4 mm de diamètre, saturées avec du NaCl à 117 g/l. Il est à noter que la conductivité électrique augmente avec la fréquence et se stabilise à un certain niveau, puis continue d'augmenter de façon exponentielle. La même tendance a été observée dans de nombreux travaux comme ceux de (Rinaldi et Cuestas, 2002; Bezzar et Ghomari, 2009; Bezzar et Ghomari, 2013). Ce palier constitue la conduction ohmique, où la loi d'Ohm est valide et reste totalement indépendante de la fréquence. Par conséquent, la gamme de fréquences appropriées pour notre programme expérimental s'inscrit dans l'intervalle : 0,5 – 50 kHz.

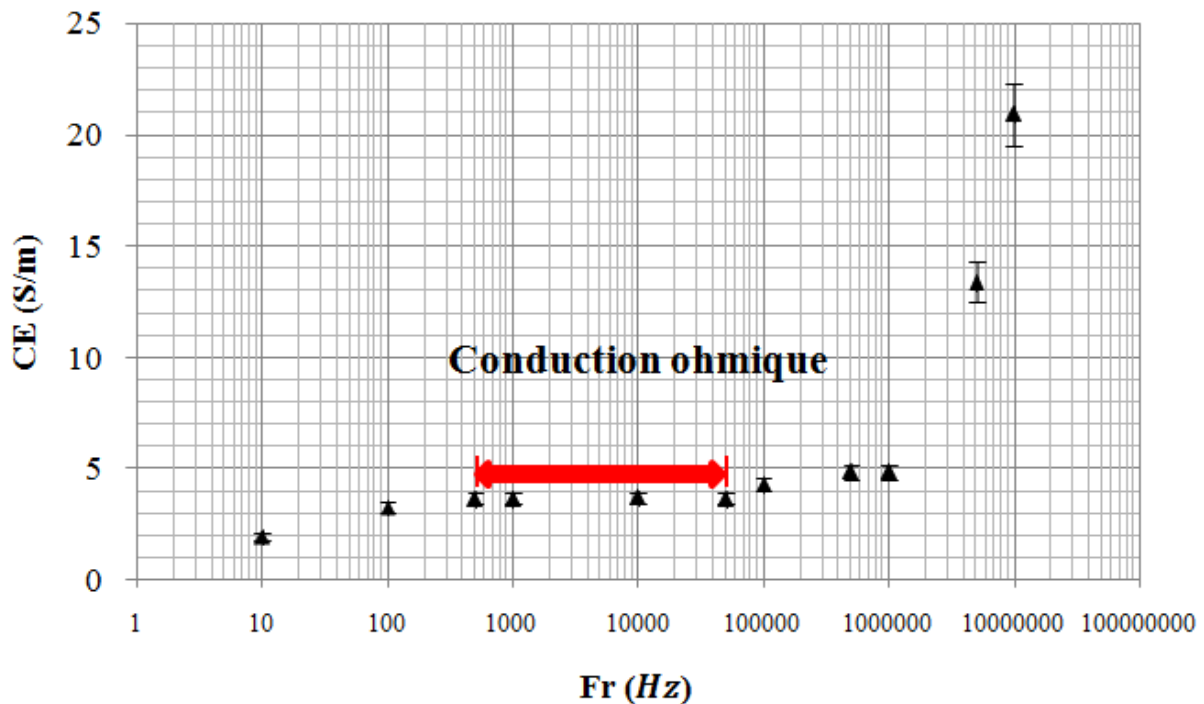


Figure 4. 6 – Variation de la CE en fonction de la fréquence pour des billes de verre de 4mm de diamètre saturées avec une solution en NaCl de 117 g/l.

4.6 Mesure de la porosité :

4.6.1 Porosité accessible à l'eau :

Les premiers essais de porosité sur matériaux ont été effectués sur les billes de verre dont les diamètres varient de 1.5, 2, 3 et 4 mm par voie directe, employant juste des rapports de volume. Ces résultats vont nous servir pour comparer avec les mesures électriques.

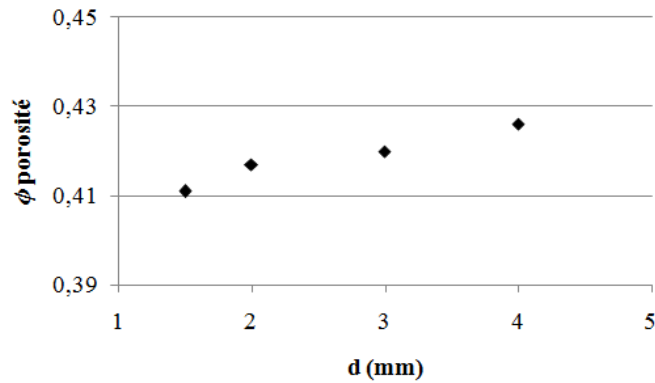


Figure 4. 7 – *Mesure directe de la porosité pour les billes de verre.*

La figure 4.7 représente la variation de la porosité en fonction du diamètre des billes de verre. On remarque que la porosité augmente légèrement avec la taille des billes ; mais la différence reste tout de même très petite à cause des diamètres qui sont relativement proches entre eux. L'important c'est que la taille des grains est liée intimement à la porosité. Les valeurs de porosité obtenues pour nos billes de verre varient pour ces premiers essais entre 0,41 et 0,43. (Friedman et Robinson, 2002) ont montré pour leurs études sur les propriétés des sols que la porosité des perles de verre utilisées variaient dans la fourchette : 0,38 – 0,40. Une autre étude de (Deleporte, 2003) a montré que dans le cas d'un empilement de sphères de même rayon, la valeur connue de la porosité est de 0,26. Ce qui se passe en pratique lors d'un remplissage d'un récipient avec des billes d'un même diamètre c'est que l'on obtient un empilement désordonné de porosité comprise entre 0.36 et 0.41.

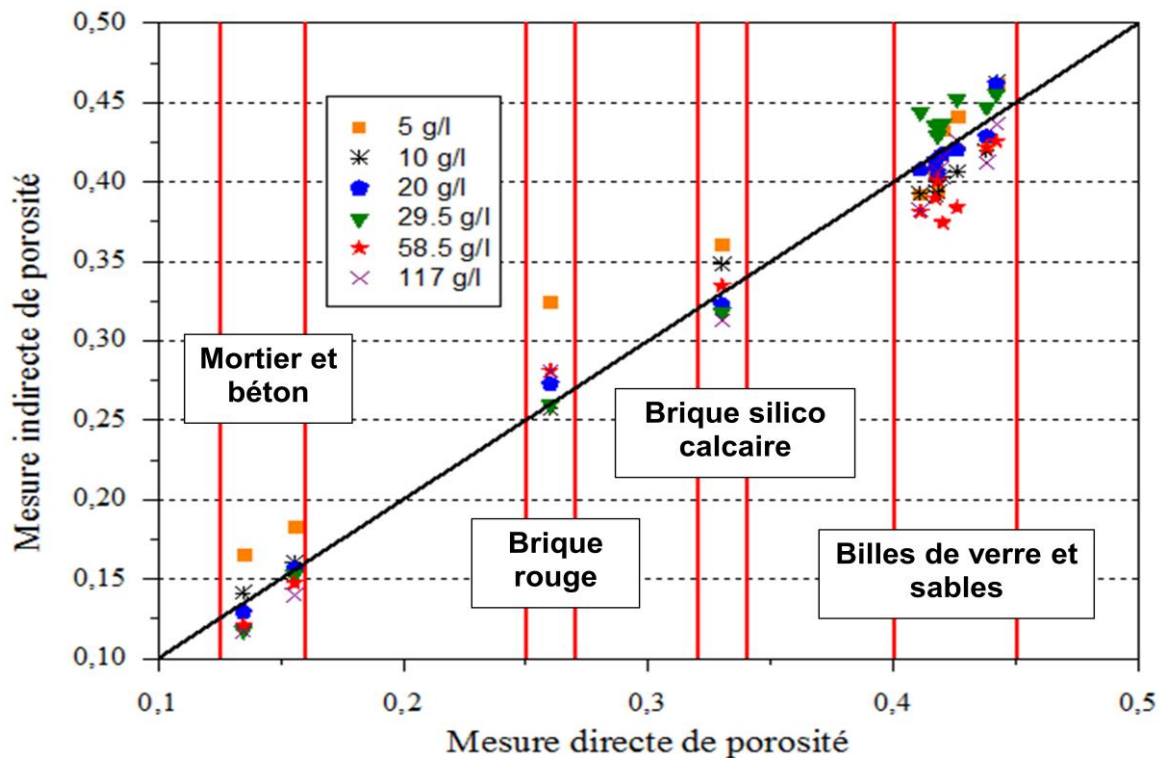


Figure 4. 8 – *Relation entre les valeurs de porosité mesurées par les méthodes directe et indirecte.*

La figure 4.8 illustre la relation entre les porosités trouvées par la méthode directe qui sont présentées sur l'axe des abscisses et les porosités déterminées par la méthode électrique présentées sur l'axe des ordonnées. Chaque point de la figure représente la moyenne de trois essais. Le premier nuage de points représente la porosité des billes de verre avec les quatre diamètres étudiés ainsi que les trois classes de sables, cette porosité est comprise entre 0.37 et 0.46 avec une incertitude de 8% sur la mesure électrique, résultats semblables à ceux trouvés dans la littérature en particulier dans les travaux de (Friedman et Robinson, 2002) où $0.37 \leq \phi \leq 0.45$ pour les billes de verre et $0,39 \leq \phi \leq 0,47$ pour les sables.

La ligne médiane qu'on peut voir sur la figure 4.8, représente l'égalité parfaite entre les valeurs trouvées par les deux méthodes, et donc l'interprétation des valeurs de porosité sera donc par rapport à cette ligne, plus les valeurs s'en rapprochent et plus la précision est meilleure. Il est à noter que pour les porosités de valeurs supérieures à 0.33, le rapprochement des valeurs trouvées par les deux méthodes est meilleur pour toutes les concentrations. D'autre part, pour les matériaux ayant des porosités inférieures à 0.33, les valeurs indirectes de la porosité sont légèrement dispersées pour la concentration de 5 g/l.

Les porosités trouvées pour les briques sont de 0.33 pour la brique silico-calcaire et 0.26 pour la brique rouge (Nasrallah et Arnaud, 1989) ; pour le béton et le mortier, elle est de 0.134 et 0.156, respectivement, valeurs qui demeurent dans l'ordre de grandeur trouvé dans la littérature. (De Larrard, 1999; Msaad, 2005; Boukli Hacène, 2009; Chindaprasirt et Rattanasak, 2011).

La porosité indirecte a été obtenue en utilisant l'équation de la loi classique d'Archie (équation 2.11) en faisant varier le facteur m , afin d'avoir des valeurs de porosité indirectes aussi proches que possible des valeurs directes. Les meilleurs résultats ont été obtenus avec des facteurs $m = 1.45$ pour les sables, $m = 1.35$ pour les perles de verre, $m = 2.3$ pour la brique silico-calcaire et $m = 2.5$ pour la brique rouge. Cela correspond bien avec les paramètres trouvés dans la littérature qui donnent pour différents milieux poreux $1.3 < m < 2.5$ (Friedman, 2005). Cependant, l'utilisation de la même loi classique avec des matériaux à base de ciment est déconseillée en raison de valeurs aberrantes trouvées.

Une autre forme de la loi d'Archie est connue, comprenant d'autres facteurs de correction (a, m, n) (équation 2.13). L'emploi de cette nouvelle forme pour les matériaux à base de ciment, en particulier pour les bétons, a pu être validé par (Naar 2006) après un travail approfondi sur la variation des facteurs (a, m, n) pour les matériaux cimentaires ; pour le béton $a = 0.028$, et m prend des valeurs > 3 , et peut aller jusqu'à 4,6 ($n \approx 2$). D'un autre côté (Snyder, Feng et col., 2003) ont trouvé que dans le cas où la résistivité électrique du fluide varie entre 0,03 et 0,27 alors a varie de 0,1 à 0,8. Dans la présente étude, nous avons pris $m = 3$ avec $a = 0,1$ pour le mortier et $m = 3,5$ avec $a = 0,028$ pour le béton.

En vue des résultats de porosités obtenues pour nos matériaux, on peut dire que ce paramètre a été estimé avec succès en fonction de notre circuit électrique puisqu'un rapport moyen

remarquable compris entre [0,9 et 1,1] a été noté entre les valeurs directes et les valeurs indirectes

4.6.2 Porosité accessible au mercure :

La figure 4.9 représente la distribution des pores dans les matériaux étudiés : (a) le mortier et (b) le béton, obtenue à partir de l'essai d'intrusion au mercure qui constitue l'un des principaux outils d'investigation de la microstructure des matériaux poreux. Le point maximal sur les deux courbes représente le point d'inflexion de la courbe du volume d'intrusion en fonction de la pression d'injection, qui est le diamètre critique. Sa valeur pour le mortier est de 26 nm et de 62 nm pour le béton. Il peut être utilisé pour le calcul de la perméabilité ou bien la porosité à travers le modèle de Katz-Thomson, basé sur le facteur de formation.

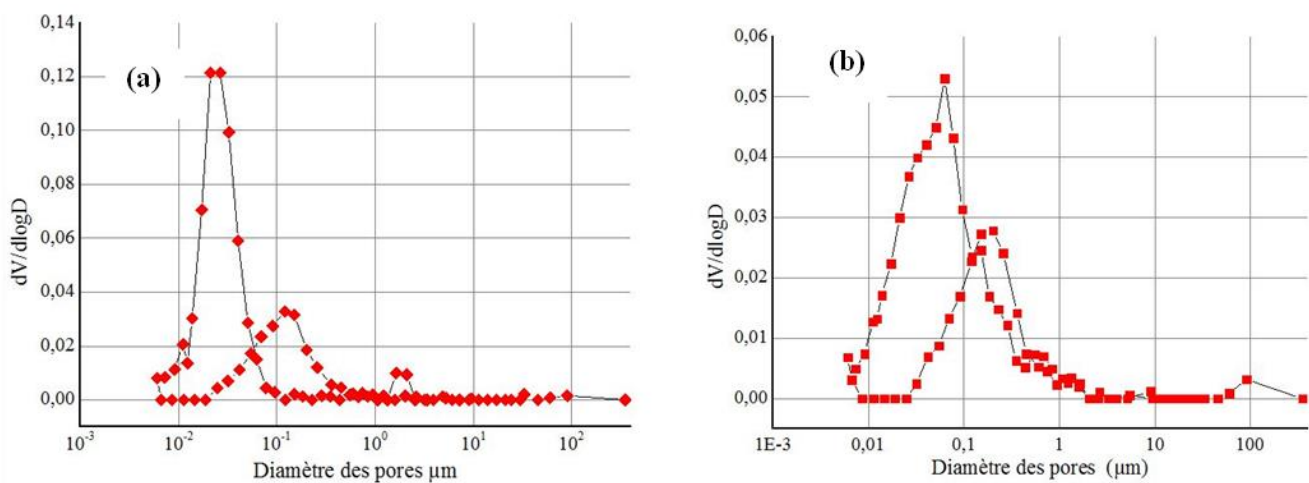


Figure 4. 9 – Distribution de la taille des pores, obtenue par intrusion au mercure sur (a) mortier et (b) béton.

La valeur de ce diamètre varie selon les formulations adoptées et les matériaux utilisés (El-Dieb et Hooton, 1994; Nokken et Hooton, 2008). La distribution sur les figures est une distribution bimodale, avec un pic (diamètre critique) qui représente le seuil de pénétration du mercure dans les pores du matériau, le second pic représente le diamètre dominant dans la microstructure, c'est-à-dire que ces pores sont les plus empruntés par le mercure lors de l'injection. Ce diamètre dominant équivaut 100 nm pour le mortier et environ 300 nm pour le béton.

La figure 4.10 représente la distribution porale des briques silico-calcaires et briques en terre cuite. Pour la brique rouge, on observe une courbe bimodale avec un diamètre critique de 280 nm et des pores dominants avoisinant les 10 µm. En revanche, pour la brique silico-calcaire, la figure montre plusieurs pics avec une valeur maximale de 30 µm qui représente le diamètre critique, dans ce cas le mercure n'a pas eu besoin d'une pression importante à l'instar des autres matériaux pour pénétrer à l'intérieur des pores. Ceci s'explique par la grande porosité de la brique silico-calcaire.

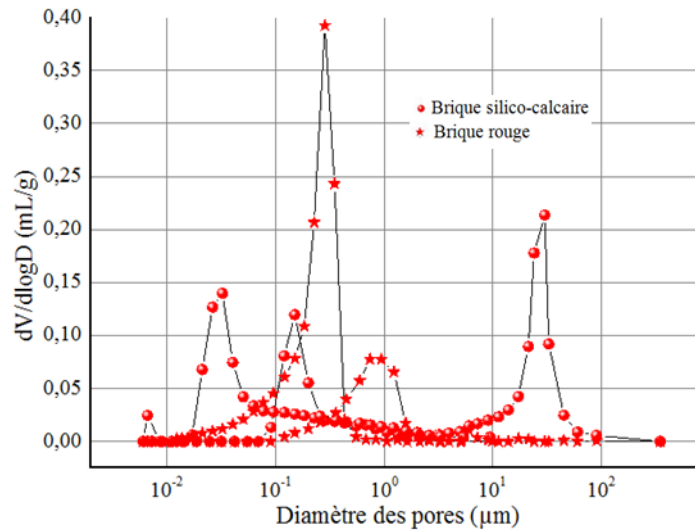


Figure 4. 10 – Distribution de la taille des pores, obtenue par intrusion au mercure pour les briques étudiées.

Cet essai, a permis aussi de déterminer la porosité de chaque matériau. On a pu enregistrer 11.7% pour le béton, 13% pour le mortier, 25% pour la brique rouge et 28.7% pour la brique silico-calcaire. Ces valeurs sont légèrement inférieures par rapport à celles trouvées avec l'essai de la porosité accessible à l'eau ; à cause de la technique utilisée et la géométrie des corps d'épreuve.

4.7 Relation entre concentration et conductivité :

La figure 4.11 présente la CE mesurée pour les milieux poreux étudiés, saturés avec des solutions de NaCl à différentes concentrations 0 à 117 g/l. Il est clair que, pour le même matériau, plus la concentration est élevée et plus la CE augmente. Cependant, pour deux matériaux différents, saturés avec la même concentration, CE était plus élevée dans le matériau plus poreux.

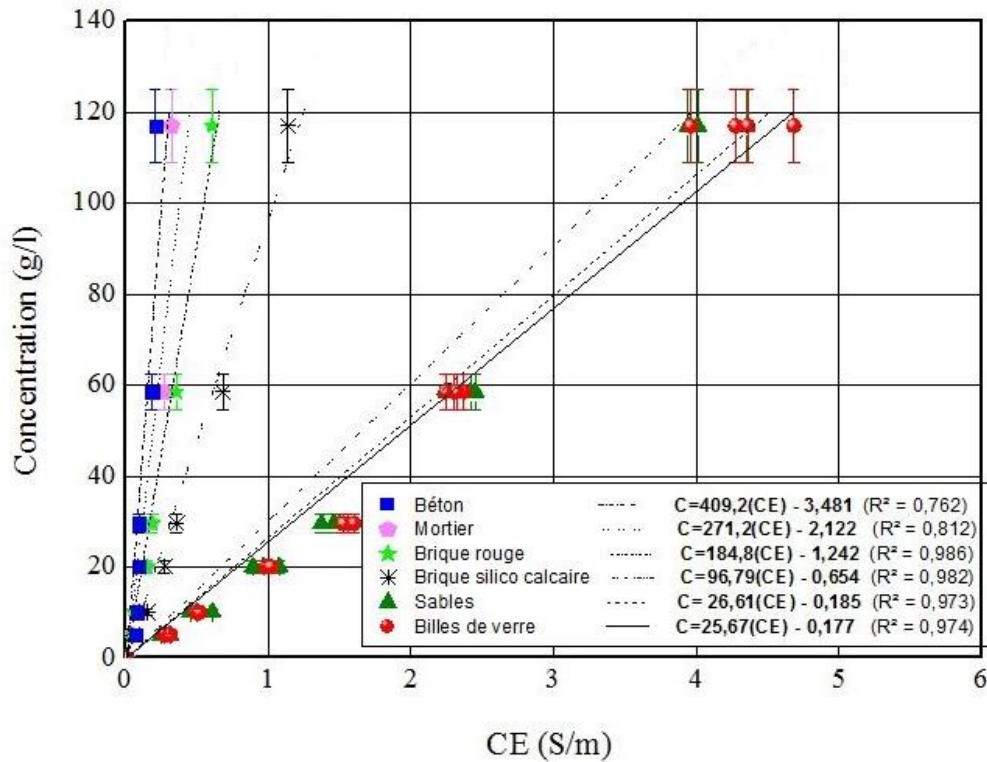


Figure 4.11 – Relation entre concentration en NaCl et la CE pour les matériaux étudiés.

Les résultats obtenus ont permis d'écrire une corrélation entre la concentration de la solution saturante et la CE pour chaque matériau. Cette relation a une tendance linéaire du type ($y = ax - b$). Les paramètres a et b varient en fonction de la porosité du matériau, ils diminuent en absolu avec l'accroissement de la porosité (cf. figures 4.12 et 4.13). Au regard de ces figures, la variation suit une équation exponentielle avec des coefficients de régression supérieur à 95%. Par conséquent, pour un matériau de porosité comprise entre 0,134 et 0,442, avec une solution de saturation de NaCl dont la concentration est comprise entre 0 et 117 g/l, la relation entre la concentration et la conduction électrique du milieu poreux peut être écrite selon l'équation 3.1 :

$$C = 1444 \cdot e^{-9,01\phi(CE)} - 12,52 \cdot e^{-9,64\phi} \quad (3.1)$$

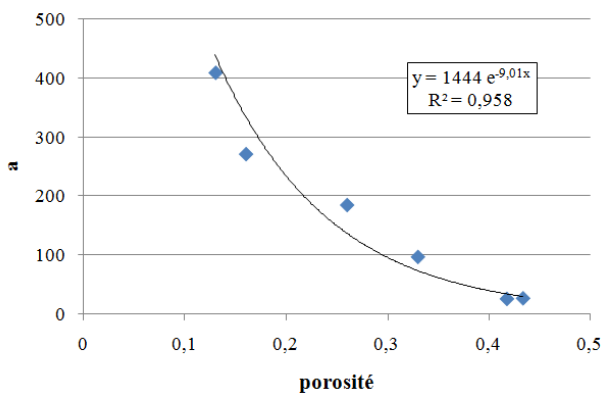


Figure 4.12 – Corrélation entre le paramètre a et la porosité.

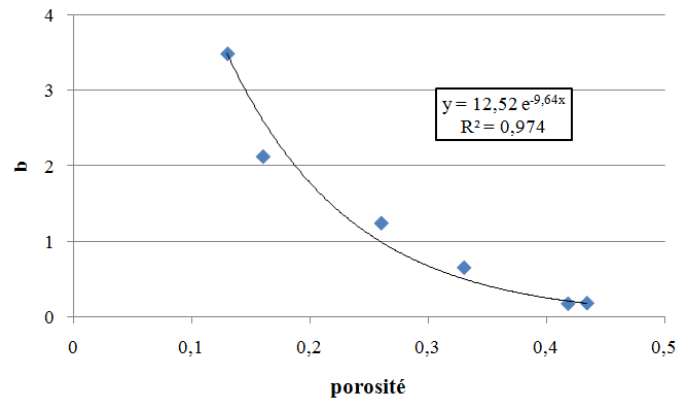


Figure 4.13 – Corrélation entre le paramètre b et la porosité.

4.8 Essais de variation de la température :

La figure 4.14 représente les mesures de la CE réalisées avec le circuit électrique sur le béton en fonction de la concentration en NaCl de la solution de saturation pour trois différentes températures : 18, 30 et 40° C. Les barres d'erreurs représentent l'incertitude de mesure électrique estimée à 6,8%. On peut noter, d'après la figure 4.14, que le paramètre CE est sensible à la variation de la température. En effet, la CE augmente avec la température pour une même concentration dans le même matériau avec les mêmes propriétés physiques, c.-à-d. que les propriétés électriques du béton sont affectées par le changement thermique. Aux températures élevées, les ions vont se dissoudre d'avantage dans l'eau des pores et par conséquent la solution devient plus fluide, et à contrario, aux températures plus basses, les ions se cristallisent et rendent la solution plus visqueuse (Elkey et Sellevold 1995).

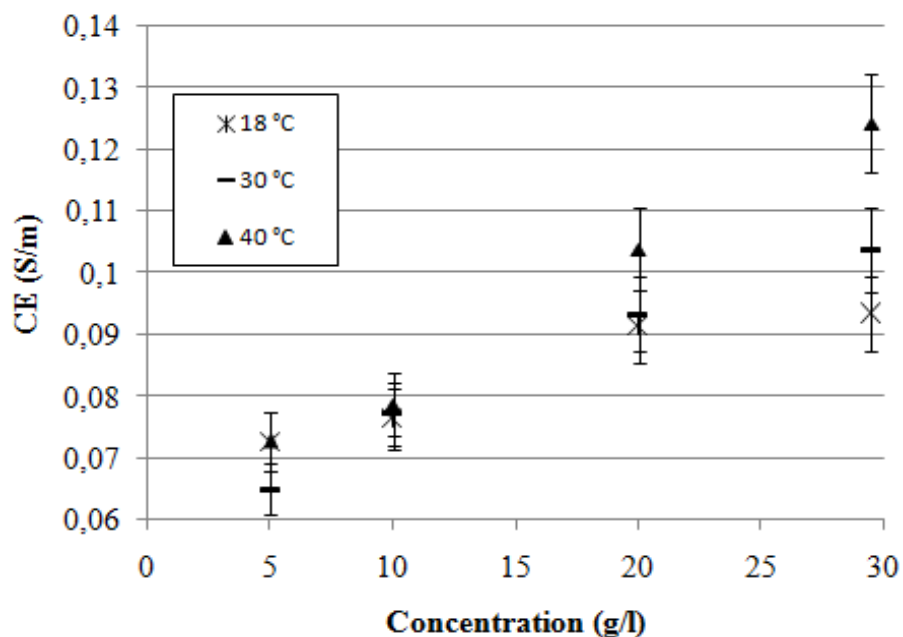


Figure 4. 14 – Variation de la CE du béton utilisé en fonction de la concentration pour différentes températures : 18, 30 et 40° C.

Si on considère la température de 18°C comme température de référence pour les bétons avec un coefficient α de 0.025 (Ait Saadi 2003) et en utilisant l'équation (2.9), CE augmente de 1% /°C. (Elkey et Sellevold, 1995) ont raisonné en terme de résistivité électrique et ont trouvé que pour une température de référence de 21° C, il y avait une hausse de 3% dans les valeurs de la résistivité. Par contre (Corwin et Lesch, 2005) ont déduit que la CE de la solution interstitielle présente à l'intérieur du milieu poreux présentait une augmentation d'environ 1.9% /° C pour une température de référence de 25° C.

4.9 Essais de mesure de la tortuosité :

La figure 4.15, illustre la variation de la CE apparente en fonction de la CE_0 des matériaux testés (billes de verre de diamètres 1.5 et 2 mm et un sable de classe 0.1/0.2, saturés avec des solutions salines en NaCl de concentration comprise entre 5 et 117g/l). Cette variation est corrélée par des droites du type $y=A.x$, passant par l'origine (pour une concentration égale à 0 g/l, le matériau est sec et donc pas de conductivité électrique, $EC_0 = 0.0064$ S/m est considérée comme négligeable), offrant des coefficients de corrélation ≥ 0.98 .

Par analogie avec les équations 2.21 et 2.28, on déduit que la pente des droites constitue le produit de $(\phi \cdot \tau_m)$. Cette analogie nous permet de calculer les différentes tortuosités des milieux poreux étudiés (tableau 4.7). L'erreur présentée sur la figure 4.15 définit l'incertitude relative cumulée, estimée à 9.3%.

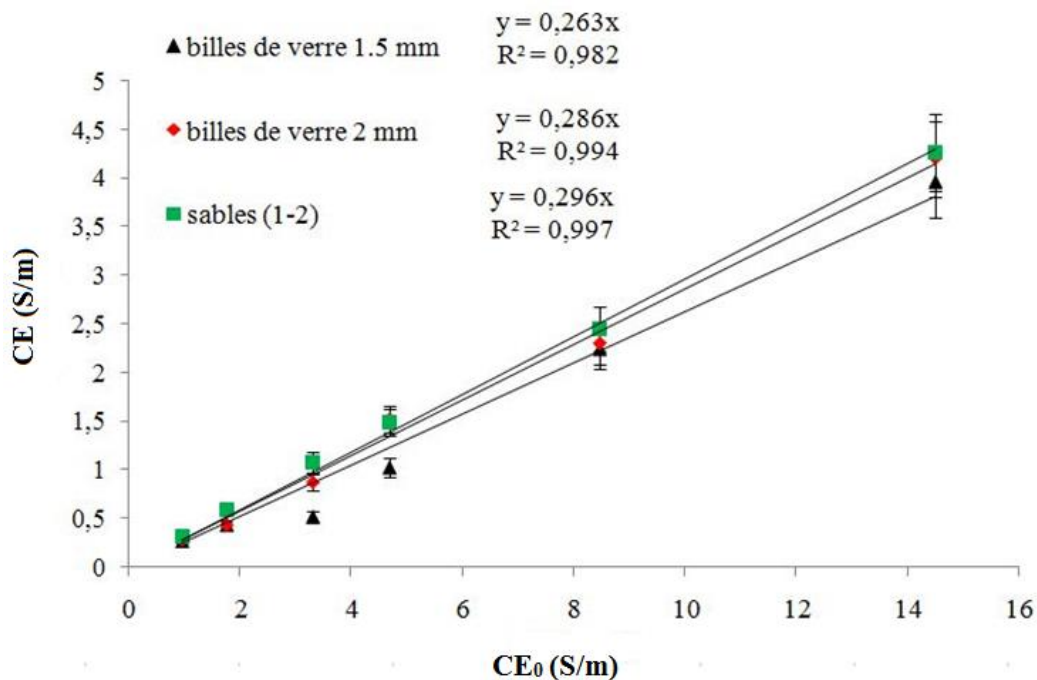


Figure 4. 15 – Variation de la CE en fonction de la CE_0 des matériaux testés (billes de verre 1.5, 2 mm et sable de classe 1-2 mm).

Le tableau 4.7, résume les résultats des tortuosités des milieux étudiés avec leurs porosités correspondantes. Ce que l'on peut dire au vu de ces résultats, c'est que pour un milieu donné par exemple les billes de verres le facteur de tortuosité géométrique augmente avec le diamètre des grains donc de la porosité du milieu ; phénomène remarqué aussi dans le travail de (Piekaar et Clarenburg, 1967) en employant un modèle d'analyse géométrique pour estimer la tortuosité dans les milieux poreux fibreux.

La tortuosité trouvée pour les billes de verre varie dans l'intervalle $0.639 \leq \tau_m \leq 0.721$ pour des porosités allant de 0.411 à 0.426. La même posture est observée pour les sables avec $0.648 \leq \tau_m \leq 0.671$ pour des porosités qui s'échelonnent entre 0.418 et 0.442.

Tableau 4. 7 Tortuosités mesurées sur les différents milieux poreux étudiés.

Matériau	Tortuosité	Porosité
Billes de verre 4 mm	0.721	0.426
Billes de verre 3 mm	0.702	0.42
Billes de verre 2 mm	0.685	0.417
Billes de verre 1.5 mm	0.639	0.411
Sable (1 – 2) mm	0.671	0.442
Sable (0.5 – 1) mm	0.662	0.438
Sable (0.25 – 0.5) mm	0.648	0.418
Brique silico-calcaire	0.230	0.33
Brique rouge	0.142	0.26
Mortier	0.121	0.156
Béton	0.08	0.134

Nous remarquons également que ce facteur géométrique diffère en fonction de la nature du milieu poreux ; mais aussi en fonction de ses propriétés géométriques (tailles et formes des grains, porosité, distribution porale, etc.). (Shackelford 1991; Shackelford et Moore, 2013) ont trouvé que la tortuosité géométrique est <1 et que les valeurs de τ_m sont comprises entre 0,01 et 0,84 pour les milieux poreux saturés. On trouve aussi les travaux de (Gillham, Robin et col., 1984) qui ont déduit que les tortuosités étaient comprises entre 0.33 et 0.7 pour les sols saturés.

4.10 Essais de diffusion :

La méthode électrique adoptée nous a permis de suivre l'évolution de la diffusion des ions chlorures sous régime transitoire sur les différents milieux poreux étudiés et de quantifier la concentration C en NaCl à un temps t du processus de diffusion et ainsi déterminer les différents coefficients de diffusion de chaque milieu en incorporant la notion de tortuosité. Ces coefficients de diffusion ont été déduits en utilisant les équations présentées dans le chapitre 2. Ces relations mettent en rapport le coefficient de diffusion effectif du milieu poreux D^* avec le coefficient de diffusion libre de l'espèce chimique D_0 (NaCl) par le biais du facteur de tortuosité géométrique (Shackelford et Daniel, 1991).

La figure 4.16, présente les valeurs mesurées pour la diffusion libre de la solution de NaCl (29,5 g/l) dans une eau distillée. Sur cette courbe, on remarque une évolution soudaine et brusque dans la concentration de la cellule contenant l'eau distillée qui est due à l'ouverture du clapet d'un seul coup. Cette augmentation continue pendant les premières heures est suivie par une évolution relativement plus lente sur une période d'essai de 10 jours.

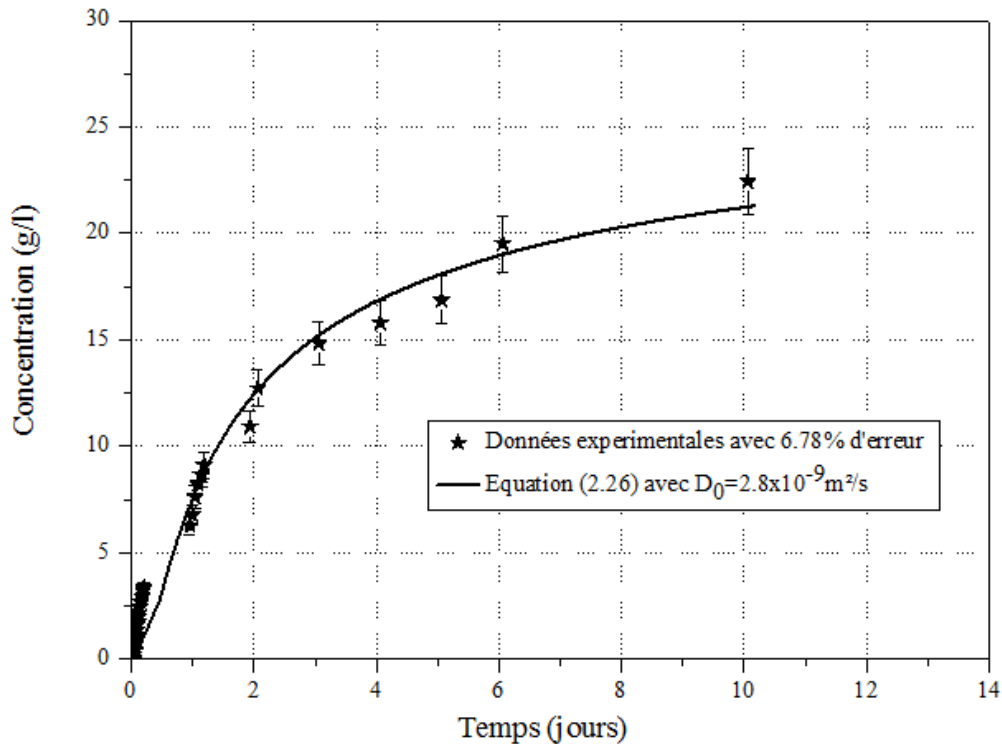


Figure 4. 16 – Profil de concentration pour une diffusion libre d’une solution de NaCl (29,5 g/l) dans une eau distillée.

L’ajustement avec l’équation (2.28), qui est une solution de la seconde loi de Fick pour les milieux semi-infinis, proposée par (Crank 1975) et représenté avec une ligne continue sur la figure, a permis de déduire le coefficient de diffusion D_0 , qui est égal à $2,8 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ (même ordre de grandeur que les valeurs trouvées dans la littérature) (Shackelford et Daniel, 1991).

Les barres d’erreurs définissent l’incertitude sur les mesures électriques effectuées avec le circuit électrique, estimée à 6,8%. Le modèle d’ajustement s’approche remarquablement des points expérimentaux et passe dans l’intervalle d’incertitude comme on peut le constater dans la figure 4.16. La figure 4.17 présente le profil de concentration déterminé pour une diffusion d’une solution de NaCl à 29.5 g/l dans un sable de classe (1-2) mm pendant une période de 30 jours.

La même augmentation brusque est observée ici aussi pendant les premières heures, suivie d’une évolution équilibrée pendant 15 jours, pour se stabiliser après jusqu’à l’arrêt de l’essai. Une concordance est notée entre les données expérimentales et le modèle d’ajustement. L’ajustement utilisant l’équation (2.28) a été réalisé avec un coefficient de diffusion de $D^* = 1,87 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$. Ce dernier a été calculé en fonction de la tortuosité avec l’équation (2.24). Sachant que la tortuosité est également mesurée électriquement, elle contient donc une erreur relative estimée à 9,3%. Cette erreur, est incorporée dans le modèle d’ajustement lui-même et est représentée par des lignes discontinues. L’erreur estimée sur le coefficient de diffusion est d’environ $(\pm 0,18 \cdot 10^{-9}) \text{ m}^2/\text{s}$. L’incertitude sur la mesure électrique est estimée à 6,8%.

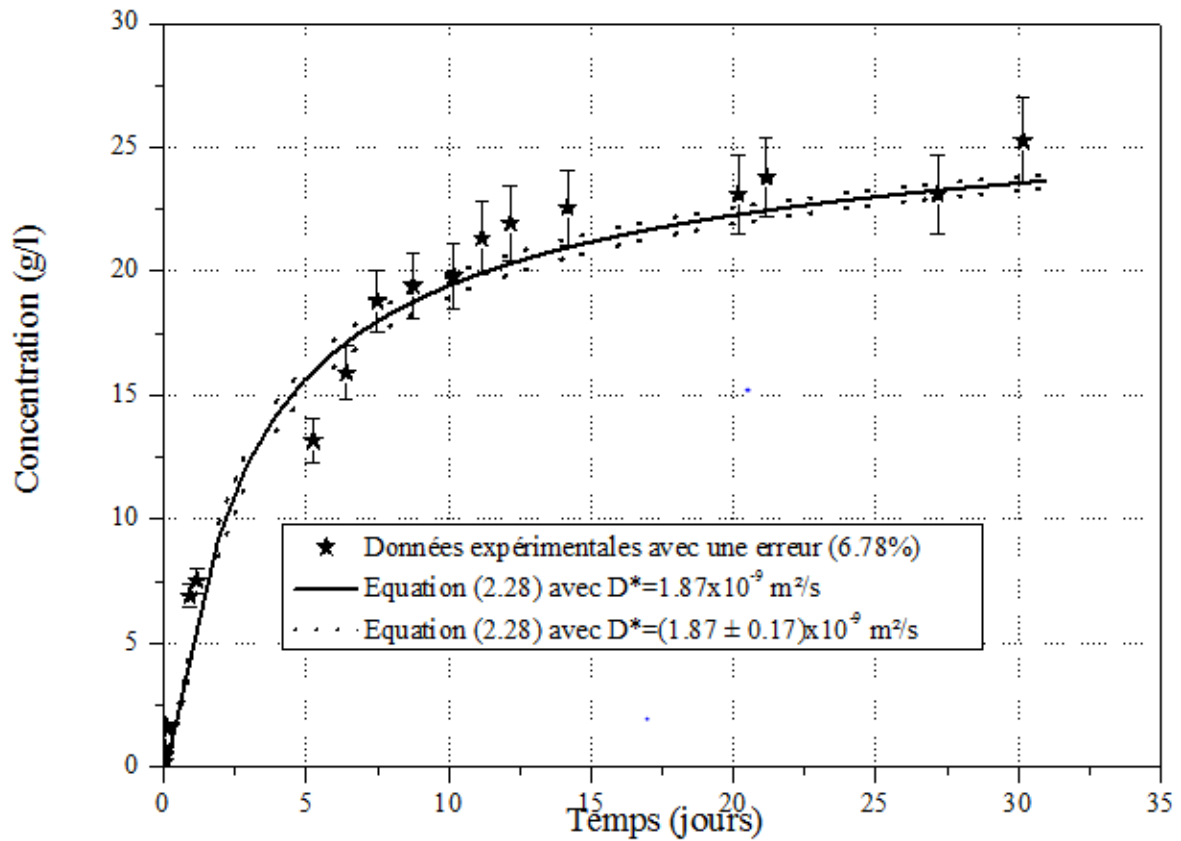


Figure 4. 17 – Profil de concentration pour une diffusion de NaCl 29,5 g/l dans un sable (1- 2) mm.

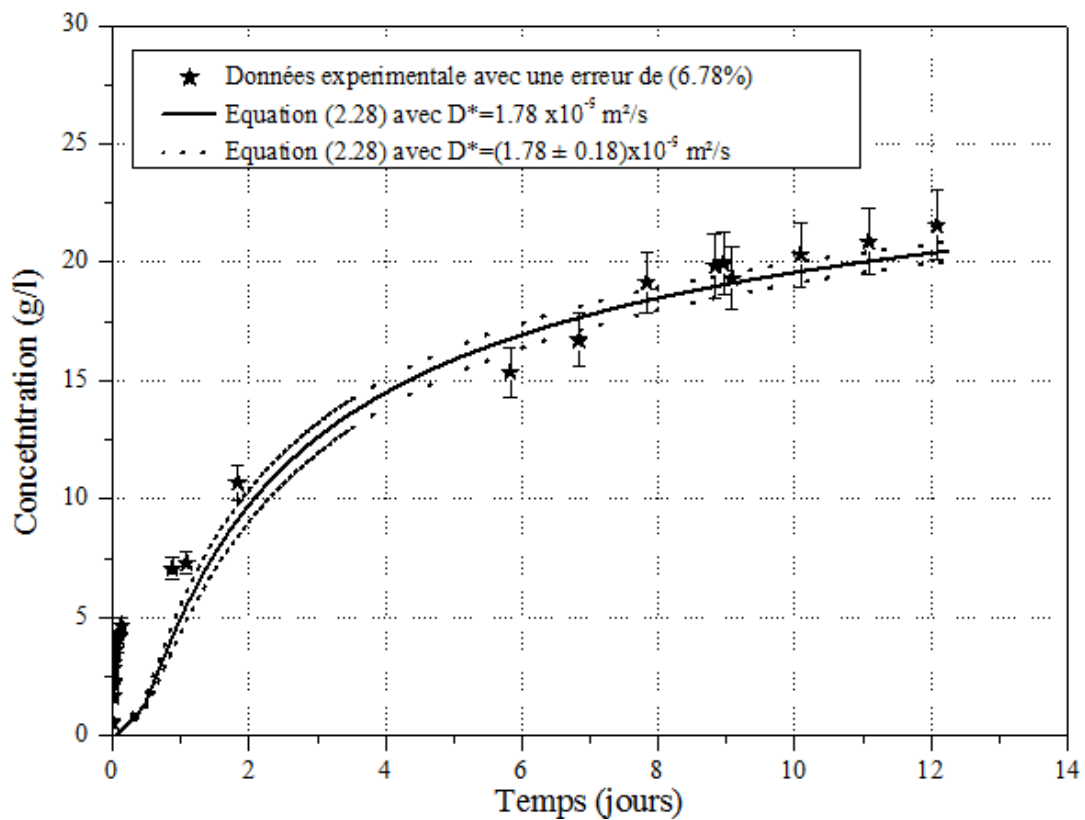


Figure 4. 18 – Profil de concentration pour la diffusion d'une solution de NaCl à 29,5 g/l dans des billes de verre 1,5 mm.

Les figures 4.18 et 4.19 représentent les résultats de diffusion d'une solution saline de NaCl à 29,5 g/l dans les billes de verre de diamètres 1,5 et 2 mm pendant une durée d'essai d'environ 12 jours. L'ajustement en utilisant le modèle de l'équation (2.28) nous a aidé à déduire, respectivement, pour les billes de verre de diamètre 1,5 et 2 mm, les coefficients de diffusion effectifs D^* ($1,78 \cdot 10^{-9}$; $1,91 \cdot 10^{-9}$) m^2/s , calculés avec les données des tortuosités récapitulées dans le tableau 4.7, en utilisant l'équation (2.24). L'erreur sur les mesures électriques et le coefficient de diffusion sont les mêmes qu'auparavant.

Nous remarquons que la diffusion est légèrement accélérée dans les billes de 2 mm de diamètre pour la même période d'essai. Si on prend, $t = 6$ jours la concentration dans de la solution NaCl saturant les billes de 2 mm est d'environ 18 g/l, alors qu'elle avoisine les 15 g/l dans la solution saturante des billes de 1,5 mm.

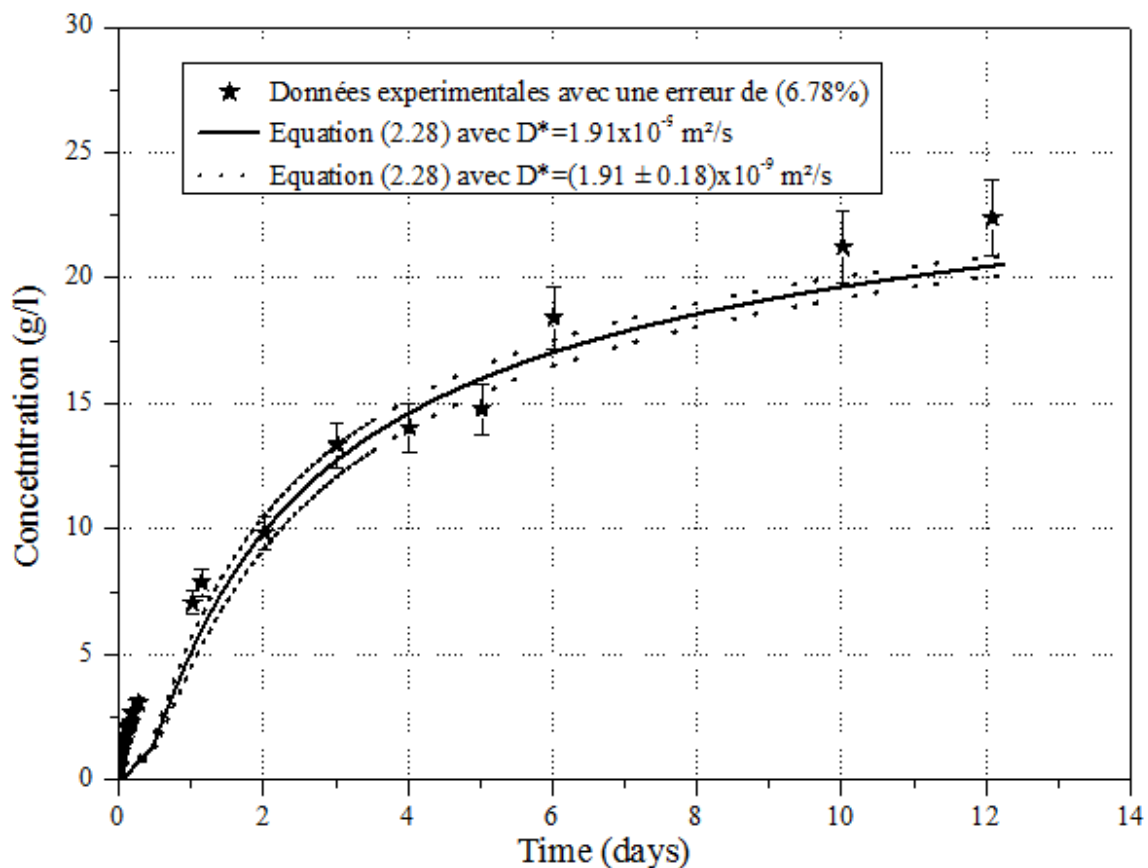


Figure 4. 19 – Profil de concentration pour la diffusion d'une solution de NaCl à 29,5 g/l dans des billes de verre 2 mm.

A $t = 10$ jours, le même phénomène est remarqué, C est de 21 g/l pour les billes de 2mm et une C de 20g/l pour les billes de 1.5 mm. Ceci est dû à la porosité équivalente qui est plus importante dans les billes de 2 mm de diamètre (0.417) que pour les billes de 1.5 mm (0.411).

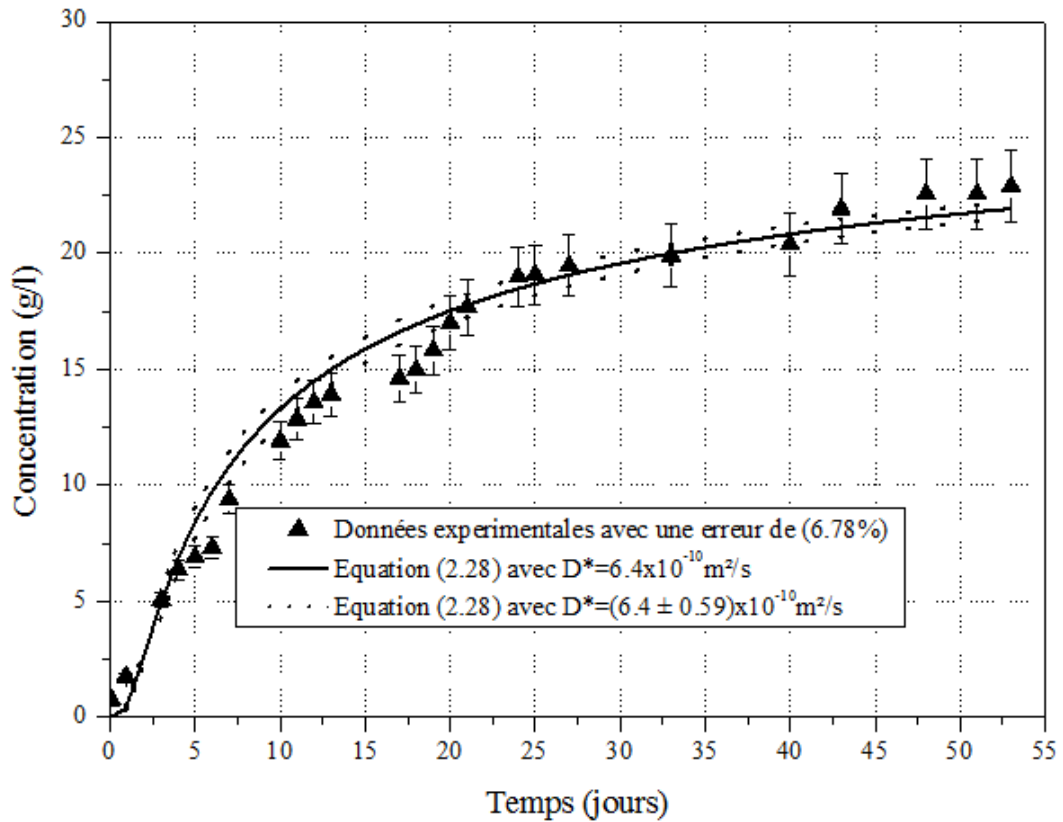


Figure 4. 20 – Profil de concentration pour la diffusion d’une solution de NaCl à 29,5 g/l dans la brique silico-calcaire.

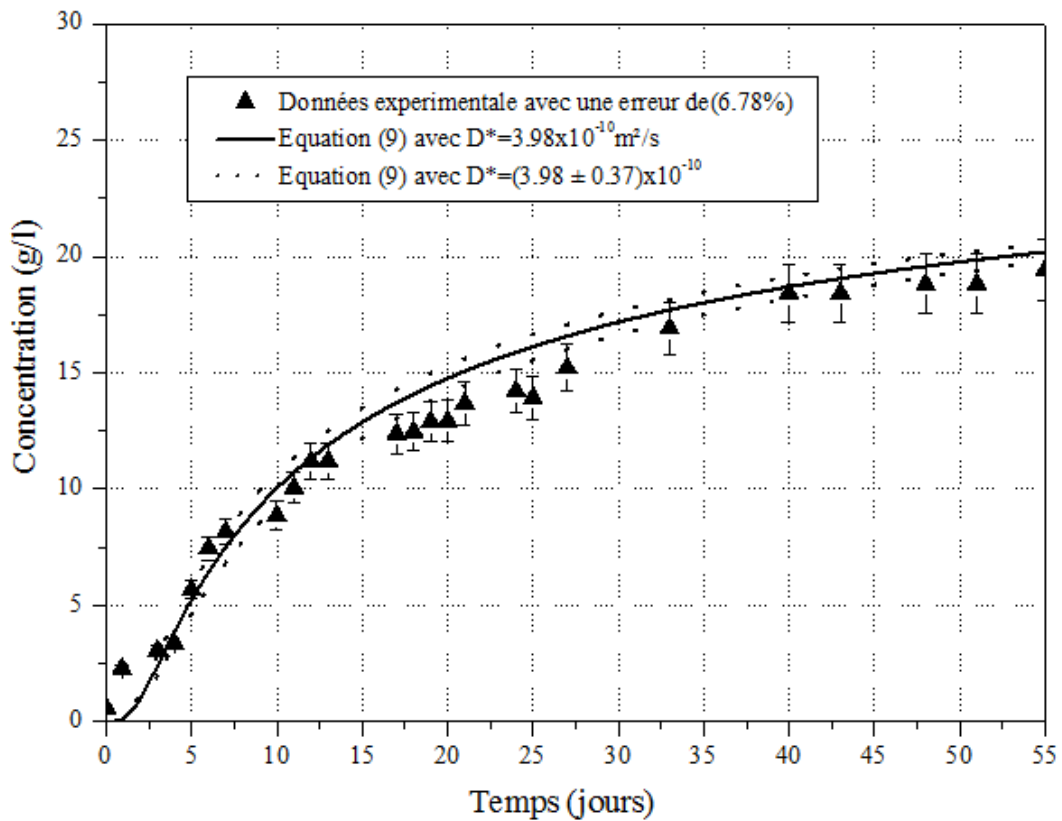


Figure 4. 21 – Profil de concentration pour la diffusion d’une solution de NaCl à 29,5 g/l dans la brique rouge.

En ce qui concerne les profils de concentration de la diffusion dans la brique silico-calcaire et la brique rouge, représentés sur les figures 4.20 et 4.21, une très bonne concordance a été observée entre les valeurs expérimentales et le modèle d'ajustement adopté conformément à l'équation (2.28). Les coefficients effectifs de diffusion déterminés sont respectivement de $(6,44 \pm 0,59) \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ et $(3,98 \pm 0,37) \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ pour la brique silico-calcaire et la brique rouge. (Ahl et Lü, 2007) ont trouvé pour les briques un coefficient de diffusion de l'ordre de $4,5 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$, résultat relativement proche des nôtres. Ayant une porosité de 33%, la brique silico-calcaire, présente une diffusion bien plus rapide que celle de la brique rouge dont la porosité est de 26%.

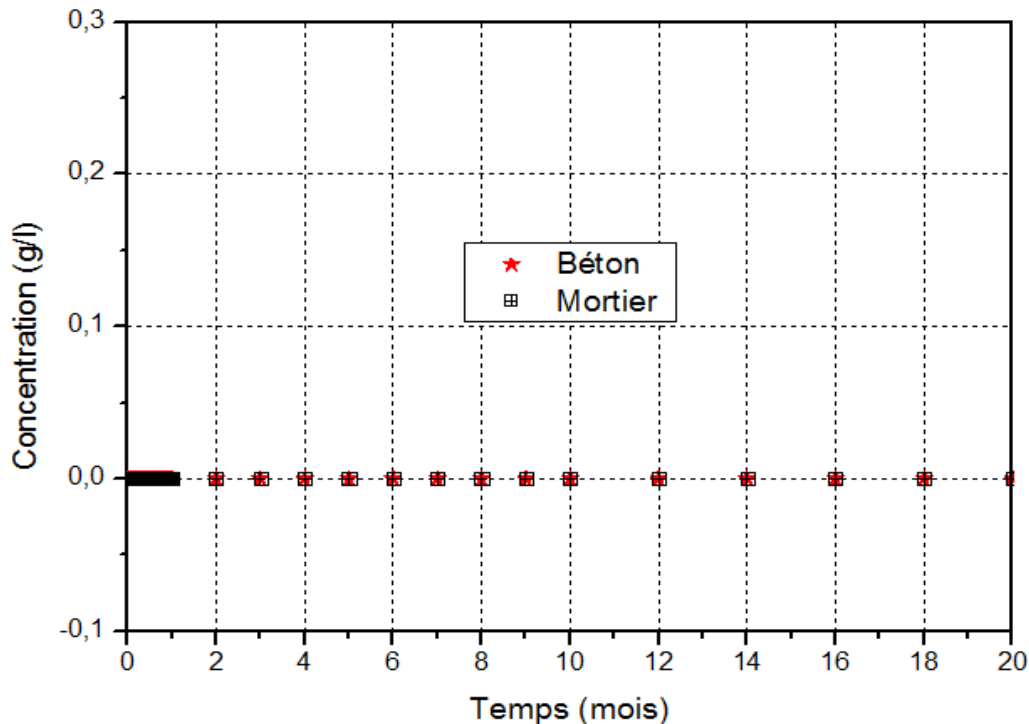


Figure 4. 22 – Profil de concentration pour la diffusion d'une solution de NaCl à 29,5 g/l dans les matériaux cimentaires.

Les tests de diffusion d'une solution saline en NaCl de concentration de 29,5 g/l effectués sur les matériaux cimentaires (mortier et béton) durent depuis plus de 20 mois, et aucune évolution n'a encore été détectée (figure 4.22). Ceci est tout à fait normal puisque dans le cas d'une diffusion naturelle, l'ordre de grandeur du coefficient de diffusion du béton est de $10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ obtenu avec des essais de migration (Touil, Ghomari et col. 2011; Hassoune et Ghomari, 2014). D'un autre côté (Liu, Presuel-Moreno et col. 2015) ont également réussi à déduire un coefficient de diffusion de l'ordre du $10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ par des tests de diffusion naturelle, cependant la période de diffusion est beaucoup plus importante (3 ans) avec une concentration en NaCl de 2,8 M, soit 5 fois supérieure à celle que nous avons utilisés pour réaliser nos essais. Le temps nécessaire pour détecter une concentration supérieure à 5 g/l avec un tel ordre de grandeur de D^* , est d'environ 24 mois. C'est pour cela qu'on a eu recours aux méthodes destructives de quantification des chlorures.

Les principaux résultats de tortuosité et de coefficients de diffusion obtenus pour nos matériaux sont résumés dans le tableau 4.8. Ces résultats permettent de voir que les coefficients de diffusion effectifs D^* des différents milieux étudiés sont inférieurs à la D_0 coefficient de diffusion libre d'une solution saline. Cela est dû évidemment à la tortuosité du milieu étudié. On peut donc en déduire que la diffusion réalisée uniquement pour les matériaux étudiés obéit à l'équation (2.24). On remarque aussi que le facteur de tortuosité varie selon la nature du milieu poreux ; mais aussi en fonction de ses caractéristiques géométriques et physiques telles que: la porosité, le diamètre des grains, la distribution porale, etc. Cette variation affecte aussi le coefficient de diffusion effectif qui diminue à mesure que la tortuosité diminue.

Tableau 4. 8 Influence de la tortuosité sur le coefficient de diffusion effectif.

<i>Matériaux</i>	<i>Tortuosité</i>	<i>Coefficient de diffusion ($10^{-9} m^2/s$)</i>
Solution NaCl à 29,5 g/l	$1 \pm 0,093$	$(2,8 \pm 0,026)$
Billes de verre 1.5 mm	$0,639 \pm 0,060$	$(1,78 \pm 0,18)$
Billes de verre 2 mm	$0,685 \pm 0,064$	$(1,91 \pm 0,18)$
Sable (1 - 2) mm	$0,671 \pm 0,062$	$(1,87 \pm 0,17)$
Brique silico-calcaire	$0,230 \pm 0,021$	$(0,644 \pm 0,59)$
Brique rouge	$0,142 \pm 0,013$	$(0,398 \pm 0,37)$

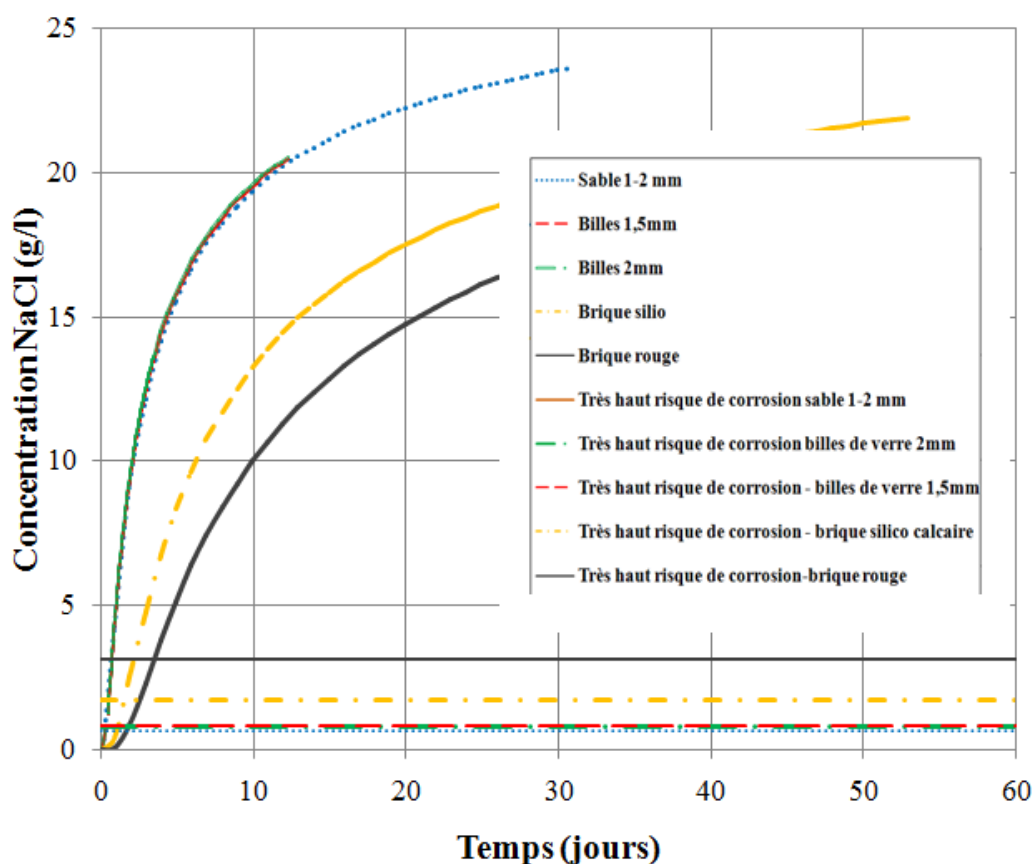


Figure 4.23 – Risque de corrosion d'armatures en fonction du temps.

Les résultats de diffusion obtenus, nous permis également de faire le lien entre la CE et le risque de corrosion des armatures d'après les travaux de (McCarter, Chrisp et col. 2005), qui ont suggéré que si la CE d'un milieu dépassait les $2 \cdot 10^{-2}$ S/m, le risque de corrosion est considéré comme très important. La figure 4.23 représente les modèles d'ajustement de diffusion en utilisant la seconde loi de Fick pour les matériaux (billes, sables et briques). En prenant une CE de $3 \cdot 10^{-2}$ S/m et en utilisant l'équation reliant la CE et la concentration en NaCl du milieu (équation 3.1), nous avons pu déterminer à temps réel et à concentration équivalent à $3 \cdot 10^{-2}$ S/m pour, le risque de corrosion d'armatures présente dans chaque matériau utilisé.

Par exemple, la brique silico calcaire de porosité de 33% présente un risque corrosion très élevé à une concentration de 1,7g/l de Nacl après seulement 1,5 jour. Par contre pour la brique rouge de porosité de 26 % ce risque est présent après une période de diffusion de 3,5 jours et à 3,2 g/l. Si l'armature est placée dans un milieu comme le sable où la porosité avoisine les 44% le risque survient beaucoup plus rapidement (9 heures) et à des concentrations plus réduites (0,63 g/l).

La figure 4.24 représente l'influence du paramètre porosité sur les coefficients de diffusion D^* trouvés pour nos matériaux poreux. Concernant le matériau béton, l'ordre de grandeur trouvé dans la littérature à été utilisé (10^{-12} m²/s). Cette influence est représentée par une relation linéaire type ($y = ax + b$) avec un coefficient de régression $> 89\%$. L'interpolation entre deux classes successives de porosité, par exemple 0,33 et 0,34, en utilisant l'équation graphique nous a permis de déduire qu'un changement de porosité de l'ordre de 1% pouvait faire varier le coefficient de diffusion de 10^{-10} m²/s. Ceci implique qu'une légère modification du paramètre porosité pouvait changer radicalement le coefficient de diffusion D^* d'un milieu poreux.

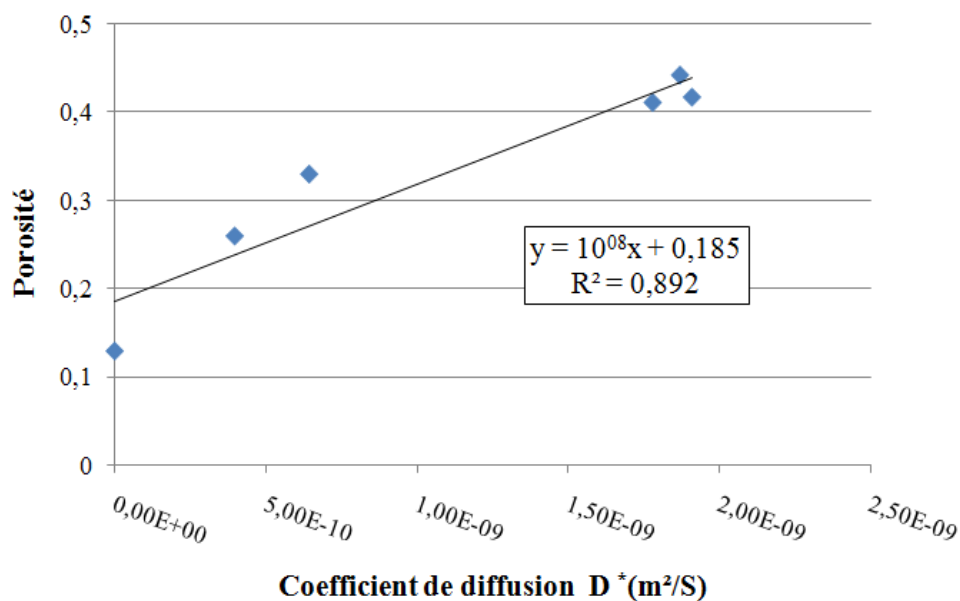


Figure 4.24 – Relation entre porosité et coefficient de diffusion.

Les figures 4.25 et 4.26 représentent les profils de concentration des chlorures totaux et libres sur les échantillons de béton et mortier après une période de diffusion de plus de 12 mois avec une solution diffusante en NaCl à 29,5 g/l. Une allure croissante des profils de concentration des chlorures libres et totaux, (allant de la partie inférieure en contact avec la solution à la partie supérieure de l'échantillon), est observée sur les deux figures qui explique que la quantité de chlorures présente dans l'échantillon diminue avec la hauteur x . A 5mm la quantité de chlorures libres dans le béton est de 0,04 g/l et de 0,047 g/l pour les chlorures totaux. Pour le mortier les quantités de chlorures libres et totaux sont respectivement de 0,043 g/l et de 0,053. La différence entre les chlorures libres et totaux dans les deux matériaux représente la quantité de chlorures fixés (0,007 g/l pour le béton et 0,01 g/l pour le mortier).

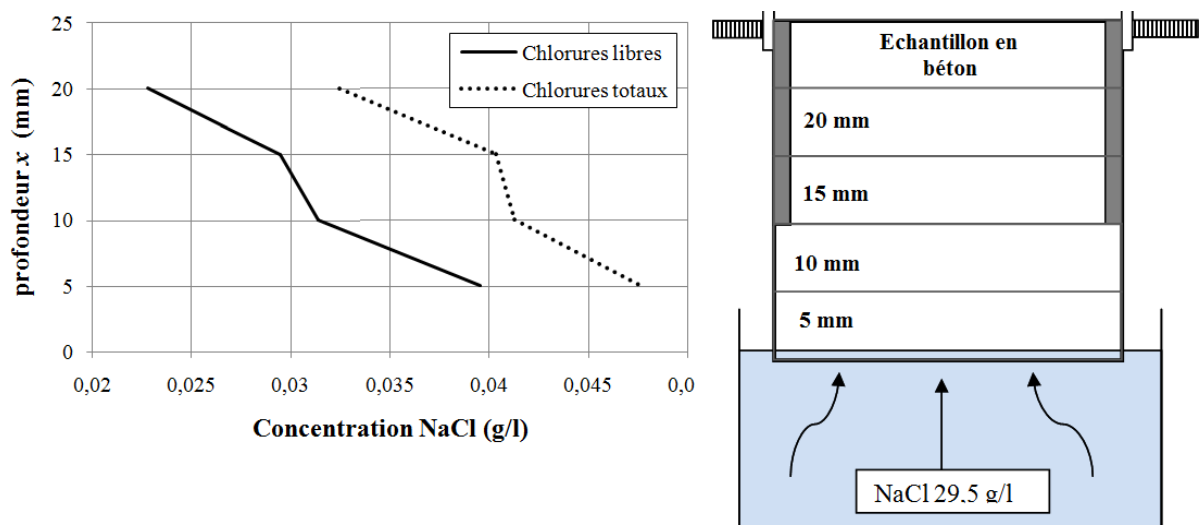


Figure 4.25 – Profil de concentration de chlorures libres et totaux sur le béton.

La quantité de chlorures déterminée par essais destructifs, explique sans doute le fait que nous ne sommes pas encore en mesure de détecter la moindre évolution de chlorures dans nos échantillons de matériaux cimentaires même après une période de 24 mois.

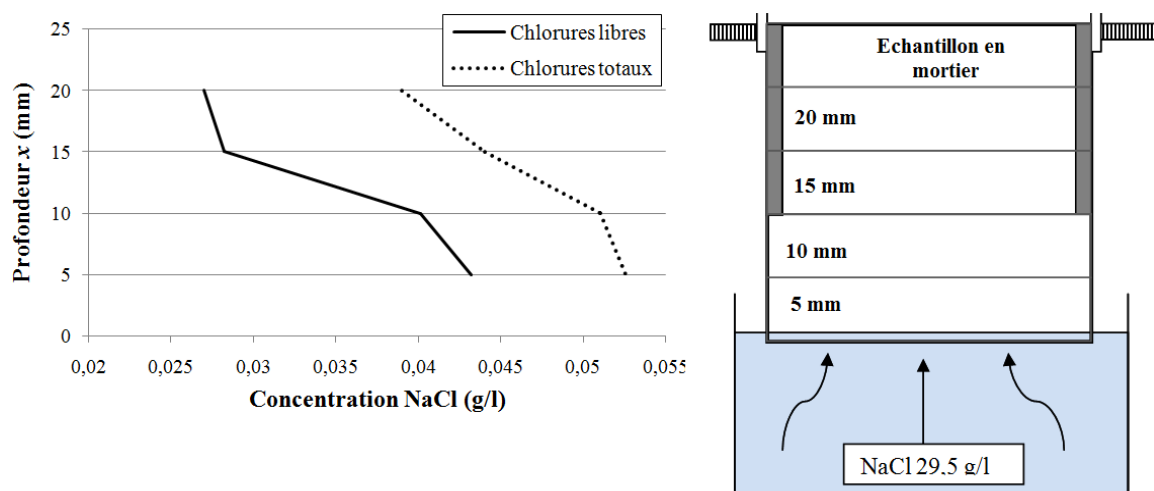


Figure 4.26 – Profil de concentration des chlorures libres et totaux sur le mortier.

4.11 Conclusion

La conductivité électrique est un paramètre extrêmement important dans le domaine du transfert des chlorures dans les milieux poreux. Grâce à ce paramètre nous avons pu quantifier des paramètres physiques clés comme la porosité d'un milieu ou bien la tortuosité.

Dans ce chapitre, on a pu voir que le calibrage de la méthode électrique est une étape cruciale et indispensable pour la suite du programme expérimental. Grâce aux essais directs réalisés pour déterminer la porosité de milieux de caractéristiques connues tel que les billes de verre, nous avons pu calibrer le circuit électrique adopté.

En se basant sur des mesures de conductivité des matériaux saturés avec des solutions salines, nous avons pu écrire une relation empirique, capable d'estimer la quantité de chlorures de NaCl en g/l à un temps t . Nous avons pu, grâce à cette relation, suivre l'évolution de la diffusion à travers le réseau poreux de plusieurs milieux poreux étudiés, et déterminer ainsi leurs coefficients de diffusion effectifs. La quantification de la tortuosité géométrique et son influence sur le phénomène de diffusion à été possible aussi grâce aux mesures de la CE.

Les résultats de diffusion obtenus, nous ont laissé voir une relation entre portant sur une évolution relativement importante du coefficient de diffusion en fonction de la variation de la porosité. Mais également une possibilité d'estimation du risque de corrosion des armatures présente dans les milieux poreux étudiés, en fonction de la CE mesurée à un temps t .

Le montage électrique a montré ses limites puisqu'il éprouvait des difficultés à faire des mesures pour des solutions saturantes ayant des concentrations inférieures à 5g/l, pour des porosités $\leq 26\%$. C'est en partie pour cela que nous n'avons pas pu détecter la moindre évolution dans les matériaux cimentaires sur plusieurs mois d'attente.

CONCLUSION GENERALE

Les méthodes non destructives (MND), présentent une réelle évolution dans le domaine du génie civil, elles ne cessent de se développer et leurs applications ne cessent de s'accroître. Le choix de ces techniques est souvent guidé pour la simplicité de leurs utilisations à la fois au laboratoire et in situ.

L'analyse bibliographique élaborée nous a permis de confirmer la supériorité des méthodes électriques dans le contrôle non destructif (fiabilité, rapidité, faible coût, etc.), qui se basent essentiellement sur la mesure de la conductivité électrique (CE/RE). Dans le cadre de ce travail, nous avons choisi le dispositif à deux électrodes pour nos mesures de CE, qui est plus destiné pour des mesures au laboratoire sur des corps d'épreuve de faible géométrie et avec des conditions environnantes maîtrisées. Néanmoins, la conductivité électrique dépend de l'influence de plusieurs paramètres extrinsèques, d'une part tels que : la température, la saturation ou encore la quantité de chlorures, et d'autre part, intrinsèques comme la porosité ou la tortuosité. Le travail élaboré a permis de corréler les propriétés électriques des milieux poreux saturés étudiés à leurs propriétés physiques. En vue de tout ce qui a été présenté dans la recherche bibliographique, nous pouvons dire que les mesures électriques représentent les techniques non destructives les plus appropriées dans la caractérisation des propriétés intrinsèques et extrinsèques des matériaux poreux dans les milieux agressifs.

Les essais préliminaires réalisés au début du programme expérimental, spécialement ceux avec les résistances électriques et ensuite sur des solutions salines, nous ont permis tout d'abord de confirmer l'efficacité des mesures électriques, de vérifier la fiabilité du circuit électrique adopté et de calibrer la tension du générateur (V_{pp}) à 8,5V et sa fréquence, F_r variant dans l'intervalle [1 à 100 kHz]. Après, le passage aux billes de verre, nous a permis d'avoir un modèle de matériaux granulaires, qui ont une porosité importante (de l'ordre de 41%) et une structure géométrique des grains connues. Par la suite des matériaux de construction comme : les sables, briques et matériaux cimentaires, ont été étudiés, présentant des propriétés différentes, ceci nous a conduit à redéfinir le domaine recommandé des fréquences pour le circuit électrique dans les milieux poreux, qui est de [50 Hz – 50 kHz].

Les mesures du paramètre porosité, nous ont servi pour corréler, avec succès, la CE à la porosité du milieu en se basant sur la loi d'Archie. Les résultats des porosités obtenus pour les différents matériaux étudiés sont compris entre 13% et 44% avec une erreur relative estimée à 8%. Les mesures électriques étaient à chaque fois confrontées non seulement aux résultats obtenus par la méthode directe associée à chaque matériau, mais également aux résultats de la littérature, en vue de s'assurer de la fiabilité de notre circuit électrique, dont le montage est simple.

La porosité accessible à l'eau représente un indicateur de choix pour la durabilité des ouvrages. Les résultats de la porosité des divers matériaux étudiés, sont tout à fait comparables. En effet un rapport moyen remarquable compris entre [0,9 et 1,1] a été noté entre les valeurs directes et les valeurs indirectes. La porosité a une influence considérable sur

le phénomène de transfert des électrolytes dans les milieux poreux, plus un matériau est poreux et plus il laisse passer les espèces chimiques pouvant causer la dégradation du matériau. C'est ce qui nous a encouragés à traiter de la diffusion.

La notion de conduction électrique, essentiellement électrolytique, nous a permis de corréler la CE à la concentration en sel (NaCl) des milieux poreux étudiés. En effet, les mesures effectuées sur les milieux utilisés a permis d'établir une relation type exponentielle permettant d'estimer le taux de chlorures dans des matériaux poreux de porosités comprises entre 13% et 44% saturés avec des solutions saline en NaCl de concentration comprise entre 5 et 117 g/l. C'est cette même relation qui nous a aidé à suivre le phénomène de diffusion en fonction du temps.

L'effet de la température est primordial lors d'une auscultation non destructive, et doit absolument être pris en considération. La moindre variation influe directement sur les mesures effectuées. Cet effet est remarqué sur les résultats de la CE, car on remarque qu'une hausse de 1° C augmente la mesure de 1%, augmentation relativement sensible lors de caractérisation de paramètres intrinsèques des milieux poreux.

La mesure de la diffusion au laboratoire sur des solutions salines, dont la concentration en chlorures s'apparente à la mer méditerranée (29,5 g/l), a nécessité la conception de cellules appropriées, inspirées partiellement des travaux de la littérature. Ces essais nous ont amené à déterminer des coefficients de diffusion effectifs de chaque milieu étudié. Mais également d'estimer le risque de corrosion des armatures à un temps t pouvant être en contact avec des matériaux de construction tels que les sables ou bien les briques. Les résultats de diffusion nous ont permis aussi de noter une relation linéaire existante entre la porosité et le coefficient de diffusion D^* , cette relation nous dicte que si la porosité venait à changer ne ce serait ce que d'un 1% le coefficient de diffusion pouvait varier d'une valeur estimée à 10^{-10} m²/s, cette variation peut être attribué à plusieurs phénomène tels que, des erreurs de formulation, des microfissures pouvant modifier la porosité survenus lors de découpage des échantillons de 5cm, évolution de la structure interne surtout pour les matériaux cimentaires due à l'hydratation inachevée, ...

La tortuosité demeure, jusqu'à l'heure actuelle, un paramètre sujet à controverse vu son impact sur la diffusion. La tortuosité utilisée pour ce travail est une tortuosité inférieure à l'unité (<1). L'équation de Nernst-Einstein, nous a permis d'identifier ce paramètre d'une manière électrique en passant par le facteur de formation. Le but de cette partie, était non seulement de voir l'influence de la tortuosité sur la diffusion, mais aussi de pouvoir estimer le coefficient de diffusion d'un milieu donné.

Nous notons également que, la méthode choisie a ses limites. Puisqu'il a été constaté que le circuit électrique ne peut prétendre aux mesures des solutions de concentration inférieures à 5g/l pour des matériaux de porosité ($\phi \leq 26\%$), la précision est peu fiable. C'est en partie pour cela qu'on ne peut toujours pas détecter les faibles concentrations dans les échantillons de béton.

Pour clore ce travail, nous présentons quelques points en guise de perspectives :

- L'application de cette technique in situ,
- La variation spatio-temporelle pour les essais de diffusion,
- Utiliser cette technique pour la quantification des paramètres de diffusion des matériaux cimentaires à partir d'essais de migration qui sont beaucoup plus rapides,
- L'étude du système quadripolaire récemment développé pour l'auscultation de surface des ouvrages.

Références bibliographiques

- Abraham, O. et Dérobert, X. (2003). "Non-destructive testing of fired tunnel walls: the Mont-Blanc Tunnel case study", *NDT & E International*, 36(6), pp 411-418.
- Adler, P. (2013). "Porous media: geometry and transports", Laboratoire d'aérothermique du NCRC, Elsevier, 543 pages.
- Ahl, J. et Lü, X. (2007). "Studying of salt diffusion behaviour in brick", *Journal of materials science*, 42(7), pp 2512-2520.
- Ait Saadi, L. (2003). "Méthodologie de contrôle de l'homogénéité et de la perméabilité des barrières argileuses", INSA de Lyon, Thèse de doctorat, 302 pages.
- Akhavan, A. et Rajabipour, F. (2013). "Evaluating ion diffusivity of cracked cement paste using electrical impedance spectroscopy", *Materials and Structures*, 46(5), pp. 697-708.
- Alimi-Ichola, I. et Gaidi, L. (2005). "Étude de la migration du soluté d'un lixiviat dans un sol non saturé par la méthode TDR", *Revue française de géotechnique*, (111), pp. 45-58.
- Andrade, C. et d'Andréa, R. (2010). "Concrete mixture design based on electrical resistivity", *Second International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies*, Università Politecnica delle Marche, Ancona, Italy, 28-30 June.
- Archie, G. E. (1942). "The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics." *Transactions of the AIME*, 146(1), pp. 54-62.
- Aubic, J. et Botreau A. (1982). "Utilisation de la réflectométrie en domaine temporel pour l'étude des transferts d'humidité en milieu poreux perméable", *Journal of Hydrology*, 57(3), pp. 337-357.
- Balaras, C. et Argiriou A. (2002). "Infrared thermography for building diagnostics", *Energy and buildings*, 34(2), pp. 171-183.
- Balasubramanian, K. (2014). " Quality Auditing of Concrete Structures-Techniques, Problems and Solutions ", *Concrete Testing*.²
- Balayssac, J.-P. (2012). " Non-destructive Assessment of Concrete Structures: Reliability and Limits of Single and Combined Techniques: State-of-the-art", *Report of the RILEM Technical Committee*, 207-INR, Springer Science & Business Media, 1.
- Balesdent, J., Pétraud, J. et col. (1991). "Effets des ultrasons sur la distribution granulométrique des matières organiques des sols", *Science du sol*, 29(2), pp. 95-106.
- Baroghel-Bouny, V. (2004). "Conception des bétons pour une durée de vie donnée des ouvrages-Indicateur de durabilité", *Document Scientifique et Technique*, AFGC.
- Basheer, P. et Nolan E. (2001). "Near-surface moisture gradients and in situ permeation tests", *Construction and Building Materials*, 15(2), pp. 105-114.
- Bear, J. (1972). "Dynamics of fluids in porous media." Elsevier Publisher Company, New York, 764 pages.
- Bear, J. et Bachmat Y. (1991). "Introduction to modelling phenomena of transport in porous media", *Theory and application on transport media*, Volume 4, Klower Academic Publishers, 490 pages.
- Beinish., H. (1999) "Contrôle non destructif des bétons. Mesure de la dureté de surface", CERIB, Fiche 37.

² <http://www.masterbuilder.co.in/quality-auditing-of-concrete-structures-techniques-problems-and-solutions/>;

- Benyahia, K. A., Mohamed G., et col. (2010). "Corrélations entre essais non destructifs et essais destructifs du béton à faible résistance mécanique". XXVIII^e Rencontres Universitaires de Génie Civil, 2-4 Juin, La Bourboule, France.
- Besson, A., Cousin I., et col. (2015). "Impact de la solution du sol sur les mesures de résistivité électrique: premiers essais méthodologiques", 5^{ème} colloque Geofcan, 20-21 Septembre, Orléans, France.
- Bezzar, A. and Ghomari F. (2009). "Nondestructive test to track pollutant transport into landfill liners", *Environmental geology*, 57(2), pp. 285-290.
- Bezzar, A. and Ghomari F. (2013). "Monitoring of pollutant diffusion into clay liners by electrical methods", *Transport in porous media*, 97(2), pp. 147-159.
- Bezzar, A. (2009). "Etude de la diffusion et l'adsorption de contaminants dans les sols fins : application aux sites de décharges de la région de Tlemcen", Thèse de doctorat, Université de Tlemcen, 199 pages.
- Bin Ibrahim, A., Bin Ismail P., et coal. (2002). "Guidebook on non-destructive testing of concrete structures", Vienna, Training Course, Series N° 17.
- Bin Ibrahim, A., Bin Ismail P., et col. (2002). "Visual inspection", Chap.2 in Guidebook on non-destructive testing of concrete structures, International Atomic Energy Agency, Vienna, Training Course, Series N° 17, pp. 44-55.
- Bin Ibrahim, A., Bin Ismail P., et col. (2002). "Schmidt rebound hammer test", Chap.4 in Guidebook on non-destructive testing of concrete structures, International Atomic Energy Agency, Vienna, Training Course, Series N° 17, pp. 61-66.
- Bin Ibrahim, A., Bin Ismail P., et col. (2002). "Radiographic Testing", Chap.10 in Guidebook on non-destructive testing of concrete structures, International Atomic Energy Agency, Vienna, Training Course, Series N° 17, pp. 81-99.
- Bin Ibrahim, A., Bin Ismail P., et col. (2002). "Ultrasonic testing", Chap.11 in Guidebook on non-destructive testing of concrete structures, International Atomic Energy Agency. Vienna, Training Course, Series N° 17, pp. 100-128.
- Bin Ibrahim, A., Bin Ismail, P. et col. (2002). "Infrared Thermography", Chap. 12 in Guidebook on non-destructive testing of concrete structures, International Atomic Energy Agency, Vienna, Training Course, Series N° 17, pp. 129-136.
- Blewett, J., McCarter W. J., et col. (2003). "An experimental study on ionic migration through saturated kaolin", *Engineering Geology*, 70(3-4), pp. 281-291.
- Boukli Hacène, S. M. A. (2009). "Contribution à l'étude de la résistance caractéristique des bétons de la région de Tlemcen", Thèse de Doctorat, Université de Tlemcen, Algérie, 193 pages.
- Breyse, D. (2012). "Presentation of common non destructive techniques. Non-destructive Assessment of Concrete Structures: Reliability and Limits of Single and Combined Techniques: State-of-the-art", Report of the RILEM Technical Committee, 207-INR, Springer Science & Business Media, 1, 485 pages.
- Bungey, J. H., Grantham M. G., et col. (2006). "Testing of concrete in structures", 4th Ed., Taylor and Francis, Crc Press, 353 pages.
- Bungey, J. H., Grantham M. G., et col. (2006). "Planning and interpretation of in-situ testing", chap.1 in Testing of concrete in structures, 4th Ed., Taylor and Francis, Crc Press, pp. 1-35.
- Bungey, J. H., Grantham M. G., et col. (2006). "Surface hardness methods", chap.2 in Testing of concrete in structures, 4th Ed., Taylor and Francis, Crc Press, pp. 36-50.

- Bungey, J. H., Grantham, M. G. et col. (2006). "Performance and integrity tests", Chap.8 in Testing of concrete in structures, 4th Ed., Taylor and Francis, Crc Press, pp. 223-260.
- Carino, N. J. (2001). "The impact-echo method: an overview", Proceedings of the Structures Congress & Exposition, American Society of Civil Engineers, pp.1-18.
- Carino, N. J. (2004). "Stress Wave Propagation Methods", Chap. 14 in Malhotra, V. M. et Carino, N. J., Handbook on nondestructive testing of concrete. United States of America, CRC press. seconde edition, pp.14/1-14/35.
- Carino, N. J. et Sansalone, M. (1992). "Detection of voids in grouted ducts using the impact-echo method", ACI Materials Journal, 89(3), pp. 296-303.
- Carlomagno, G. M. et Cardone, G. (2010). "Infrared thermography for convective heat transfer measurements." Experiments in fluids, 49(6), pp. 1187-1218.
- Černý, R. (2009). "Time-domain reflectometry method and its application for measuring moisture content in porous materials: A review", Measurement, 42(3), pp. 329-336.
- Chang, C., Song, G. et col. (2013). "Temperature and mixing effects on electrical resistivity of carbon fiber enhanced concrete", Smart Materials and Structures, 22(3), pp. 21-35.
- Cheng, C.-C. et Sansalone, M. (1995 a). "Determining the minimum crack width that can be detected using the impact-echo method Part 1: Experimental study", Materials and Structures, 28(2), pp. 74-82.
- Cheng, C.-C. et Sansalone, M. (1995 b). "Determining the minimum crack width that can be detected using the impact-echo method Part 2. Numerical fracture analyses", Materials and Structures, 28(3), pp. 125-132.
- Chindaprasirt, P. et Rattanasak, U. (2011). "Shrinkage behavior of structural foam lightweight concrete containing glycol compounds and fly ash", Materials & Design, 32(2), pp. 723-727.
- Chrisp, T., Starrs, G. et col. (2001). "Temperature-conductivity relationships for concrete: An activation energy approach", Journal of materials science letters, 20(12), pp. 1085-1087.
- Clark, M., McCann, D. et col. (2003). "Application of infrared thermography to the non-destructive testing of concrete and masonry bridges", NDT & E International, 36(4), pp. 265-275.
- Clennell, M. B. (1997). "Tortuosity: a guide through the maze", Geological Society, London, Special Publications, 122(1), pp. 299-344.
- Cole, P. (1985). "Using acoustic emission (AE) to locate and identify defects in composite structures", Composite structures, 3(3), pp. 259-267.
- Corwin, D. et Lesch, S. (2005). "Apparent soil electrical conductivity measurements in agriculture", Computers and electronics in agriculture, 46(1), pp. 11-43.
- Crank, J. (1975). "The mathematics of diffusion", Clarendon, Oxford.
- Daïan, J.-F. (2007). "Porométrie au mercure Le modèle XDQ." Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier, Grenoble, 97 pages.
- Dalton, F. et Van Genuchten, M. T. (1986). "The time-domain reflectometry method for measuring soil water content and salinity", Geoderma, 38(1), pp. 237-250.
- Dauzères, A. (2010). "Etude expérimentale et modélisation des mécanismes physico-chimiques des interactions béton-argile dans le contexte du stockage géologique des déchets radioactifs", thèse de doctorat, Poitiers, France, 249 pages.
- De Freitas, S. S., de Freitas, V. P. et col. (2014). "Detection of façade plaster detachments using infrared thermography—A nondestructive technique", Construction and Building Materials, 70, pp. 80-87.

- De Larrard, F. (1999). "Structures granulaires et formulation des bétons", Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Ouvrage d'art OA n°34, France, 414 pages.
- Defer, D. et Maierhofer, C. (2012). "Infrared thermography", Chap. 10 in Breysse, D., Non-destructive Assessment of Concrete Structures: Reliability and Limits of Single and Combined Techniques: State-of-the-art Report of the RILEM Technical Committee, 207-INR, Springer Science & Business Media, 1.
- Deleporte, E. (2003). "Ecoulements dans les milieux poreux – Loi de Darcy, Proposition d'expérience", Laboratoire et bases de données du département de physique, Cachan, France, 21 mai.
- Dias, C. A. (1972). "Analytical model for a polarizable medium at radio and lower frequencies", *Journal of Geophysical Research*, 77(26), pp. 4945-4956.
- Dias, R. P., Mota, M. et col. (2005). "Study of ternary glass spherical particle beds: porosity, tortuosity, and permeability." ISSN 1479-0602, pp.68-75.
- Dormieux, L. et Lemarchand, E. (2000). "Modélisation macroscopique du transport diffusif. Apport des méthodes de changement d'échelle d'espace", *Oil & Gas Science and Technology*, 55(1), pp. 15-34.
- Du Plooy, R., Lopes, S. P. et col. (2013). "Development of a multi-ring resistivity cell and multi-electrode resistivity probe for investigation of cover concrete condition," *NDT&E International*, 54, pp. 27-36.
- Dunn, S., Young, Y. et col. (1984). "Acoustic emission characterization of corrosion induced damage in reinforced concrete" *Corrosion*, 40 (7), pp. 339-343.
- El-Dieb, A. et Hooton, R. (1994). "Evaluation of the Katz-Thompson model for estimating the water permeability of cement-based materials from mercury intrusion porosimetry data", *Cement and Concrete Research*, 24(3), pp. 443-455.
- Elkey, W. et Sellevold, E. J. (1995). "Electrical resistivity of concrete", Norwegian Road research Laboratory, Oslo, Norway, N°80, 33 pages.
- Epstein, N. (1989). "On tortuosity and the tortuosity factor in flow and diffusion through porous media" *Chemical Engineering Science*, 44(3), pp. 777-779.
- Evangelista, A. C., Shehata, I. et col. (2003). "Parameters that influence the results of non-destructive test methods for concrete strength", International Symposium (NDT-CE); 16-19september, Berlin, Germany. P. 029.
- Farahani, A., Taghaddos, H. et col. (2015). "Prediction of long-term chloride diffusion in silica fume concrete in a marine environment", *Cement and Concrete Composites*, 59, pp. 10-17.
- Faurel, M. (2012). "Conception et mise en place d'expériences de diffusion de l'eau et de solutés dans des milieux poreux modèles d'argiles gonflantes", thèse de doctorat, Université de Poitiers.
- Fischli, M. et Moczko, A. (2012). "Rebound hammer", Chap.12 in Breysse, D., Non-destructive Assessment of Concrete Structures: Reliability and Limits of Single and Combined Techniques: State-of-the-art Report of the RILEM Technical Committee, 207-INR Springer Science & Business Media, 1.
- Fokaides, P. A. et Kalogirou, S. A. (2011). "Application of infrared thermography for the determination of the overall heat transfer coefficient (U-Value) in building envelopes", *Applied Energy*, 88(12), pp. 4358-4365.
- Friedman, S. P. (2005). "Soil properties influencing apparent electrical conductivity: A review", *Computers and electronics in agriculture*, 46(1), pp. 45-70.

- Friedman, S. P. et Jones, S. B. (2001). "Measurement and approximate critical path analysis of the pore-scale-induced anisotropy factor of an unsaturated porous medium", *Water Resources Research*, 37(12), pp. 2929-2942.
- Friedman, S. P. et Robinson, D.A. (2002). "Particle shape characterization using angle of repose measurements for predicting the effective permittivity and electrical conductivity of saturated granular media", *Water Resources Research*, 38(11), pp. 11-18.
- Gagné, R. (2000). "Durabilité et réparations du béton", *Durabilité et réparations du béton*, Sherbrooke GCI 714, Université de Sherbrooke, Québec, pp. 28-62.
- Garnier, V. (2012). "Ultrasounds through transmission", Chap.2 in Breysse, D., *Non-destructive Assessment of Concrete Structures: Reliability and Limits of Single and Combined Techniques: State-of-the-art Report of the RILEM Technical Committee, 207-INR*, Springer Science & Business Media, 1.
- Garnier, V., Chaix, J. F. et col. (2009). "Caractérisation Non Destructive des bétons par propagation d'ondes ultrasonores", *Mécanique & Industries*, 10(3-4), pp. 299-303.
- Ghanbarian, B., Hunt, A.G. et col. (2013). "Tortuosity in porous media: A critical review", *Soil science society of America journal*, 77(5), pp. 1461-1477.
- Gillham, R., Robin, M. et col. (1984). "Diffusion of nonreactive and reactive solutes through fine-grained barrier materials", *Canadian Geotechnical Journal*, 21(3), pp. 541-550.
- Grinzato, E., Vavilov, V. et col. (1998). "Quantitative infrared thermography in buildings", *Energy and buildings*, 29(1), pp. 1-9.
- Gu, P., Xu, Z. et col. (1993). "Application of AC impedance techniques in studies of porous cementitious materials:(I): Influence of solid phase and pore solution on high frequency resistance", *Cement and Concrete Research*, 23(3), pp. 531-540.
- Hammond, E. et Robson, T. (1955). "Comparison of electrical properties of various cements and concretes", *The Engineer*, 199(5156), pp. 114.
- Han, T., Best, A. I. et col. (2015). "Relationships among low frequency (2Hz) electrical resistivity, porosity, clay content and permeability in reservoir sandstones", *Journal of Applied Geophysics*, 112, pp. 279-289.
- Hannachi, S. et Guettache, M. (2011). "Le control non destructif des ouvrage en béton "évaluation de la résistance du béton à la compression sur site: application de la méthode combinée", *Sciences & Technologie*, B(34), pp. 09-14.
- Hansson, I. et Hansson, C. (1983). "Electrical resistivity measurements of Portland cement based materials", *Cement and Concrete Research*, 13(5), pp. 675-683.
- Hassoune, M., Ghomari, F. et col. (2014). "Influence des paramètres de composition et de cure sur la diffusivité des bétons à base de matériaux locaux", *Revue «Nature & Technologie», A-Sciences fondamentales et Engineering*, Université de Chlef, Algérie, pp. 02 - 09.
- Henry, R. L. (1964). "Water Vapor Transmission and Electrical Resistivity of Concrete", Technical report, R314, DTIC Document, 39 pages.
- Hornbostel, K., Larsen, C. K. et col. (2013). "Relationship between concrete resistivity and corrosion rate—a literature review", *Cement and Concrete Composites* 39.pp 60-72.
- Hudson, T. L. et Aharonson, O. (2008). "Diffusion barriers at Mars surface conditions: Salt crusts, particle size mixtures, and dust", *Journal of Geophysical Research: Planets*, 113(E09008), 17 pages.
- Hunkeler, F. (1996). "The resistivity of pore water solution—a decisive parameter of rebar corrosion and repair methods", *Construction and Building Materials*, 10(5), pp. 381-389.

- Ismail, M. (2006). "Etude des transferts et de leurs interactions avec la cicatrisation dans les fissures pour prolonger la durée de service des infrastructures (ponts, centrales nucléaires)", Thèse de doctorat, L'INSA de Toulouse, 234 pages.
- Jackson, P. D. (1975). "An electrical resistivity method for evaluating the in-situ porosity of clean marine sands", *Marine Georesources & Geotechnology*, 1(2), pp. 91-115.
- Khalil, M. A. et Santos, F. A. M. (2009). "Influence of degree of saturation in the electric resistivity–hydraulic conductivity relationship", *Surveys in geophysics*, 30(6), pp 601-615.
- Kirkham, M. B. (2005). "Time Domain Reflectometry to Measure Volumetric Soil Water Content", *Principles of Soil and Plant Water Relations*, Burlington, Academic Press, pp. 187-205.
- Koponen, A., Kataja, M. et col. (1998). "Simulations of single-fluid flow in porous media", *International Journal of Modern Physics*, C 9(08), pp. 1505-1521.
- Lane, N. M. (2011). "Numerical studies of flow in porous media using an unstructured approach", thèse de Doctorat, Southeastern Louisiana University, 184 pages.
- Larbi, B. (2013). "Caractérisation du transport diffusif dans les matériaux cimentaires: influence de la microstructure dans les mortiers", Thèse de doctorat, Université Paris-Est, 211 pages
- Lataste, J. (2010). "Durée de vie des ouvrages: Approche Prédictive Performantielle et Probabiliste", APPLLET L1-2-1 : Rapport final sur les mesures de résistivité électrique, Bordeaux.
- Lauer, K. R. (2004). "Magnetic/Electrical Methods", Chap.10 in Malhotra, V. M. et Carino, N. J., *Handbook on nondestructive testing of concrete*, United States of America, CRC press, seconde edition, pp. 10/1-10/21.
- Lin, Y. et Sansolone, M. (1992). "Detecting flaws in concrete beams and columns using the impact-echo method", *ACI Materials Journal*, 89(4), pp. 394-405.
- Liu, W., Hunsperger, R. G. et col. (2002). "Corrosion detection of steel cables using time domain reflectometry", *Journal of Materials in Civil Engineering*, 14(3), pp. 217-223.
- Lu, X., Sun, Q. et col. (2013). "Evaluation of dynamic modulus of elasticity of concrete using impact-echo method", *Construction and Building Materials* 47, pp. 231-239.
- Malhotra, V. M. et Carino, N. J. (2004). "Handbook on nondestructive testing of concrete", CRC press, United States of America, CRC press, seconde edition, 386 pages.
- Malhotra, V. M. "Surface Hardness Methods", Chap.1 in Malhotra; V. M. et Carino, N. J., *Handbook on nondestructive testing of concrete*, United States of America, CRC press, seconde edition, pp. 1/1-1/15.
- Malusis, M. A. et Shackelford, C. D. (2002). "Coupling effects during steady-state solute diffusion through a semipermeable clay membrane", *Environmental science & technology*, 36(6), pp. 1312-1319.
- Marquis, G. (2002). "Géophysique de Subsurface" Chap.1, Institut de physique de Globe de Strasbourg.³
- Mazria, E. (1979). "The Passive Solar Energy Handbook", Rodale Press, Emmaus, Rodale, PA, Press; 1st edition, 435 pages.
- McCarter, W., Chrisp, T. et col. (2005). "Field monitoring of electrical conductivity of cover-zone concrete", *Cement and Concrete Composites*, 27(7), pp. 809-817.

³ <http://phineas.u-strasbg.fr/marquis/Enseignement/Public/Master/Cours01.pdf>;

- McCarter, W. et Starrs, G. (1997). "Impedance characterization of ordinary Portland cement--pulverized fly ash binders", *Journal of materials science letters*, 16(8), pp. 605-607.
- McCarter, W., Starrs, G. et col. (2000). "Electrical conductivity, diffusion, and permeability of Portland cement-based mortars", *Cement and concrete research*, 30(9), pp 1395-1400.
- McKee, R. (1981). "A generalization of the nernst-Einstein equation for self-diffusion in high defect concentration solids", *Solid State Ionics*, 5, pp. 133-136.
- McNeill, J. D. (1990). "Use of electromagnetic methods for groundwater studies", *Geotechnical and environmental geophysics*, 1, pp. 191-218.
- Melounou, J. (1998). "Les methodes traditionnelles de mesure de profils hydriques de sols", *Mediterranean Hydrological Cycle Observing System*.⁴
- Mercado, M. et Hugo, R. (2012). "Transferts aqueux à travers les matériaux cimentaires partiellement saturés", thèse de doctorat, Université de Toulouse, 200 pages.
- Mesbah, H., Yahia, A. et col. (2011). "Electrical conductivity method to assess static stability of self-consolidating concrete", *Cement and Concrete Research*, 41(5), pp. 451-458.
- Miau-Bin, S. (1990). "Fracture monitoring within concrete structure by time domain reflectometry", *Engineering Fracture Mechanics*, 35(1), pp. 313-320.
- Mitchell, T. M. (2004). "Radioactive/Nuclear Methods" Cahp.12 in Malhotra, V. M. et Carino, N. J., *Handbook on nondestructive testing of concrete*, United States of America, CRC press. seconde edition, pp. 12/1-12/22.
- Msaad, Y. (2005). "Analyse des mécanismes d'écaillage du béton soumis à des températures élevées", Thèse de doctorat, Ecole des Ponts ParisTech, France, 202 pages.
- Naar, S. (2006). "Evaluation non destructive du béton par mesures de résistivité électrique et thermographie infrarouge passive", Thèse de doctorat, Bordeaux 1, France, 248 pages.
- Nasrallah, S. B. et Arnaud, G. (1989). "Etude des transferts bidimensionnels de chaleur et de masse lors du séchage par convection naturelle d'une plaque poreuse verticale chauffée par un flux constant", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 32(8), pp. 1529-1539.
- EN 13791 (2007), "Assessment of in-situ compressive strength in structures and precast concrete", CEN, Brussels, p.28.
- Neithalath, N. (2007). "Extracting the performance predictors of enhanced porosity concretes from electrical conductivity spectra", *Cement and Concrete Research*, 37(5), pp. 796-804.
- Neithalath, N. et Jain, J. (2010a). "Relating rapid chloride transport parameters of concretes to microstructural features extracted from electrical impedance", *Cement and Concrete Research*, 40(7), pp. 1041-1051.
- Neithalath, N., Persun, J. et col. (2010b). "Electrical conductivity based microstructure and strength prediction of plain and modified concretes", *International Journal of Advances in Engineering Sciences and Applied Mathematics*, 2(3), pp 83-94.
- Nguyen, N. T. (2014). "L'évaluation non destructive des structures en béton armé-étude de la variabilité spatiale et de la combinaison des techniques", Thèse de doctorat, Université de Bordeaux, 231 pages.
- Nokken, M. et Hooton, R. (2008). "Using pore parameters to estimate permeability or conductivity of concrete", *Materials and Structures*, 41(1), pp. 1-16.

⁴ <http://medhycos.mpl.ird.fr/en/t1.tecisensorsi&gn=tdr.inc.html>;

- Okada, K. et Sekino, T. (2003). "Impedance Measurement Handbook. Agilent Technologies", A guide to measurement technology and techniques, 4th edition, 140 pages.
- Ollivier, J.-P., Carcassès, M. et col. (2002). "Diffusion des chlorures dans le ton saturé", *Revue française de génie civil*, 6(2), pp. 227-250.
- Olphen, H. v. (1977). "An introduction to clay colloid chemistry, for clay technologists", geologists and soil scientists, (2nd edition). 301 pages.
- Olsson, N., Baroghel-Bouny, V. et col. (2013). "Non-saturated ion diffusion in concrete—A new approach to evaluate conductivity measurements", *Cement and Concrete Composites*, 40, pp. 40-47.
- Paris, T., Chaumont, C. et col. (2003). "Mise au point de sondes de mesure de conductivité électrique pour l'estimation des transferts de solutés en milieux poreux variablement saturés", *Actes du 4ème colloque Géophysiques des Sols et des Formations Superficielles*, UPMC, VI, Paris, pp. 74-77.
- Pastuszka, T., Krzyszczyk, J. et col. (2014). "Effect of Time-Domain Reflectometry probe location on soil moisture measurement during wetting and drying processes", *Measurement*, 49, pp. 182-186.
- Pavlík, Z., Jiříčková, M. et col. (2006). "Determination of moisture diffusivity using the time domain reflectometry (TDR) method", *Journal of Building Physics*, 30(1), pp 59-70.
- Pavlík, Z., Mihulka, J. et col. (2012). "Application of time-domain reflectometry for measurement of moisture profiles in a drying experiment", *International Journal of Thermophysics*, 33(8-9), pp. 1661-1673.
- Piekaar, H. et Clarenburg, L. (1967). "Aerosol filters—the tortuosity factor in fibrous filters", *Chemical Engineering Science*, 22(12), pp. 1817-1827.
- Pisani, L. (2011). "Simple expression for the tortuosity of porous media", *Transport in Porous Media*, 88(2), pp. 193-203.
- Polder, R., Andrade, C. et col. (2000). "Test methods for on site measurement of resistivity of concrete", *Materials and Structures*, 33(10), pp 603-611.
- Popovics, S. (2001). "Analysis of the concrete strength versus ultrasonic pulse velocity relationship", *Materials Evaluation*, 59(2).pp 123-130.
- Poupard, O., Aït-Mokhtar, A. et col. (2004). "Corrosion by chlorides in reinforced concrete: Determination of chloride concentration threshold by impedance spectroscopy", *Cement and Concrete Research*, 34(6), pp. 991-1000.
- Poupard, O., Aït-Mokhtar, A. et col. (2003). "Impedance spectroscopy in reinforced concrete: Procedure for monitoring steel corrosion Part I Development of the experimental device", *Journal of materials science*, 38(13), pp. 2845-2850.
- Promentilla, M. A. B., Sugiyama, T. et col. (2009). "Quantification of tortuosity in hardened cement pastes using synchrotron-based X-ray computed microtomography", *Cement and Concrete Research*, 39(6), pp. 548-557.
- Rajabipour, F. (2003). "Fundamental investigations on utilizing electrical sensing to improve life cycle modeling of concrete structures", *Thèse de doctorat*, Purdue University, États-Unis, 101 pages.
- Rhoades, J. et Oster, J. (1986). "Solute content." *Methods of Soil Analysis: Part 1*, Physical and Mineralogical Methods, pp. 985-1006.
- Rinaldi, V. A. et Cuestas, G. A. (2002). "Ohmic conductivity of a compacted silty clay", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 128(10), pp. 824-835.

- Robinson, D. A. et Friedman, S. P. (2005). "Electrical conductivity and dielectric permittivity of sphere packings: Measurements and modelling of cubic lattices, randomly packed monosize spheres and multi-size mixtures", *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 358(2), pp. 447-465.
- Sadowska-Boczar, E. (1983). "Application of acoustic emission to investigate the mechanical strength of ceramic materials", *Science of Ceramics*, 12, pp. 639.
- Safinowski, P., Piwakowski, B. et col. (2007). "Contrôle non destructif du béton par ultrasons à l'aide d'un dispositif automatisé", *Congrès Diagnobéton, Laboratoire de Caractérisation Non Destructive, IUT d'Aix-en-Provence, Université de la Méditerranée, France*, pp.1-4.
- Saomoto, H. et Katagiri, J. (2015). "Direct comparison of hydraulic tortuosity and electric tortuosity based on finite element analysis", *Theoretical and Applied Mechanics Letters*, 5(5), pp. 177-180.
- Saripalli, K. P., Serne, R. J. et col. (2002). "Prediction of diffusion coefficients in porous media using tortuosity factors based on interfacial areas", *Groundwater*, 40(4), pp. 346-352.
- Sengul, O. (2014). "Use of electrical resistivity as an indicator for durability", *Construction and Building Materials*, 73, pp. 434-441.
- Sengul, O. et Gjorv, E. (2007). "Mesure de la resistivite electrique pour assurer le controle de la qualite du beton vis-a-vis de la durabilite", *Actes de la 5e conférence internationale sur les structures en bétons sous onditions extrêmes d'environnement et de chargement, CONSEC'07, TOURS, 4-6 JUIN*, pp. 80-87.
- Shackelford, C. D. (1991). "Laboratory diffusion testing for waste disposal—a review", *Journal of Contaminant Hydrology*, 7(3), pp. 177-217.
- Shackelford, C. D. et Daniel, D. E. (1991). "Diffusion in saturated soil. I: Background", *Journal of geotechnical engineering*, 117(3), pp 467-484.
- Shackelford, C. D. et Moore, S. M (2013). "Fickian diffusion of radionuclides for engineered containment barriers: Diffusion coefficients, porosities, and complicating issues", *Engineering Geology*, 152(1), pp. 133-147.
- Snyder, K., Feng, X. et col. (2003). "Estimating the electrical conductivity of cement paste pore solutions from OH⁻, K⁺ and Na⁺ concentrations", *Cement and Concrete Research*, 33(6), pp. 793-798.
- Solis-Carcaño, R. et Moreno, E. I. (2008). "Evaluation of concrete made with crushed limestone aggregate based on ultrasonic pulse velocity", *Construction and Building Materials*, 22(6), pp. 1225-1231.
- Song, Z., Jiang, L. et col. (2014). "Modeling of chloride diffusion in concrete immersed in CaCl₂ and NaCl solutions with account of multi-phase reactions and ionic interactions", *Construction and Building Materials*, 66, pp. 1-9.
- Stephen, P. (2003). ACI 228.1 R-03, "In-Place Methods to Estimate Concrete Strength", American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, USA.
- Suman, R. et Ruth, D. (1993). "Formation factor and tortuosity of homogeneous porous media", *Transport in Porous Media*, 12(2), pp. 185-206.
- Sundberg, K. (1932). "Effect Of Impregnating Waters On Electrical Conductivity Of Soils And Rocks", *American Institute of mining and Metallurgical Engineers*, 97, pp/ 367-391.
- Szenknect, S. (2003). "Transfert de radioéléments en zone non saturée: étude expérimentale et modélisation appliquée au site pilote de Tchernobyl", *Thèse de doctorat, Université de Joseph Fourier, Grenoble 1*, 286 pages.

- Taffe, A., Borchardt, K. et col. (2003). "Specimen for the improvement of NDT-methods-Design and construction of a Large Concrete Slab for NDT methods at BAM", International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering, (NDT-CE) in Berlin, Germany, P026.
- Tahlaiti, M. (2010). "Etude de la pénétration des chlorures et de l'amorçage de la corrosion en zone saturée et en zone de marnage", Thèse de doctorat, Université de La Rochelle, 163 pages.
- Takahashi, H., Seida, Y. et col. (2009). "3D X-ray CT and diffusion measurements to assess tortuosity and constrictivity in a sedimentary rock", *Diffusion-fundamentals*, (89), pp. 1-11.
- Tarun, R. N. et Malhotra, V. M. (2004). "The Ultrasonic Pulse Velocity Method", Chap.8 in Malhotra, V. M. et Carino, N. J., *Handbook on nondestructive testing of concrete*, United States of America, CRC press, seconde edition, pp. 8/1-8/17.
- Theodorakeas, P., Avdelidis, N. P. et col. (2014). "Quantitative analysis of plastered mosaics by means of active infrared thermography", *Construction and Building Materials*, 73, pp. 417-425.
- Tindall, J. A., Kunkel, J. R. et col. (1999). "Unsaturated zone hydrology for scientists and engineers", Prentice Hall Upper Saddle River, NJ, 624 pages.
- Topçu, İ. B., Uygunoğlu, T. et col. (2012). "Electrical conductivity of setting cement paste with different mineral admixtures", *Construction and Building Materials*, 28(1), pp. 414-420.
- Topp, G., Davis, J. et col. (1980). "Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines", *Water resources research*, 16(3), pp. 574-582.
- Torres-Luque, M., Bastidas-Arteaga, E. et col. (2014). "Non-destructive methods for measuring chloride ingress into concrete: State-of-the-art and future challenges", *Construction and Building Materials*, 68(0), pp. 68-81.
- Touil, B., GHOMARI, F. et col. (2011). "Etude des performances de durabilité des bétons locaux", XXIXe Rencontres Universitaires de Génie Civil, AUGC, Tlemcen - Algérie.
- Tumidajski, P. J., Schumacher, A. et col. (1996). "On the relationship between porosity and electrical resistivity in cementitious systems", *Cement and Concrete Research*, 26(4), pp. 539-544.
- Umnova, O., Attenborough, K. et col. (2005). "Deduction of tortuosity and porosity from acoustic reflection and transmission measurements on thick samples of rigid-porous materials", *Applied Acoustics*, 66(6), pp. 607-624.
- Vallabh, R., Banks-Lee, P. et col. (2010). "New approach for determining tortuosity in fibrous porous media", *J Eng Fibers Fabr*, 5(3), pp. 7-15.
- Van Brakel, J. et Heertjes, P. (1974). "Analysis of diffusion in macroporous media in terms of a porosity, a tortuosity and a constrictivity factor", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 17(9), pp. 1093-1103.
- Vedalakshmi, R., Devi, R. R. et col. (2008). "Determination of diffusion coefficient of chloride in concrete: an electrochemical impedance spectroscopic approach." *Materials and Structures*, 41(7), pp. 1315-1326.
- Vergara, L., Miralles, R. et col. (2001). "NDE ultrasonic methods to characterise the porosity of mortar", *NDT & E International*, 34(8), pp. 557-562.
- Wang, Y., Gong, F. et col. (2014). "Theoretical Model for Estimation of Ice Content of Concrete by Using Electrical Measurements", *Procedia Engineering*, 95(0), pp. 366-375.
- Weil, G. J. (2004). "Infrared Thermographic Techniques", Cahp. 15 in Malhotra, V. M. et Carino, N. J., *Handbook on nondestructive testing of concrete*, United States of America, CRC press, seconde edition, pp. 15/1-15/14.
- Whiting, D. A. et Nagi, M. A. (2003). "Electrical resistivity of concrete-a literature review", *R&D Serial*, (2457), 58 pages.

- Wiggenhauser, H. et Kind, T. (2015). "Time domain reflectometry (TDR) ", *Non-destructive Damage Assessment and Environment, Measurement Methods*.
- Wong, P.-Z. (1999). "Conductivity, Permeability, and Electrokinetics", *Methods in the Physics of Porous Media, Series: Experimental Methods in the Physical Sciences*, Elsevier, vol. 35, pp. 119-159.
- Wong, P.-z., Koplik, J. et col. (1984). "Conductivity and permeability of rocks", *Physical Review*, B 30 (11), pp. 6606-6014.
- Wyllie, M. et Spangler, M. (1952). "Application of electrical resistivity measurements to problem of fluid flow in porous media", *AAPG Bulletin*, 36(2), pp. 359-403.
- Yu, X., Drnevich, V. P. et col. (2004). "Predicting strength development of concrete by time domain reflectometry", *International RILEM Symposium on Concrete Science and Engineering: A Tribute to Arnon Bentur*, RILEM Publications SARL.
- Zhan, X., Schwartz, L. M. et col. (2010). "Pore-scale modeling of electrical and fluid transport in Berea sandstone", *Geophysics*, 75(5), pp. 135-142.
- Zhang, D., Cao, Z. et col. (2014). "Evaluation of the influence of salt concentration on cement stabilized clay by electrical resistivity measurement method", *Engineering Geology*, 170, pp. 80-88.
- Živica, V. r. (2000). "Utilisation of electrical resistance method for the evaluation of the state of steel reinforcement in concrete and the rate of its corrosion", *Construction and Building Materials*, 14(6–7), pp. 351-358.

ANNEXE

Calcul des Incertitudes de mesures

Au cours d'une expérimentation quelle qu'elle soit, la présence d'incertitudes est quasi-permanente. Plusieurs types d'incertitudes peuvent influencer nos résultats ; les plus importantes sont les erreurs instrumentales et les erreurs personnelles. Dans le présent travail, les incertitudes auxquelles nous nous intéressons sont les erreurs relatives. L'erreur relative est connue sous la forme dx/x .

L'erreur sur la valeur indirecte de la porosité (porosité mesurée par la méthode électrique utilisant la loi classique d'Archie, équation 2.10).

a- Incertitude sur la mesure électrique de la porosité :

L'erreur sur la valeur indirecte de la porosité (porosité mesurée par la méthode électrique utilisant la loi classique d'Archie, équation 2.10).

$$\frac{d\phi^m}{\phi^m} = \frac{dCE}{CE} + \frac{dCE_0}{CE}$$

Et d'après l'équation (2.3) $\frac{dCE}{CE} = \frac{dR_x}{R_x} + \frac{dK}{K}$

D'autre part, d'après l'équation (3.2) l'erreur de R_x $\frac{dR_x}{R_x} = \frac{dU_t}{U_t} + \frac{dR}{R} + \frac{dU_1}{U_1} + \frac{dR}{R}$

Et donc $\frac{d\phi^m}{\phi^m} = \frac{dK}{K} + \frac{dU_t}{U_t} + \frac{dR}{R} + \frac{dU_1}{U_1} + \frac{dR}{R} + \frac{dCE_0}{CE}$

Après calcul la valeur de 8% est définie comme incertitude sur la mesure indirecte de la porosité. Concernant l'incertitude sur les valeurs de la porosité directe, elles sont surtout liées à des erreurs de lecture et de matériel telle que la balance électrique. La valeur de 4% englobe toutes les incertitudes et erreurs commises au cours de l'essai.

b- Incertitude sur la concentration déterminée électriquement:

L'erreur de la valeur de la concentration, déterminée électriquement en utilisant l'équation 3.1 dépend principalement de l'incertitude accusée lors de la mesure de la CE. Cette relation, qui a servie par la suite au suivi des profils de concentration de la diffusion des ions chlores à travers nos matériaux.

$$\frac{dCE}{CE} = \frac{dR_x}{R_x} + \frac{dK}{K}$$

$$\frac{dR_x}{R_x} = \frac{dU_t}{U_t} + \frac{dR}{R} + \frac{dU_1}{U_1} + \frac{dR}{R}$$

Et donc $\frac{dCE}{CE} = \frac{dK}{K} + \frac{dU_t}{U_t} + \frac{dR}{R} + \frac{dU_1}{U_1} + \frac{dR}{R}$

L'erreur sur la mesure électrique de la CE a été estimée à 6,78%. Cette erreur sera comptabilisée dans toute procédure de mesure basée sur la CE.

c- Incertitude sur la mesure électrique de la tortuosité :

La tortuosité est définie par la relation de Nernst-Einstein (équation 2.20), reliant le facteur de formation au deux paramètres porosité et facteur de tortuosité géométrique.

$$\frac{EC}{EC_0} = \phi \cdot \tau_m \rightarrow \tau_m = \frac{EC}{\phi \cdot EC_0}$$

Ceci nous donne $\frac{d\tau_m}{\tau_m} = \frac{dCE}{CE} + \frac{dCE_0}{CE} + \frac{d\phi}{\phi}$

$$\frac{dCE}{CE} = \frac{dR_x}{R_x} + \frac{dK}{K} \rightarrow \frac{dCE}{CE} = \frac{dK}{K} + \frac{dU_t}{U_t} + \frac{dR}{R} + \frac{dU_1}{U_1} + \frac{dR}{R}$$

$$\frac{d\tau_m}{\tau_m} = \frac{dK}{K} + \frac{dU_t}{U_t} + \frac{dR}{R} + \frac{dU_1}{U_1} + \frac{dR}{R} + \frac{dCE_0}{CE} + \frac{d\phi}{\phi}$$

Le calcul nous a permis de déduire l'erreur estimée sur la mesure électrique du paramètre tortuosité, qui est de 9,32%.