

Université  
de Liège



Université de Liège  
Faculté des Sciences Appliquées

# **Détection de zones humides dans le béton par Ground Penetrating Radar (GPR) en présence d'un gradient d'humidité.**

Travail de fin d'études réalisé en vue de l'obtention du grade de Master Ingénieur Civil des constructions par

Arnaud LOUIS

Année Académique 2010 – 2011

Composition du jury : Courard L., Nguyen F., Plumier A., Darimont A., Franssen J-M.,

Van der Wielen A., Dondonné E.



Université  
de Liège



Université de Liège  
Faculté des Sciences Appliquées

# **Détection de zones humides dans le béton par Ground Penetrating Radar (GPR) en présence d'un gradient d'humidité.**

Travail de fin d'études réalisé en vue de l'obtention du grade de Master Ingénieur Civil des constructions par

Arnaud LOUIS

Année Académique 2010 – 2011

Composition du jury : Courard L., Nguyen F., Plumier A., Darimont A., Franssen J-M.,

Van der Wielen A., Dondonné E.

---

## Détection de zones humides dans le béton par Ground Penetrating Radar (GPR) en présence d'un gradient d'humidité.

---

Le béton, comme tout élément existant sur terre, présente des faiblesses : il peut être soumis à un ensemble de réactions chimiques qui vont le dégrader. La grande majorité de ces mécanismes de dégradation ont en commun la nécessité d'être en présence d'eau pour se développer. Les zones humides, dans un ouvrage d'art, sont donc potentiellement indicatrices de zones dégradées ou de zones qui risquent, à court terme, de se détériorer. L'utilisation du radar pour la détection de ces zones humides est rendue possible grâce à la variation des propriétés diélectriques du béton en fonction de sa teneur en eau. Dans cette perspective, le radar peut être utilisé comme méthode non destructive d'investigation des ouvrages en béton, dans un but préventif.

Théoriquement, une interface nette entre deux matériaux présentant des propriétés diélectriques différentes peut être facilement visualisée par la technique radar. Les zones humides ont une particularité, elles sont délimitées par des interfaces qui sont loin d'être nettes. En effet, nous aurons bien souvent la formation d'un gradient d'humidité entourant cette zone, qui est susceptible de modifier les signaux radar mesurés. Ce travail va tenter de présenter et d'étudier l'impact de la présence de ce gradient sur la détection par GPR de la zone humide.

Dans cette optique, afin d'étudier l'impact du gradient d'humidité, diverses modélisations sont menées à l'aide d'un programme de simulation numérique de propagation d'ondes électromagnétiques. La taille du gradient mais aussi sa position sont les variables définies afin d'avoir un point de vue le plus objectif possible sur son influence. Dans un second temps, un programme expérimental est mis sur pied afin de créer artificiellement ce gradient d'humidité entre deux dalles. A l'aide d'un radar de 2,3 GHz, l'influence du gradient sur l'évolution temporelle du champ électrique reçu est analysée. Une tentative de corrélation entre les modélisations et les signaux mesurés est ensuite analysée.



L. Courard F. Nguyen A. Darimont A. Plumier J-M. Franssen E. Dondonné A. Van der Wielen

# **Remerciements**

En premier lieu, je voudrais remercier tout particulièrement Mademoiselle Audrey Van der Wielen pour le suivi et l'attention qu'elle a porté à la bonne réalisation de ce travail de fin d'étude. L'aboutissement de celui-ci est aussi le fruit de son expérience et de sa patience à l'explication de la technique du ground penetrating radar.

Bien entendu, mes remerciements vont aussi à mes deux promoteurs, Monsieur Luc Courard et Monsieur Frédéric Nguyen pour le temps, la documentation, le financement et les précieuses explications qu'ils m'ont accordés durant ce semestre.

Je tiens également à remercier et à témoigner toute ma reconnaissance aux personnes suivantes:

Monsieur Claude Sauvage, ingénieur au sein du Service Public de Wallonie (Direction Générale Opérationnelle "Routes et Bâtiments", Département des Expertises Techniques), pour son accueil et ses précieuses explications à propos des techniques de mesure de l'humidité dans les bétons.

Monsieur Pierre Illing, pour son aide à la réalisation des capteurs hygrométriques.

Monsieur Amaury Daras, Madame Fabienne Libioule ainsi que Monsieur Frédéric Michel, pour l'intérêt et l'aide qu'ils m'ont accordés dans les phases expérimentales.

Toutes les personnes qui ont passé du temps à me soutenir et plus particulièrement ma famille et mes proches, ainsi qu'à toutes celles qui ont bien voulu relire et commenter la rédaction de ce travail dont notamment Amélie, et Monsieur Jean Klein.

# Table des matières

<b>Introduction.....</b>	<b>14</b>
<b>1ère partie : Recherche bibliographique.....</b>	<b>16</b>
1. <i>L'eau et le béton.....</i>	<i>16</i>
1.1. Porosité et perméabilité .....	16
1.2. Dégradations .....	18
1.3. Techniques de mesure de l'humidité.....	23
1.4. Les gradients dans les bétons .....	33
2. <i>LE GPR (Ground penetrating radar) .....</i>	<i>34</i>
2.1. Principes de fonctionnement.....	34
2.2. Théorie électromagnétique.....	36
2.3. Réfraction et réflexion .....	41
2.4. Résolution des radars.....	42
2.5. Influence de l'humidité sur les propriétés électriques du béton.....	47
2.6. Mesure dynamique .....	48
3. <i>Modélisation à l'aide d'un simulateur : GprMax.....</i>	<i>49</i>
3.1. Concept de base et problème aux frontières.....	49
3.2. Equations discrétisées de Maxwell et algorithme de Yee.....	50
3.3. Hypothèses réalisées par GprMax .....	56
3.4. Stabilité numérique.....	57
3.5. Discrétisation.....	57
<b>2<sup>ème</sup> partie : Modélisation GprMax (partie pratique).....</b>	<b>59</b>
4. <i>Onde directe dans l'air .....</i>	<i>59</i>
5. <i>Etude de l'onde directe sur une dalle en béton infinie .....</i>	<i>61</i>
6. <i>Etude de l'onde sur une dalle finie .....</i>	<i>63</i>
7. <i>Influence de la teneur en eau sur la réponse du signal .....</i>	<i>66</i>
8. <i>Superposition de deux éléments à humidité différente.....</i>	<i>68</i>
8.1. Superposition de deux dalles à saturation.....	69
8.2. Superposition d'une dalle sèche et humide.....	70
9. <i>Introduction progressive d'un gradient d'humidité.....</i>	<i>74</i>
9.1. Etude du gradient se formant à la surface supérieur du béton.....	75
9.2. Etude du gradient se formant à l'interface entre une dalle sèche et humide.....	80
9.3. Etude de l'influence de l'épaisseur du gradient.....	84
9.4. Influence de la forme du gradient.....	86
9.5. Etude de la variation de l'épaisseur du gradient à teneur en eau constante .....	89
9.6. Variation du coefficient de réflexion en fonction de l'épaisseur du gradient .....	91
10. <i>Conclusion des modélisations.....</i>	<i>94</i>

<b>3<sup>ème</sup> partie : Etudes expérimentales .....</b>	<b>96</b>
11. <i>Montage expérimental</i> .....	96
12. <i>Etude des dalles en béton</i> .....	98
12.1. Recherche des caractéristiques des dalles de 2009.....	98
12.2. Réalisation des dalles inférieures.....	100
13. <i>Mesure du gradient</i> .....	101
13.1. Choix et réalisation des capteurs .....	101
13.2. Vérification du fonctionnement des capteurs modifiés .....	104
13.3. Mise en place dans les dalles .....	106
14. <i>Etude radar</i> .....	109
14.1. Matériel utilisé .....	109
14.2. Propriétés électriques du béton .....	110
14.3. Protocole des essais sur dalle .....	116
15. <i>Résultats</i> .....	117
15.1. Configuration n°1 (remontée capillaire) .....	117
15.2. Configuration n°2 (séchage).....	126
15.3. Comparaison entre les deux configurations .....	129
15.4. Analyse des profils .....	130
<b>Conclusion et perspectives .....</b>	<b>133</b>
<b>Bibliographie.....</b>	<b>135</b>
Annexe 1 : Forme discrétisée des équations (59 à 63) .....	138
Annexe 2 : Influence des conditions limites et de la discrétisation sur la modélisation .....	140
Annexe 3 : Code informatique .....	146
Annexe 4 : Bon de commande .....	164
Annexe 5 : Offre de prix .....	165
Annexe 6 : Certificat d'étalonnage.....	166
Annexe 7 : Méthode d'analyse de la permittivité diélectrique basée sur le coefficient de réflexion .....	168
Annexe 8 : Etude de l'influence du séchage du silicone sur le capteur .....	171
Annexe 9 : Détermination de l'humidité introduite par le carottage .....	173
Annexe 10 : Détermination de l'humidité au sein d'un forage par voie sèche dans la dalle à 60% HR .....	175

## Liste des figures

Figure 1: Illustration de la dégradation d'un pont de Bastogne (Demars Ph., 2001).....	14
Figure 2: Composants principaux constituant les bétons (Howard M.K., 2005).....	16
Figure 3: Eléments constitutifs d'un béton (Courard L., 2009).....	17
Figure 4: Mécanisme de corrosion (Mommer P., 2004).....	19
Figure 5: Liaison entre le degré de carbonatation et la teneur en eau de l'air (Courard L., 2010).....	21
Figure 6: Réaction sulfatique (Courard L., 2009).....	23
Figure 7: Bombe à carbure (Courard L., 2011b).....	24
Figure 8: Test au chlorure de calcium (Howard M.K., 2005).....	25
Figure 9: Sondes hygrométriques (Howard M.K., 2005).....	26
Figure 10: Cycle d'adsorption-désorption (Harrison P. J., 2006).....	27
Figure 11: Teneur en eau en fonction de l'humidité relative pour 3 échantillons de béton présentant des E/C différents (Harrison P. J., 2006).....	28
Figure 12: Mesure par résistivité électrique (Howard M.K., 2005).....	28
Figure 13: Principe de la mesure par sonde capacitive (Khelidj A., 2002).....	29
Figure 14: Exemple de courbe d'étalonnage d'une sonde capacitive (Godin J., 2002b).....	30
Figure 15: Illustration (a) et principe de fonctionnement (b) d'un gammadensimètre (Khelidj A., 2002).....	30
Figure 16: Profil de séchage d'une dalle (Harrison P.J., 2006).....	33
Figure 17: Evolution de l'humidité relative du béton ( $\phi$ ) en fonction de la profondeur (x) par rapport à la face exposée au séchage (Khelidj A., 2001).....	34
Figure 18: Principe de fonctionnement du radar (Viriyametanont K., 2008).....	35
Figure 19: Evolution de l'onde électromagnétique dans un milieu à faible perte électrique (Annan A.P., 2005).....	40
Figure 20: Rai et front d'onde (Giroux B., 2005).....	41
Figure 21: Changement de direction de l'onde à une interface entre deux milieux présentant des propriétés différentes (Giroux B., 2005).....	41
Figure 22: Résolutions verticale et latérale (Annan A.P., 2005).....	43
Figure 23: Impulsions clairement distinguables (a) et impulsions superposées (b) (modifié d'après Annan A.P., 2005).....	43
Figure 24: Résolution latérale (modifié d'après Annan A.P., 2005).....	44
Figure 25: Empreinte de l'antenne (Rial F.I., 2009).....	46
Figure 26: Influence de la teneur en eau sur les propriétés diélectriques des bétons en fonction de la fréquence (Soustos M.N., 2001).....	47
Figure 27: Influence de la teneur en eau sur les propriétés diélectriques des bétons (Soustos M.N., 2001).....	48
Figure 28: Résultat d'un CMP (modifié d'après Annan A.P., 2005).....	49
Figure 29: Position des composants vectoriels du champ magnétique et électrique sur une maille cubique du réseau spatial de Yee (Taflove A., 2005).....	52
Figure 30: Exemple de graphique espace-temps de l'algorithme de Yee pour une propagation d'onde unidirectionnelle (Taflove A., 2005).....	53

Figure 31: Variation de la vitesse de phase en fonction de la discrétisation et de la direction (Taflove A., 2005)	58
Figure 32: Evolution du champ électrique dans le vide .....	60
Figure 33: Géométrie (a) et évolution du champ électrique dans une dalle en béton infinie (b) .....	62
Figure 34: Evolution du champ électrique dans une dalle infinie .....	62
Figure 35: Géométrie (a) et évolution du champ électrique dans une dalle en béton (b) .....	63
Figure 36: Evolution du champ électrique dans une dalle en béton (sans onde directe) .....	64
Figure 37: Evolution du champ électrique dans une dalle finie de 1 à 2,1 nanosecondes .....	65
Figure 38: Evolution du champ électrique dans une dalle finie de 4,5 (a) à 8,5 nanosecondes (b).....	65
Figure 39: Influence de la teneur en eau sur les propriétés diélectriques des bétons (Soustos M.N., 2001) .....	66
Figure 40: Comparaison de l'évolution temporelle du champ électrique entre une dalle sèche (a) et une dalle humide (b).....	67
Figure 41: Comparaison de l'évolution temporelle du champ électrique entre une dalle sèche et une dalle humide sans onde directe.....	67
Figure 42: Géométrie (a) et évolution du champ électrique (b) dans le cas d'une superposition de deux dalles humides.....	69
Figure 43: Géométrie (a) et évolution du champ électrique (b) dans le cas d'une superposition d'une dalle sèche sur une dalle humide .....	70
Figure 44: Evolution du champ électrique dans le cas d'une superposition d'une dalle sèche sur une dalle humide (sans onde directe) .....	70
Figure 45: Evolution du champ électrique dans le cas d'une superposition d'une dalle sèche sur une dalle humide (de 1 à 2,1 nanosecondes) .....	71
Figure 46: Evolution du champ électrique dans le cas d'une superposition d'une dalle sèche sur une dalle humide (de 3 (a) à 3,5 nanosecondes(b)) .....	72
Figure 47: Evolution du champ électrique dans le cas d'une superposition d'une dalle sèche sur une dalle humide (de 4,5 (a) à 5 nanosecondes (b)) .....	74
Figure 48: Profil de séchage d'une dalle (modifié d'après Harrison P.J., 2006).....	75
Figure 49: Géométrie (a) et comparaison de l'évolution du champ électrique en fonction de la profondeur de la zone humide (b) .....	76
Figure 50: Géométrie (a) et évolution du champ électrique (b) en présence d'un gradient constitué de 3 couches .....	76
Figure 51: Evolution du champ électrique en présence d'un gradient constitué de 3 couches (sans onde directe) .....	77
Figure 52: Evolution du champ électrique en présence d'un gradient constitué par 3 couches (de 1 à 4,5 nanosecondes) .....	78
Figure 53: Géométrie (a) et évolution du champ électrique (b) en présence d'un gradient constitué de 40 couches .....	78
Figure 54: Comparaison de l'évolution temporelle du champ électrique entre une dalle totalement sèche, totalement humide et une possédant un gradient.....	79
Figure 55: Approximation de l'évolution de la permittivité au sein de la dalle .....	80

Figure 56: Géométrie (a) et évolution du champ électrique (b) en présence d'un gradient constitué de 3 couches .....	81
Figure 57: Evolution temporelle du champ électrique (sans onde directe) (a) et position de l'onde à 1,3 nanosecondes (b).....	81
Figure 58: Géométrie (a) et évolution du champ électrique (b) en présence d'un gradient constitué de 40 couches .....	82
Figure 59: Evolution temporelle du champ électrique (sans onde directe) (a) et comparaison entre l'évolution temporelle du champ électrique pour une dalle totalement sèche, totalement humide et pour une possédant un gradient (b) .....	82
Figure 60: Comparaison entre l'évolution temporelle du champ électrique pour les deux configurations de gradients, pour une dalle totalement sèche et pour une dalle totalement humide .....	83
Figure 61: Evolution de la permittivité au sein de la dalle (gradient de 1 à 5cm).....	84
Figure 62: Evolution temporelle du champ électrique en fonction de la taille du gradient .....	85
Figure 63: Zone de réflexion due au gradient .....	86
Figure 64: Remontée capillaire dans le béton .....	87
Figure 65: Comparaison entre un gradient linéaire et un gradient non linéaire .....	87
Figure 66: Influence de la forme du gradient sur la zone de réflexion .....	88
Figure 67: Evolution de la permittivité au sein de la dalle (teneur en eau constante) .....	89
Figure 68: Evolution du champ électrique en fonction de l'épaisseur du gradient (teneur en eau constante) ...	90
Figure 69: Comparaison de l'évolution du champ électrique en fonction de l'épaisseur du gradient (teneur en eau constante (a) et variable (b)).....	90
Figure 70: Angle d'incidence de l'onde .....	91
Figure 71: Comparaison des réflexions dans différentes configurations.....	92
Figure 72: Visualisation du caractère totale de la réflexion sur une feuille métallique.....	92
Figure 73: Diminution du coefficient de réflexion en fonction de la taille du gradient .....	94
Figure 74: Dispositifs expérimentaux.....	97
Figure 75: Illustration du montage expérimental final .....	98
Figure 76: Eprouvettes en béton (a) et mesure de leurs masses (b) .....	99
Figure 77: Illustration des capteurs EL-USB II initiaux.....	102
Figure 78: Précision des mesures d'humidité relative (Lascarelectronics, 2010) .....	102
Figure 79: Précision des mesures de température (Lascarelectronics, 2010) .....	103
Figure 80: Système de stockage des données (a) et système de mesure (b).....	104
Figure 81: Capteur hygrométrique prêt à l'emploi dans le béton .....	104
Figure 82: Evolution des humidités relatives dans la pièce à 90%HR .....	105
Figure 83: Disposition verticale des capteurs dans la configuration n°1 .....	106
Figure 84: Disposition latérale des capteurs .....	106
Figure 85: Disposition verticale des capteurs dans la configuration n°2 .....	108
Figure 86: Réalisation des forages (a) et pose de la résine époxy sur les faces latérales des dalles (b) .....	108
Figure 87: Evolution des humidités relatives (dalle à 100%HR avant début des tests) .....	109

Figure 88: Antenne de 2,3 GHz (a) et unité de contrôle (b) .....	109
Figure 89: Caissons étanches (a) et solution saline saturée (b) .....	111
Figure 90: Evolution de l'humidité relative au sein des chambres .....	111
Figure 91: Teneur en eau en fonction de l'humidité relative.....	112
Figure 92: Détermination de la vitesse de propagation de l'onde avant (a) et après (b) traitement des signaux .....	114
Figure 93: Temps de propagation de l'onde dans la dalle humide de 2009 .....	114
Figure 94: Comparaison des courbes liant la teneur en eau à la permittivité diélectrique (modifié d'après Soustos M.N., 2001).....	116
Figure 95: Evolution de la température au sein de la dalle à 60% HR .....	117
Figure 96: Evolution de l'humidité au sein de la dalle à 60% HR .....	118
Figure 97: Comparaison entre le signal radar (a) et le profil d'humidité (b) (configuration n°1, premier jour) .	119
Figure 98: Mise en évidence de la position du pic de réflexion (dalle à 60% HR).....	119
Figure 99: Agrandissement sur le pic dû à l'interface entre les deux dalles (configuration n°1, premier jour)..	120
Figure 100: Comparaison entre le signal radar (a) et le profil d'humidité (b) (configuration n°1, 9 jours) .....	121
Figure 101: Agrandissement sur le pic dû à l'interface entre les deux dalles (configuration n°1, 9 jours).....	122
Figure 102: Superposition de deux dalles à 60% HR .....	123
Figure 103: Détermination de la variation du signal dû à la réflexion (a) et onde directe déduite (b).....	124
Figure 104: Comparaison entre la réflexion du signal radar (a) et le profil d'humidité (b) .....	125
Figure 105: Diminution de réflexion en fonction de la taille du gradient obtenu de manière expérimentale ...	126
Figure 106: Evolution de l'humidité au sein de la dalle à 100% HR .....	127
Figure 107: Evolution temporelle du champ électrique (a) et agrandissement sur le pic principal de l'onde directe (b) (configuration n°2, premier jour) .....	128
Figure 108: Evolution temporelle du champ électrique (a) et agrandissement sur le pic principal de l'onde directe (b) (configuration n°2, 20 jours).....	128
Figure 109: Comparaison de l'évolution temporelle du champ électrique entre les deux configurations .....	130
Figure 110: Profil avant (a) et après traitement (b) par les différents filtres (configuration n°2, premier jour de test) .....	131
Figure 111: Mise en évidence des hyperboles correspondant à la réflexion de l'onde sur les capteurs (configuration n°2, premier jour de test).....	131
Figure 112: Evolution temporelle du champ électrique au récepteur (ABC de Higdon).....	140
Figure 113: Comparaison PML-ABC de Higdon .....	142
Figure 114: Propagation de l'onde si l'émetteur est à une cellule de la condition limite .....	143
Figure 115: Propagation de l'onde si l'émetteur est dans la condition limite .....	144
Figure 116: Etude de l'influence du pas spatial sur la propagation de l'onde .....	145
Figure 117: Mesure de l'onde réfléchie sur une feuille métallique (a) et sur le béton (b) .....	168
Figure 118: Détermination du coefficient de réflexion avant (a) et après (b) correction des signaux .....	169
Figure 119: Détermination de la permittivité diélectrique des dalles par l'approche du coefficient de réflexion .....	169

Figure 120: Illustration du test de l'influence du silicone sur les capteurs .....	171
Figure 121: Influence du silicone sur l'humidité relative perçue par un capteur .....	171
Figure 122: Influence de l'humidité introduite par forage.....	173
Figure 123: Etude de l'évolution de l'humidité relative due au carottage par voie humide .....	173
Figure 124: Evolution de l'humidité relative dans un forage réalisé par voie sèche .....	175
Figure 125: Cycle d'adsorption-désorption (Harrison P. J., 2006).....	176

## **Liste des tableaux**

Tableau 1: Influence du rapport E/C sur la porosité (Hernández M., 2000) .....	18
Tableau 2: Teneur limite en ions chlorures (Courard L., 2010) .....	20
Tableau 3: Récapitulatif des différentes méthodes .....	31
Tableau 4: Valeurs typiques de propriétés électromagnétiques pour divers matériaux (Annan A.P., 2005; Giroux B., 2005 ; Soustos M.N., 2001 ; Viriyametanont K., 2008) .....	40
Tableau 5: Caractéristiques de la modélisation de l'onde directe sur une dalle sèche de dimension infinie .....	61
Tableau 6: Caractéristiques de la modélisation de l'onde sur une dalle sèche de dimension finie .....	63
Tableau 7: Propriétés électriques du béton humide retenu pour la modélisation .....	66
Tableau 8: Comparaison des coefficients d'atténuation pour une dalle sèche et une dalle humide .....	68
Tableau 9: Caractéristiques de la modélisation de l'onde sur deux dalles à saturation .....	69
Tableau 10: Caractéristiques de la modélisation étudiant l'influence de l'épaisseur du gradient .....	85
Tableau 11: Variation du coefficient de réflexion en fonction de l'épaisseur d'un gradient linéaire .....	93
Tableau 12: Caractéristiques théoriques des dalles de 2009 .....	98
Tableau 13: Caractéristiques expérimentales des dalles de 2009 .....	99
Tableau 14: Composition du béton constituant les dalles inférieures .....	100
Tableau 15: Résistance à la compression des dalles inférieures .....	101
Tableau 16: Mesure de l'absorption des dalles inférieures .....	101
Tableau 17: Teneur en eau des divers échantillons en fonction de l'humidité relative .....	112
Tableau 18: Détermination de la permittivité diélectrique des divers bétons .....	115
Tableau 19: Variation du coefficient de réflexion en fonction de l'épaisseur du gradient .....	125
Tableau 20: Caractéristiques de la modélisation montrant l'influence de la proximité d'une condition limite (en dehors de la couche limite) .....	142
Tableau 21: Caractéristiques de la modélisation montrant l'influence de la proximité d'une condition limite (dans la couche limite) .....	143
Tableau 22: Caractéristiques de la modélisation montrant l'influence du pas spatial .....	145
Tableau 23: Détermination de la permittivité de surface des dalles utilisées .....	170

# Introduction

Actuellement, le trafic autoroutier dans nos régions ne cesse de croître année après année, ce qui introduit une sollicitation toujours croissante des routes et des ouvrages d'art qui leur sont associés. Outre la construction et la densification du réseau, les autorités des différents pays ont aussi comme tâche l'entretien du réseau existant. Les contrôles des ouvrages d'art s'effectuent depuis le simple examen visuel, jusqu'à l'observation approfondie de l'ensemble de l'ouvrage, que ce soit par méthodes destructives (carottage,...) ou non destructives (technique acoustique, radar, méthode électrochimique,...) (De Smet D., 2005).

Cette tâche se révèle d'autant plus nécessaire qu'un grand nombre d'ouvrages d'art voient leur cycle naturel de vieillissement accéléré par la croissance du trafic (figure 1). En ce qui concerne la Wallonie, le réseau routier géré par la Direction Générale Opérationnelle 1 (DGO1) comporte près de 3000 ponts, dont l'entretien figure au rang des tâches essentielles. Divers phénomènes de dégradations physico-chimiques sont ainsi enregistrés : corrosion des aciers, carbonatation du béton, désintégration par action du gel et/ou des chlorures, réactions alcalis-granulats, etc. (Demars Ph., 2001 ; De Smet D., 2005).



Figure 1: Illustration de la dégradation d'un pont de Bastogne (Demars Ph., 2001)

Comme on peut s'en rendre compte dans le document de Courard (Courard L., 2010), la grande majorité des mécanismes de dégradation du béton pouvant mener à des délaminations<sup>1</sup> ont un point commun : la nécessité d'être en présence d'eau pour se développer. En plus, une fois ces divers

---

<sup>1</sup> Délaminations : séparation en lamelles d'un matériau macro-moléculaire

mécanismes enclenchés, la zone qui est délaminée constitue un vecteur préférentiel d'infiltration d'eau et d'ions dans le matériau. On peut donc constater que, dans les divers ouvrages, les zones humides sont potentiellement indicatrices de zones dégradées ou de zones qui risquent, à court terme, de se dégrader. Un outil prometteur pour la détection de zones humides est le GPR (Ground Penetrating Radar). En effet, cette technique non destructive, qui est très employée en géophysique depuis les années 80, présente l'avantage de détecter des ondes électromagnétiques qui seraient réfléchies par des structures présentant un contraste de permittivités électriques. Or il se trouve que ces propriétés électriques sont fonction de la teneur en eau. On voit donc apparaître ici le but de ce travail de fin d'étude : promouvoir le radar au rang de technique d'auscultation pour la prévention de la dégradation du béton (Annan A.P., 2005 ; Giroux B., 2005).

Depuis l'apparition sur le marché d'antennes de haute fréquence (jusque 3 GHz), cette technique est de plus en plus employée dans le domaine du génie civil et les exemples d'utilisation dans nos régions ne manquent pas. On peut citer la mise en évidence de battements sous les dalles de la chaussée d'autoroute A25 par l'entreprise G-Co, l'auscultation radar de la chape d'étanchéité du Viaduc de Laïta (France), la détection de câble de post-contrainte sur le Viaduc de Courrière,... Toutes ces applications ont été présentées durant la journée d'information « radar » du 20 mai 2010 à l'Université de Liège. Cette journée est la preuve que de plus en plus d'entreprises se spécialisent dans l'utilisation du radar : il est donc intéressant de montrer l'étendue des possibilités offertes par celui-ci (Van der Wielen A., 2011).

Ce travail de fin d'étude va s'orienter selon trois axes : tout d'abord, on retrouvera une recherche bibliographique sur la technique radar ainsi que sur l'impact de la présence d'eau dans le béton. Dans un second temps, une modélisation à l'aide du logiciel GprMax sera proposée. Finalement des dalles en béton seront utilisées dans le but de déterminer l'influence d'un gradient d'humidité sur la réflexion des ondes radar.

# 1ère partie : Recherche bibliographique

## 1. L'eau et le béton

Le béton peut être considéré comme un mélange de sable et de gros granulats liés ensemble par une pâte de ciment. Cette pâte de ciment composée de ciment et d'eau peut aussi contenir des adjuvants chimiques et naturels. Généralement, lorsque l'on parle de béton, on distingue dans celui-ci deux composants fondamentaux, à savoir les granulats et le mortier. Ce dernier est composé de sable et de ciment hydraté contenant différents silicates et aluminates de calcium hydratés. La figure 2 montre la répartition en volume des différents éléments constituant un béton. Bien entendu, il s'agit d'une composition standard, ces proportions peuvent légèrement varier en fonction des propriétés finales attendues (Courard L., 2008 ; Courard L., 2010 ; Hernández M., 2000 ; Howard M.K., 2005).

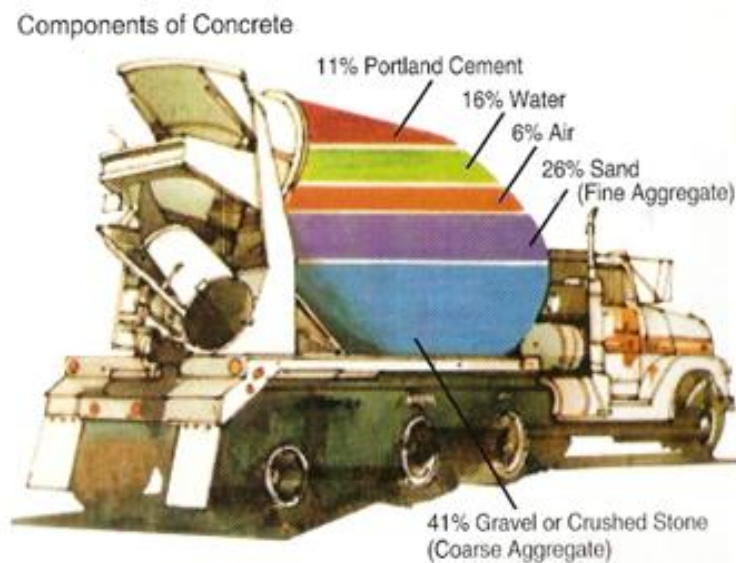


Figure 2: Composants principaux constituant les bétons (Howard M.K., 2005)

Contrairement aux idées reçues, le béton n'est pas un matériau parfaitement continu mais contient toute une série de pores de tailles diverses qui peuvent faciliter les processus de dégradations. Ceci sera expliqué dans les paragraphes suivants (Hernández M., 2000 ; Courard L., 2008 ; Courard L., 2010).

### 1.1. Porosité et perméabilité

Comme on peut le voir sur la figure 3, deux éléments influencent fortement les propriétés du béton : la granulométrie (des granulats et des sables), et le rapport eau-ciment (E/C). C'est ce dernier qui va avoir une grande influence sur la porosité (Courard L., 2009).

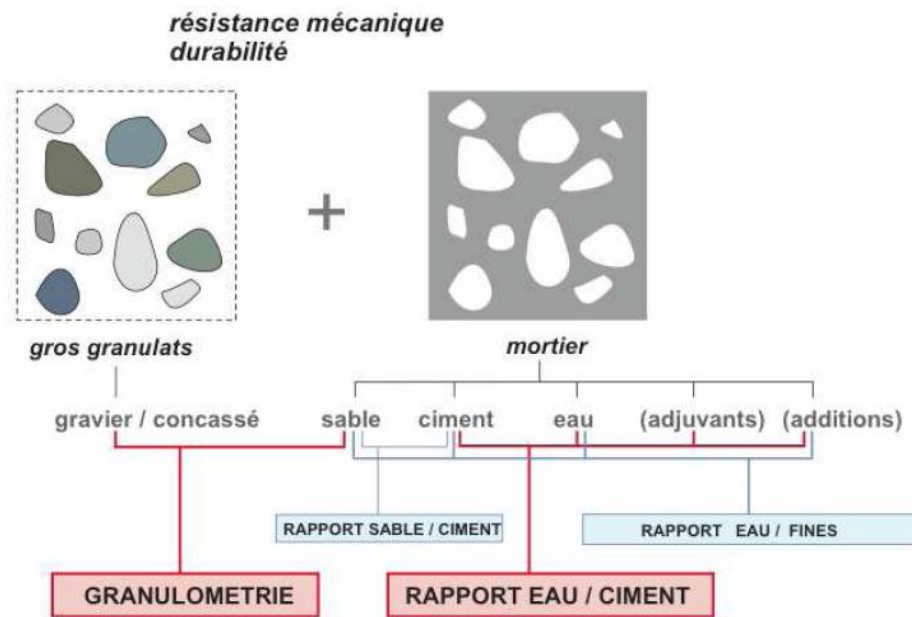


Figure 3: Eléments constitutifs d'un béton (Courard L., 2009)

Pour comprendre la relation entre le rapport eau-ciment et la porosité, nous pouvons faire un raisonnement assez simple. Supposons que l'on utilise une très grande quantité d'eau pour une très faible masse de ciment ( $E/C$  élevé), les grains de ciment seront éloignés les uns des autres et, après s'être complètement hydratés, il restera un surplus d'eau important, donnant lieu à une porosité capillaire très importante. La porosité du béton sera très grande et ses propriétés mécaniques seront plus faibles. Inversement, si la quantité d'eau est suffisamment faible par rapport à la masse de ciment ( $E/C$  faible), les grains de ciment sont très près les uns des autres. Toute l'eau pourra réagir avec le ciment et il ne restera que très peu de porosité capillaire. La porosité du béton sera très faible et les propriétés mécaniques du béton seront très élevées (Gagné R., 2010).

Ces pores sont déterminants pour la résistance et la durabilité du béton. En effet, une faible porosité constitue le meilleur moyen de défense des bétons contre tous les agents agressifs. La porosité est la conséquence naturelle de la quantité d'eau supplémentaire à celle nécessaire à l'hydratation ainsi que des vides éventuels entre les granulats. La porosité d'un matériau représente le volume de tous les capillaires cumulés. Il est important ici de bien faire la distinction entre porosité et perméabilité. C'est ainsi qu'un matériau peut être à la fois peu poreux et très perméable ou, au contraire, être relativement poreux mais ne pas se laisser traverser par la moindre goutte. Ce qui joue un rôle essentiel dans cette distinction est la taille des pores. Il est préférable que le réseau de pores capillaires soit constitué de pores les plus fins possibles car le degré d'interconnexion y est plus faible. La perméabilité de la pâte s'en trouve alors considérablement diminuée car il y a très peu de chemins préférentiels pour le passage des liquides, des gaz ou des ions potentiellement agressifs. Heureusement, la réduction du rapport  $E/C$  permet, non seulement de diminuer le volume total des pores capillaires mais elle permet aussi de réduire leur diamètre. Pour un  $E/C$  plus faible la porosité capillaire est en fait constituée d'un réseau de pores plus fins et plus discontinus (Ployaert C., 2009 ; Gagné R., 2010).

Dans le tableau 1 montrant des paramètres obtenus sur base d'un porosimètre à mercure, nous pouvons observer que, plus le rapport eau-ciment est grand, plus la porosité du béton est élevée (Hernández M., 2000).

Tableau 1: Influence du rapport E/C sur la porosité (Hernández M., 2000)

W/C ratio	Porosity (%)	Apparent density (g/cm <sup>3</sup> )	Real density (g/cm <sup>3</sup> )	Standard deviation of porosity
0,45	15,95	2,45	2,91	0,18
0,5	18,04	2,45	2,98	0,14
0,55	19,94	2,49	3,11	0,12
0,6	20,91	2,52	3,18	0,25

Généralement, on mesure la porosité accessible à l'aide de l'essai d'absorption d'eau par immersion à la pression atmosphérique. Pour obtenir la porosité, il suffit de multiplier la valeur d'absorption par la densité sèche du béton. Pour mieux comprendre, on peut reprendre un exemple cité par Ployaert (Ployaert C., 2009) : soit un morceau de béton de 2,2 dm<sup>3</sup> pesant 5,0 kg à l'état sec et 5,3 kg après immersion prolongée dans l'eau. La quantité d'eau absorbée est donc de 0,3 kg ou 0,3 dm<sup>3</sup>. Son absorption d'eau par immersion est de  $0,3/5 = 6\%$ . La densité sèche du béton est égale à  $5/2,2 = 2,27$ . Dès lors, sa porosité peut être directement déduite de l'essai, soit:  $6*2,27=13,6\%$ .

La valeur obtenue par absorption d'eau est donc l'image des mouvements capillaires dans les pores du béton qui sont ouverts sur le milieu ambiant. Ce paramètre peut être utilisé comme indicateur de la qualité du béton. Globalement, un béton présentant une absorption inférieure à 5,5-6% est de bonne qualité (Ployaert C., 2009).

## 1.2. Dégradations

Le béton n'est pas un matériau invulnérable. Il peut en effet être l'objet de nombreuses pathologies, pouvant réduire considérablement la durabilité d'un ouvrage si celui-ci n'est pas traité efficacement et durablement.

Dans les différents processus pouvant altérer le béton, les suivants sont les plus courants :

- La corrosion des aciers (chlorures et carbonatation)
- La dégradation du béton par cycles de gel-dégel
- La dégradation par réactions alcali-granulats
- Les réactions sulfatiques dans les bétons

Les processus de dégradations sont décrits ci-après. Dans l'observation d'une pathologie quelconque, plusieurs de ces processus peuvent jouer un rôle de manière simultanée. Cependant, pour être le plus clair possible, ils sont décrits séparément, en mettant chaque fois en évidence le rôle important joué par l'eau dans ces diverses formes de dégradations (Mommer P., 2004).

### 1.2.1. Corrosion des aciers

Dans les principales causes de dégradation de béton armé, on peut citer la corrosion des armatures. En effet, la formation de rouille, par un processus électrochimique, est expansive. Dès lors, cela provoque l'apparition de fissures et, si le processus se poursuit, on pourra même observer des décollements de plaquettes de béton. Ces décollements apparaissent d'autant plus vite que le béton présente une faible résistance à la traction et que le recouvrement des armatures est faible. Outre l'expansion, la corrosion des aciers entraîne aussi une diminution de la section des barres en

acier. Cette diminution de section s'accompagne d'une diminution de la résistance de la structure ce qui, à terme, pourra présenter un certain danger (Courard L., 2010; Mommer P., 2004).

Le processus électrochimique à la base de la formation de la rouille peut s'expliquer comme suit : lorsque l'on place de l'acier dans une solution aqueuse, des atomes de fer entrent en solution sous forme d'ions de fer ( $Fe^{2+}$ ). A cet endroit (appelé anode), des électrons négatifs se dégagent ( $2e^-$ ). Si, à un autre endroit (appelé cathode), l'oxygène est présent dans le milieu aqueux, celui-ci se transforme en hydroxyle ( $OH^-$ ), en utilisant à cette fin les électrons qui se libèrent lorsque le fer entre en solution. Finalement, les hydroxydes réagissent avec les ions de fer et forment l'hydroxyde de fer ( $Fe(OH)_2$ ) qui précipite et se transforme, par réaction avec l'oxygène, en oxyde de fer (rouille). On peut voir cela sur la figure 4 ci-dessous (Mommer P., 2004).

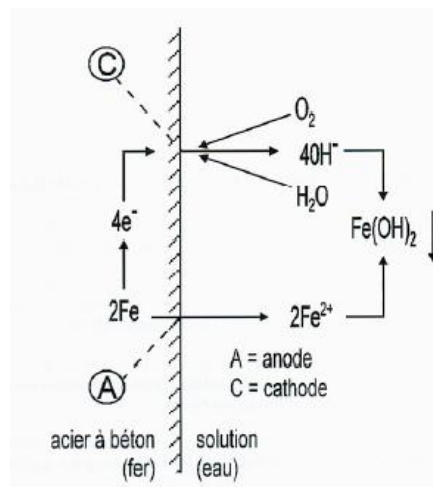


Figure 4: Mécanisme de corrosion (Mommer P.,2004)

En général, l'anode et la cathode sont très proches et forment « une micro-cellule ». Dans ce cas, on parle de corrosion par piqûre, ce qui est typiquement le cas dans une corrosion par les chlorures. Dans le cas d'une carbonatation, la corrosion est généralisée à une zone beaucoup plus importante. Ici, le rôle joué par l'eau est important, puisque sans elle, cette réaction de corrosion n'a pas lieu. Il est bon de signaler également que la nature du métal ainsi que le milieu électrolytique (surtout le pH) sont deux facteurs importants dans les processus de corrosion (Courard L., 2010 ; Mommer P., 2004).

### 1.2.2. Action des chlorures sur les aciers

L'hydroxyde de fer ( $Fe(OH)_2$ ) est stable en milieu basique et contribue à protéger l'armature en formant une couche passivante. Cependant, lorsqu'ils sont présents, les ions chlorures performent cette couche par formation d'un complexe du type  $FeCl^+$ . Ces ions peuvent provenir de l'extérieur (eau de mer, vent marin, sel de déverglaçage) mais aussi de l'intérieur (granulats marins, accélérateur de prise du type  $CaCl_2$ ). Une fissure assez large va favoriser la pénétration de ces ions.

Lorsque ces ions sont en contact avec les armatures, un processus de corrosion se met en route. La corrosion due aux chlorures étant locale, elle provoque des piqûres caractéristiques dans l'acier. Le tableau 2, extrait de la norme EN 206-1:2000, nous donne les limites autorisées en ce qui concerne les teneurs en chlorures dans les bétons (les encadrés font référence au contexte belge).

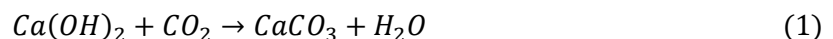
Tableau 2: Teneur limite en ions chlorures (Courard L., 2010)

Utilisation du béton	Classe de chlorures	Teneur maximum en Cl- rapportée à la masse de ciment
Ne contenant ni armature en acier ni pièces métalliques noyées	Cl 1,0	1%
Contenant des armatures en acier ou des pièces métalliques noyées	Cl 0,20	0,20%
	Cl 0,40	0,40%
Contenant des armatures de précontrainte en acier	Cl 0,10	0,10%
	Cl 0,20	0,20%

On peut noter que les critères sont beaucoup plus sévères en ce qui concerne les bétons précontraints, vu le caractère plus fragile de leur rupture. La rupture d'un câble de précontrainte peut en effet provoquer des vibrations dans la structure et un transfert brusque de la charge aux autres armatures, ce qui risque d'entraîner une rupture en cascade et l'effondrement de la structure (Courard L., 2010 ; Mommer P., 2004).

### 1.2.3. Carbonatation du béton

Il faut savoir que le béton présente naturellement un caractère basique, de par la présence de la chaux qu'il contient. En effet, celle-ci étant légèrement soluble, l'eau interstitielle présente dans les capillaires est portée à un pH de plus ou moins 12,5. Ceci présente un avantage certain puisque, grâce à cette alcalinité élevée, le béton assure la passivité des armatures et donc la corrosion des armatures présentes dans les bétons armés est fortement ralentie. Malheureusement, cette chaux réagit avec le dioxyde de carbone pour former du carbonate de calcium, selon la réaction suivante:



Il faut à nouveau insister ici sur le rôle important joué par l'eau, vu que cette réaction ne se déroule qu'en milieu aqueux. En ce qui concerne l'humidité nécessaire pour la réalisation de la réaction, il existe une certaine marge : si l'humidité relative de l'air est trop faible, la réaction ne se fait pas. Sous eau, la carbonatation ne se produit pas non plus. On peut voir sur la figure 5 que l'optimum se situe aux alentours de 50% d'humidité relative.

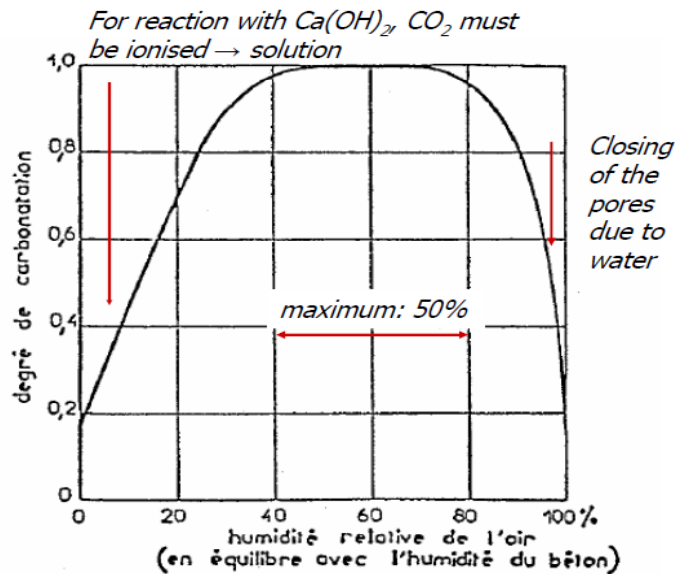


Figure 5: Liaison entre le degré de carbonatation et la teneur en eau de l'air (Courard L., 2010)

Il faut savoir que cette réaction est expansive, dès lors, le carbonate de calcium va progressivement boucher les pores et la vitesse de réaction va donc décroître avec le temps. Ce phénomène naturel, qui nécessite un apport constant de  $\text{CO}_2$  frais, n'est guère dangereux pour les bétons non-armés puisque la seule conséquence est une diminution du pH : on peut même dire qu'elle est bénéfique dans la mesure où la porosité va diminuer et la résistance à la compression augmenter. Par contre, pour les bétons armés, la passivation ne sera plus assurée et la corrosion des armatures va se remettre en route. Or, vu précédemment, la corrosion s'accompagne d'une augmentation de volume qui peut créer une fissuration et un écaillage du béton. L'évolution de cette pathologie dépend aussi des caractéristiques intrinsèques (teneur en chaux, capillarité, perméabilité,...) et extrinsèques au béton (humidité de l'environnement,...) (Courard L., 2010 ; Mommer P., 2004).

#### 1.2.4. Cycles de gel-dégel

A l'instar de la corrosion, si la résistance à la traction du béton n'est pas suffisante, les cycles de gel-dégel peuvent créer des fissurations internes. A long terme, ces fissurations pourront générer un écaillage du béton. Le problème se pose car l'eau est un des rares éléments à présenter un volume plus important à l'état solide qu'à l'état liquide. En effet, lorsqu'elle gèle l'eau occupe un volume d'environ 10% supérieur au volume occupé par celle-ci à l'état liquide. Bien entendu, la quantité d'eau contenue dans le béton joue un rôle essentiel dans ce processus puisque les risques de dégradations n'existent que si le béton est dans un état de saturation ou en tout cas très proche de celui-ci.

On peut aussi signaler que la dimension des pores accessibles à l'eau va jouer un rôle fondamental dans le processus de dégradation. En effet, les forces d'adhésion capillaire empêchent la formation de la glace. Dans les pores très fins, où ces forces sont importantes, le point de congélation s'en retrouve donc abaissé. Dans nos latitudes, seule l'eau contenue dans les pores les plus grands, c'est-à-dire des pores dont la dimension est supérieure à  $10^{-6}m$ , est susceptible de geler. D'après ce qui vient d'être dit, on peut comprendre que le rapport eau/ciment est un facteur déterminant pour éviter les dégâts dus aux cycles de gel-dégel. En effet, plus celui-ci est faible, plus la

quantité d'eau susceptible de geler est faible. De plus, la résistance du béton augmente et le point de congélation diminue car le diamètre des pores est plus faible. D'une manière générale, dans le document de Courard (Courard L., 2010), il est indiqué que, pour pouvoir résister de manière appropriée aux divers cycles de gel-dégel, un béton doit présenter un rapport eau-ciment ne dépassant pas 0,5.

Il est bon de souligner que les sels de déverglçage peuvent aggraver la situation existante. En effet, lorsque ceux-ci sont utilisés, ils puisent la chaleur nécessaire pour faire fondre la glace ou la neige dans la couche superficielle du béton. Cela crée une chute brutale de la température et donc un retrait important pouvant engendrer des fissures.

Le comportement au gel-dégel peut être amélioré en ajoutant au béton un entraîneur d'air qui va permettre de réaliser des vases d'expansion, afin de limiter les contraintes internes dans le béton lorsque l'eau gèle. Il faut faire attention au fait que ces entraîneurs d'airs causent une chute de la résistance du béton de l'ordre de 10 à 15% (Courard L., 2010 ; Mommer P., 2004).

#### 1.2.5. Réaction alcali-granulats dans les bétons

Cette pathologie est facilement reconnaissable par le faïençage typique et l'exsudation d'un gel blanc-ocre qu'elle produit. Il s'agit d'une réaction se produisant entre certaines formes de silice amorphes ou mal cristallisées et des alcalis (sodium (*Na*) et potassium (*K*)), qui sont présents dans le ciment ou apportés par des sources extérieures.

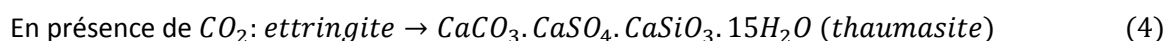
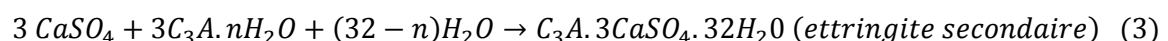
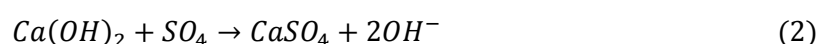
La réaction alcali-granulats produit un gel de silicates alcalins qui est fortement expansif. Si le béton présente une résistance à la traction insuffisante, des fissures vont apparaître. De nouveau, il faut un taux d'humidité élevé pour que cette réaction se déroule. En effet, les alcalins doivent être transportés par l'eau. Les conditions les plus propices à l'apparition de cette réaction correspondent à un taux d'humidité de l'ordre de 80%.

Généralement, les bétons concernés par cette pathologie sont constitués par des granulats siliceux ainsi que certains calcaires silicifiés. Le problème peut aussi provenir de silex qui seraient présents dans le sable (Courard L., 2010 ; Mommer P., 2004).

#### 1.2.6. Les réactions sulfatiques dans les bétons

Comme leur nom l'indique, ces réactions regroupent l'ensemble des réactions faisant intervenir des sulfates ( $SO_4^{2-}$ ). Ces réactions sulfatiques sont principalement responsables de la formation de deux composés : l'ettringite et la thaumasite.

Les réactions de formation de l'ettringite et de la thaumasite sont données par les équations 3 et 4.



L'ettringite secondaire ainsi que la thaumasite présentent un caractère fortement expansif, ce

qui va provoquer la fissuration du béton durci (figure 6). A terme, il en résulte donc une décomposition de celui-ci.

Les sources externes de sulfates sont nombreuses : le milieu marin, certaines nappes phréatiques, le stockage de matières organiques en décomposition,... (Courard L., 2010 ; Mommer P., 2004).

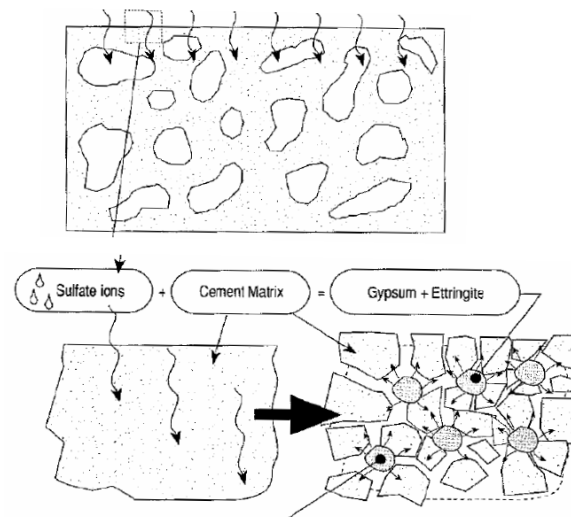


Figure 6: Réaction sulfatique (Courard L., 2009)

Dans les deux paragraphes précédents, le rôle de la porosité dans la durabilité des bétons mais aussi le rôle joué par l'eau dans les dégradations ont été mises en évidence. Cela justifie l'intérêt de ce travail de fin d'étude qui vise la mise en évidence de gradients d'humidité présents dans les bétons par la technique du radar. Ces gradients d'humidité sont inévitables, vu la lenteur des phénomènes de transfert d'humidité. La technique du radar qui apparait prometteuse pour obtenir des informations sur la teneur en eau lors de l'auscultation des structures n'est pas la seule qui peut être utilisée. En effet, il existe un ensemble d'autres techniques qui sont beaucoup plus spécifiques et utilisées dans ce but. Le chapitre suivant va tenter de donner un rapide aperçu des différentes techniques que l'on peut rencontrer pour mesurer l'humidité dans les bétons.

### 1.3. Techniques de mesure de l'humidité

Il existe deux types de mesure de l'humidité : des mesures qualitatives et des mesures quantitatives. Dans ce travail, l'accent est mis sur les tests quantitatifs qui peuvent aboutir à des résultats numériques. Dans la suite de ce paragraphe, sept techniques courantes de mesures de l'humidité seront mises en évidence, à savoir : la méthode gravimétrique, la bombe à carbure, le test au chlorure de calcium, la mesure par sonde hygrométrique, la mesure par résistivité électrique, la mesure par sonde capacitive et, enfin, la mesure par source radioactive (Cailleux E., 2010 ; Howard M.K., 2005; Khelidj A., 2001.).

#### 1.3.1. Méthode gravimétrique

Cette méthode est celle qui est inconditionnellement la plus connue. Elle consiste à venir prélever dans la dalle un échantillon représentatif de celle-ci, le peser puis le faire sécher en étuve (généralement à 105°C) jusqu'à stabilisation de la masse. On considère que la masse est constante si

la variation entre deux mesures est inférieure à 0,05% en 24 h (NBN B15-215 :1989). La teneur en eau est trouvée en mesurant la différence entre la masse humide et sèche, divisée par la masse sèche de la carotte. Généralement, on considère que le meilleur échantillon est fourni par un carottage en plein cœur de la dalle avec un diamètre d'au moins trois fois le diamètre du plus gros granulats. Bien entendu, le carottage doit se faire par voie sèche et non par voie humide, afin de ne pas introduire d'eau supplémentaire (Cailleux E., 2010 ; Howard M.K., 2005 ; Ployaert C., 2009).

A l'aide de cette technique, on peut obtenir des résultats très précis de la teneur en eau libre du béton. Cependant, la qualité de résultat dépend du soin apporté à l'échantillonnage. Après extraction, l'échantillon doit être immédiatement enveloppé dans un élément imperméable afin que la teneur en eau ne change pas durant son trajet et son stockage (Howard M.K., 2005.).

L'obtention d'échantillons secs par étuvage est un des désavantages de cette technique car elle prend un certain temps : les résultats ne peuvent donc pas être immédiats. On peut aussi noter le fait qu'il s'agit d'une méthode destructive vu qu'elle exige un carottage. Afin de limiter cet inconvénient, la récupération des carottes réalisées pour d'autres analyses peut se faire. Cependant, la majorité de ces carottages se fait par voie humide. Dès lors, ces carottes ne peuvent être utilisées pour réaliser un test d'humidité par gravimétrie. Finalement, il faut noter le fait que l'on obtient simplement une teneur moyenne d'eau, sans indication sur les possibles gradients d'humidité au sein de cette éprouvette (Cailleux E., 2010 ; Howard M.K., 2005).

### 1.3.2. La bombe à carbure

Il s'agit aussi d'une méthode destructive permettant d'obtenir une teneur globale en eau d'un échantillon. On choisit de nouveau un échantillon représentatif du béton étudié. Une fois extrait, il est concassé à l'aide d'un marteau et est placé dans un flacon spécialement prévu à cet effet (figure 7).



Figure 7: Bombe à carbure (Courard L., 2011b)

La teneur en eau de l'échantillon est déduite en mesurant la pression produite par un gaz (acétylène) issu de la réaction entre l'eau contenue dans l'échantillon et le carbure de calcium placé par après dans l'appareil au moyen d'une capsule (Cailleux E., 2010 ; Courard L., 2011b).

### 1.3.3. Test au chlorure de calcium

Ce test, très utilisé aux Etats-Unis, consiste à mesurer la variation de poids de cristaux de chlorure de calcium placés sous une cloche parfaitement scellée au support (figure 8). Le dôme possède une hauteur de 30 mm et une surface de 460 cm<sup>2</sup>.



Figure 8: Test au chlorure de calcium (Howard M.K., 2005)

Chaque kit d'essai contient également un récipient en plastique de 75 mm de diamètre muni d'un couvercle contenant 16 g de chlorure de calcium. Au temps initial, on réalise une mesure du poids du disque et des éléments constitutifs à savoir, le couvercle et la bande d'étanchéité maintenant celui-ci sur le récipient. Ensuite, le récipient ouvert est placé sur l'élément en béton préalablement nettoyé et le dôme est scellé au-dessus de la zone centrée sur le récipient au moyen d'une bande adhésive et étanche (Howard M.K., 2005 ; Cailleux E., 2010).

Après une période de 60 à 72 h, le dôme est ouvert et le plus rapidement possible le couvercle est replacé sur le récipient contenant le chlorure de calcium. Pour des raisons de précision dans la mesure ultérieure du poids, la bande étanche prévue à cet effet est pesée avec le reste des éléments au temps initial et est réutilisée ici pour la pesée finale. De la différence de poids, on détermine une mesure du taux de vapeur d'eau émise. Malheureusement, ce test ne permet de déterminer que l'humidité émise par les deux premiers centimètres de la dalle. Dès lors, il n'est pas un bon indicateur de l'humidité en profondeur d'une dalle. De plus, celui-ci nécessite une surface horizontale pour pouvoir être utilisé (Howard M.K., 2005).

Ce test est très sensible aux conditions extérieures à savoir : la température de la dalle et le taux d'humidité de l'air. Il faut donc réaliser un certain nombre d'essais pour avoir des résultats représentatifs (Howard M.K., 2005).

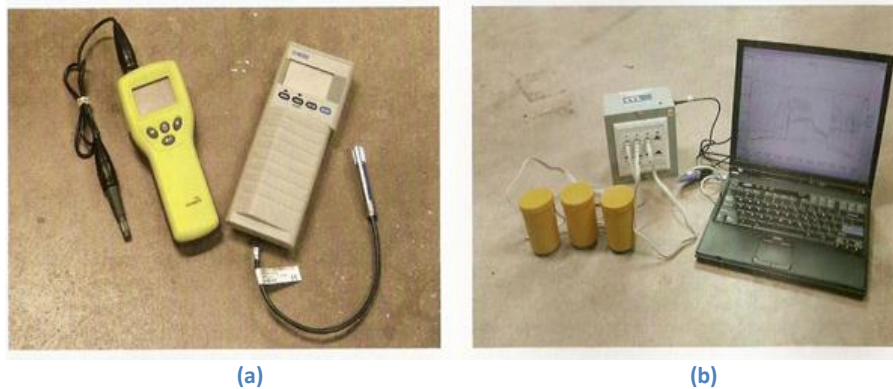
### 1.3.4. Mesure par sonde hygrométrique

Une sonde compacte est placée dans une cavité réalisée à une profondeur précise dans l'élément en béton (figures 9a et 9b). L'humidité relative<sup>2</sup> est mesurée à l'intérieur de la cavité (due à l'échange hydrique entre le béton et l'air de la cavité), après obturation de la partie supérieure et stabilisation du système. Si plusieurs forages sont réalisés à des profondeurs différentes, on peut

---

<sup>2</sup>Humidité relative : Rapport entre la quantité de vapeur d'eau contenue dans un volume d'air donné à une température donnée et la quantité d'eau contenue par ce même volume d'air à saturation (100%) (Cnrtl, 2009)

obtenir un profil de l'humidité relative en fonction de la profondeur. Les sondes d'humidité relative peuvent être connectées à un système d'enregistrement de données pour finalement obtenir une évolution de l'humidité relative en fonction du temps (Cailleux E., 2010 ; Howard M.K., 2005).



(a) (b)  
Figure 9: Sondes hygrométriques (Howard M.K., 2005)

Howard (Howard M.K., 2005) rappelle qu'il faut faire attention au fait que la sonde doit être isolée de toute une partie de la paroi du forage au moyen d'un tube en plastique, par exemple. En effet, si la sonde est isolée de cette manière, elle donne une information sur la teneur en humidité de la partie inférieure du forage qui est laissée libre. Cela permet de connaître la valeur du taux d'humidité à une profondeur connue et non pas une valeur moyennée sur la hauteur. Un autre point mis en avant par Grasley (Grasley Z.C., 2004) concerne l'importance d'une cavité la plus petite possible. En effet, plus le volume de la cavité est faible, plus la localisation spatiale de la mesure est précise. De plus, le temps de réponse est rapide, vu que l'équilibre se fait beaucoup plus rapidement que dans un grand volume.

Les mesures d'humidité relative par sonde hygrométrique ont généralement une précision de 2%. Cette précision s'obtient bien entendu en faisant attention à tous les détails de la procédure et demande également une bonne calibration des capteurs. Il est important de signaler qu'avant tout test, il faut attendre l'équilibre thermique entre l'air de la cavité et la température du béton. En effet, réaliser un forage provoque un dégagement de chaleur, une mesure de l'humidité relative qui se ferait directement après forage ne serait donc pas exacte (Howard M.K., 2005).

Dans ce type d'appareil et contrairement aux deux techniques qui vont suivre, la mesure est prise dans l'air de la cavité et non sur le béton. En ce qui concerne le type de sonde, le marché est dominé par les hygromètres capacitifs dont l'élément sensible est un condensateur dont le diélectrique est constitué d'un polymère possédant des propriétés hygroscopiques<sup>3</sup>. La capacité du condensateur varie selon l'équilibre atteint avec la vapeur d'eau contenue dans l'air humide. Il existe aussi des hygromètres résistifs basés sur un principe similaire et utilisant aussi les propriétés d'un matériau hygroscopique. Comme dit précédemment, dans les mesures par sondes hygrométriques, la température joue un rôle important. Dans ces capteurs, on retrouve assez souvent des programmes de compensation des mesures en fonction de la température (Lardière C., 2010).

Cette technique a un inconvénient majeur, elle fournit une mesure de l'humidité relative. Or,

---

<sup>3</sup>Substance hygroscopique : substance ayant la propriété de voir sa teneur en eau varier en fonction de l'humidité relative de l'air avec laquelle elle est en équilibre. (Lardière C., 2010)

deux dalles ne peuvent pas être comparées entre elles sur base de l'humidité relative : la comparaison ne peut se faire que sur la teneur en eau. Pour une même humidité relative, la teneur en eau de deux dalles peut être différente. Il est donc important de ne pas confondre ces deux notions. De plus, Clermont (Clermont G., 2005) nous rappelle une limitation de la mesure par humidité relative : lorsque le capteur nous indique 100%, l'eau capillaire constitue en réalité un mince film qui mouille tout juste les parois de la cavité où est placée la sonde. Cela ne signifie aucunement que la cavité soit remplie d'eau. Au-delà de cet instant, il peut encore y avoir augmentation de la teneur en eau par remplissage des pores ou de la cavité sans observer une évolution de l'humidité relative (Clermont G., 2005 ; Harrison P. J., 2006).

Ce TFE ne parle pas de l'étude de gradients au sein de dalles immergées. Dès lors, seuls des taux d'humidité relative inférieurs à 100% sont rencontrés. Dans ce cas, la remarque formulée par Clermont (Clermont G., 2005) n'a plus lieu d'être et un lien entre le taux d'humidité relative et la teneur en eau peut être trouvé par essais. Cette approche sera utilisée dans la partie expérimentale. Certains auteurs, parmi lesquels on peut citer Harrison (Harrison P. J., 2006), ont déjà réalisé des essais similaires ; ils ont pu mettre en évidence que le chemin suivi, pour arriver à un taux d'humidité voulu sur un échantillon, aura une influence. En effet, le cycle d'adsorption-désorption n'est pas linéaire ; il présente l'hystérésis décrit sur la figure 10 (Harrison P. J., 2006) :

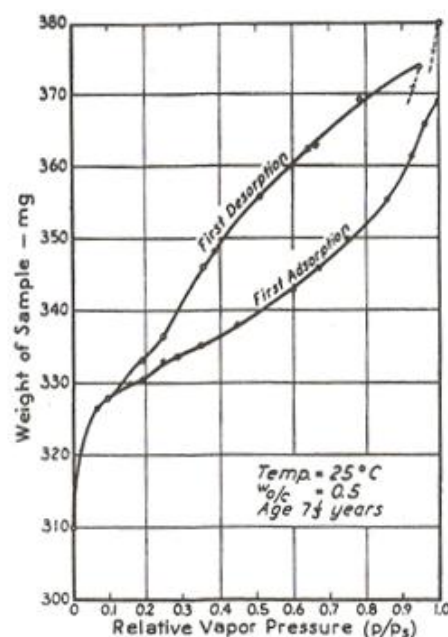


Figure 10: Cycle d'adsorption-désorption (Harrison P. J., 2006)

En conclusion, l'allure des courbes reliant la teneur en eau à l'humidité relative est fonction du chemin, c'est-à-dire de la procédure à suivre puisque l'on constate que l'humidité perdue durant le premier séchage (désorption) n'est pas complètement remplacée durant la phase d'adsorption, excepté pour les faibles humidités relatives. Il faut donc toujours exprimer la technique utilisée pour trouver la corrélation entre ces deux paramètres. Dans le document d'Harrison (Harrison P. J., 2006), nous retrouvons un exemple de graphique liant la teneur en eau et l'humidité relative (figure11).

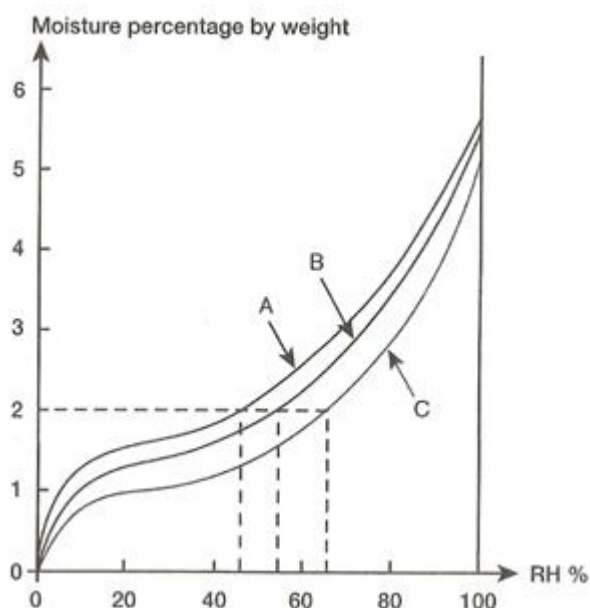


Figure 11: Teneur en eau en fonction de l'humidité relative pour 3 échantillons de béton présentant des E/C différents (Harrison P. J., 2006)

L'allure des courbes liant la teneur en eau et l'humidité relative n'est pas linéaire. De plus, ces courbes montrent bien que la teneur en eau de bétons (présentant des E/C différents) peut être identique alors que l'humidité relative est différente. Les courbes A, B et C représentent respectivement des bétons avec des rapports E/C de 0,4, 0,5 et 0,7. Ici, les courbes sont obtenues par adsorption. Si elles avaient été obtenues par séchage, elles auraient été sensiblement plus élevées dans la partie centrale (cf. figure 10) (Harrison P. J., 2006).

### 1.3.5. Mesure par résistivité électrique

Pour mesurer l'humidité en surface à l'aide de cette méthode, des sondes doivent être placées en contact avec le béton pour une mesure en surface (figure 12). Pour une mesure plus en profondeur, deux électrodes de métal doivent y être insérées.



Figure 12: Mesure par résistivité électrique (Howard M.K., 2005)

La résistance électrique présentée par un matériau étant fonction de la teneur en eau, on peut la déduire de la mesure de résistivité. Initialement, ce test a été mis au point pour déterminer l'humidité présente dans le bois. Son utilisation a été ensuite extrapolée au béton. Malheureusement, dans celui-ci, la résistance électrique est fonction d'un nombre de facteurs plus importants. On retrouve bien entendu la teneur en eau mais aussi la présence d'alcalins, la présence

de chlorure, la carbonatation, la composition du ciment,... L'analyse des résultats obtenus devient donc assez complexe (Clermont G., 2005 ; Howard M.K., 2005).

### 1.3.6. Mesure par sonde capacitive

La mesure de la teneur en eau d'une dalle en béton à l'aide d'une sonde capacitive utilise la propriété de permittivité diélectrique apparente ( $\epsilon'$ ) d'un matériau humide. Deux électrodes sont introduites dans le matériau, celles-ci forment les éléments constitutifs d'une capacité C dont le diélectrique est constitué par le béton compris entre ces deux électrodes (Godin J., 2002b ; Khelidj A., 2001).

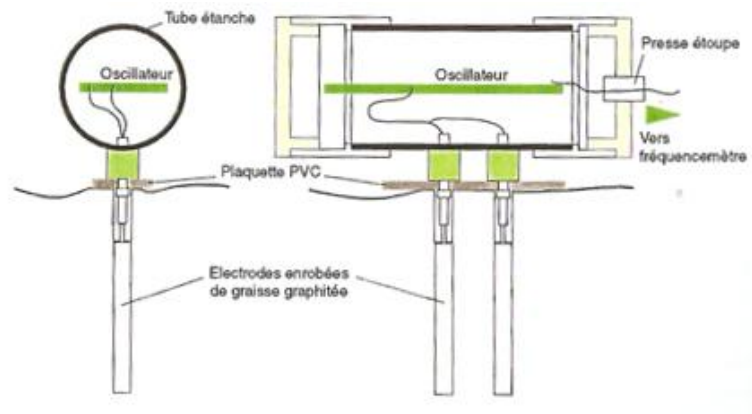


Figure 13: Principe de la mesure par sonde capacitive (Khelidj A., 2002)

Nous avons :

$$C = \frac{(\epsilon' \cdot \epsilon^0)}{X} \quad (5)$$

avec :

$\epsilon'$  = Permittivité diélectrique apparente du matériau (exemple :  $\epsilon'_{\text{béton}} = 2 \text{ à } 7$ ;  $\epsilon'_{\text{eau}} = 80$ ),

$\epsilon^0$  = Permittivité du vide ( $\epsilon^0 = 8,84 \cdot 10^{-12} \text{ Farad/mètre}$ ).

X = Coefficient lié à la géométrie des électrodes.

Bien entendu, en fonction de la localisation des électrodes, il est possible de réaliser une mesure en surface ou une mesure plus en profondeur. De plus, comme dans le cas de la sonde hygrométrique, on peut obtenir une idée des gradients d'humidité au sein de la dalle en venant placer des électrodes tous les centimètres par exemple. Une fois les électrodes mises en place, celles-ci sont raccordées à un oscillateur (figure 13). La teneur en eau de l'élément en béton peut être déterminée car cette teneur modifie fortement la constante diélectrique du matériau. Cela se traduit par une variation de la fréquence de l'oscillateur, déterminée par la valeur prise par la capacité (Godin J., 2002b ; Cailleux E., 2010 ; Khelidj A., 2001).

Avant toute étude, il faut réaliser un étalonnage des sondes en laboratoire au moyen d'un échantillon de l'élément étudié. Cet étalonnage a pour but d'obtenir une courbe liant les fréquences obtenues durant le test à une teneur en eau. L'échantillon est saturé et, ensuite, progressivement séché en étuve. Pendant ce temps, la variation de fréquence est mesurée et reliée à la teneur en eau

obtenue par pesée. La loi liant la variation de fréquence et la teneur en eau est une loi linéaire comme on peut le voir sur l'exemple de la figure 14.

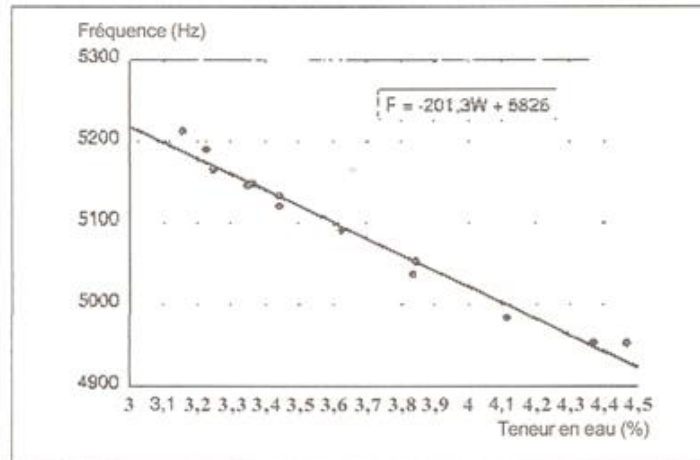


Figure 14: Exemple de courbe d'étalonnage d'une sonde capacitive (Godin J., 2002b)

En ce qui concerne la mise en place des électrodes, ils sont placés dans des réservations prévues avant coulage de la dalle. Si celles-ci n'ont pas été prévues, ils sont placés après prise à l'aide d'un forage dont le diamètre est légèrement supérieur à celui des électrodes. On réalise la continuité électrique entre le béton et celles-ci au moyen d'une graisse conductrice (Godin J., 2002b ; Khelidj A., 2001).

### 1.3.7. Mesure par source radioactive

Ce paragraphe permet d'aborder le principe du gammadensimètre dont l'illustration et le principe de fonctionnement sont repris sur la figure 15.

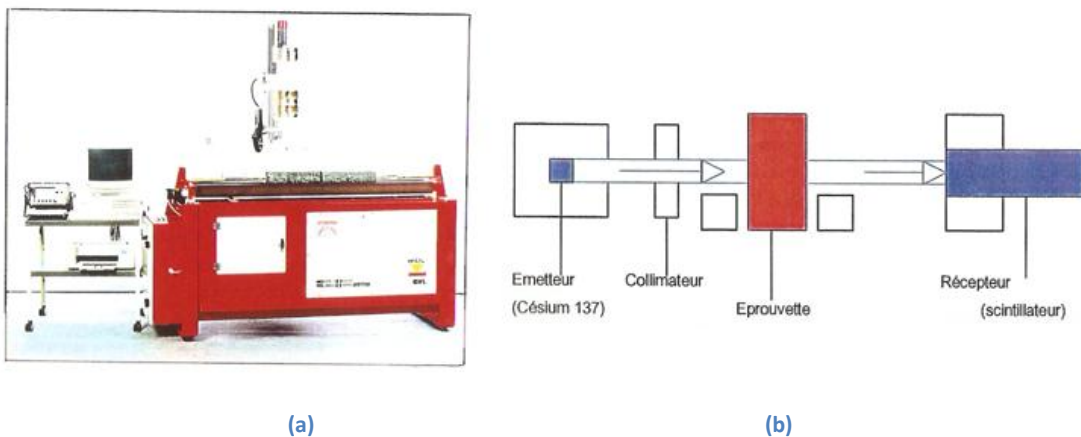


Figure 15: Illustration (a) et principe de fonctionnement (b) d'un gammadensimètre (Khelidj A., 2002)

Cet appareil contenant une source radioactive, à savoir du Césium 137, émet des photons gamma. Plus la matière traversée par ces photons est dense, plus l'atténuation de ceux-ci est importante. Dès lors, on peut lier à une densité, une variation du nombre de photons recueillis par rapport à ceux émis. La masse volumique du matériau est évaluée grâce à l'équation 6, donnée par Godin (Godin J., 2002a).

$$\rho = -\frac{1}{z \cdot \mu' \cdot x} \cdot \ln\left(\frac{N_0}{N}\right) \quad (6)$$

avec :

$N_0$  = Nombre de photons incidents.

$N$  = Nombre de photons recueillis.

$\mu'$  = Coefficient d'absorption massique du matériau ( $cm^2 \cdot g^{-1}$ ).

$\rho$  = Masse volumique du matériau ( $g \cdot cm^{-3}$ ).

$x$  = Épaisseur du matériau ( $cm$ ).

$z$  = Coefficient de correction défini par la géométrie de l'appareil.

En connaissant  $z$  et  $\mu'$ , la masse volumique du matériau peut être déterminée. La variation de masse volumique totale au cours du temps peut être reliée à la variation de teneur en eau massique de l'échantillon (Godin J., 2002a).

Il existe une forme portable d'appareil qui contient lui aussi une source radioactive émettant des rayons gamma ainsi que des neutrons à haute vitesse. Ces neutrons, émis par la source, sont ralentis par l'interaction qu'ils vont avoir avec les atomes d'hydrogène présents dans le béton mais plus particulièrement dans l'eau qu'il contient. Les neutrons sont donc, de par leur ralentissement, convertis en « neutrons thermiques » qui sont rétrodiffusés et détectés par un gaz contenu dans l'instrument. L'avantage d'un tel appareil réside dans le fait qu'il peut lire la teneur en eau des bétons à travers un revêtement de sol constitué par un matériau pauvre en hydrogène. Globalement, on considère qu'il renseigne quant à la teneur en eau jusqu'à une profondeur de 10cm. Cependant, vu qu'il contient une source radioactive, son utilisation est fortement réglementée. Par exemple, en France, des documents et des agrégations doivent être obtenus pour pouvoir l'utiliser mais aussi pour le transporter (Howard M.K., 2005).

### 1.3.8. Tableau récapitulatif des différentes méthodes

Tableau 3: Récapitulatif des différentes méthodes

Méthode	Principe de base	In situ (I) ou au laboratoire (L)	Avantages	Inconvénients	Mesure du gradient possible ?
Gravimétrie	Détermination de la masse sèche et humide. La teneur en eau est déduite de ces deux valeurs	L	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Très connue</li> <li>- Très précise</li> <li>- Détermination de la teneur en eau</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Temps important nécessaire au séchage</li> <li>- Exige une carotte représentative</li> <li>- Nécessite un carottage par voie sèche</li> <li>- destructive</li> </ul>	En général utilisée pour une mesure de la teneur moyenne
Bombe à carbure	Mesure de la pression produite par un gaz issu de	L ou I	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Rapide</li> <li>- Détermination de la teneur en eau</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Exige une carotte représentative</li> <li>- Nécessite un carottage par</li> </ul>	En général utilisée pour une mesure de la teneur

	la réaction entre l'eau de l'échantillon et le carbure de calcium			voie sèche - destructive	moyenne
Chlorure de Calcium	Mesure la variation de poids des cristaux de chlorure de calcium placés sous une cloche parfaitement scellée au support	L ou I	- Principe simple - Non destructif	- Précision exigée dans la mesure des masses - Grande sensibilité aux conditions extérieures - On obtient seulement des renseignements sur l'humidité des deux premiers centimètres	Teneur moyenne des deux premiers centimètres
Sonde hygrométrique	Mesure de l'humidité relative au sein d'une cavité grâce à la variation des propriétés électriques d'un élément hygroscopique introduit.	I	- Précise - Rapide si le volume dans lequel est placée la sonde est faible - Très courante	- Valeur en terme d'humidité relative et non en teneur d'eau - Semi-destructive	Possibilité de déterminer des gradients si plusieurs capteurs sont disposés à des profondeurs différentes
Résistivité électrique	Mesure de la résistance électrique du béton afin de corréler celle-ci à une teneur en eau	I	- Non destructive si on réalise une mesure en surface	- Semi-destructive en cas de mesure en profondeur - Analyse complexe des résultats	Possibilité de déterminer un gradient si on réalise des forages pour placer les électrodes à une profondeur précise
Sonde capacitive	Utilisation de la variation des propriétés de permittivité électrique avec la teneur en eau	I	- Non destructive si on réalise une mesure en surface	- Nécessite un étalonnage des sondes - Semi-destructive en cas de mesure en profondeur	Possibilité de déterminer un gradient si on réalise des forages pour placer les électrodes à une profondeur précise

Source radioactive	Etude de la variation de la masse de l'échantillon en fonction de la teneur en eau	L (I si appareil portable)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Non destructive si on réalise une mesure en surface</li> <li>- Détermination de la teneur en eau</li> <li>- Possibilité de lecture des teneurs en eau au travers des couches de revêtement</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Utilisation d'une source radioactive</li> <li>- Utilisation fortement réglementée</li> <li>- Profondeur limitée à 10cm</li> <li>- Destructive si on utilise des carottes</li> </ul>	Réalisable sur base de carottes ou de petits échantillons prélevés à une profondeur précise
--------------------	--	----------------------------	--	--	---

#### 1.4. Les gradients dans les bétons

Dans le chapitre précédent, une série d'appareils permettant de déterminer l'humidité contenue dans un élément en béton ont été présentés. Différents auteurs ont testé ces techniques pour déterminer des profils d'humidité d'une dalle en béton dans des cas particuliers qui étaient importants pour leur étude.

De ces études, on peut retenir que, avant cure et séchage, la distribution de l'humidité au sein d'un béton est raisonnablement uniforme tout au long de l'épaisseur. Cependant, lors du séchage, la quantité et la distribution de l'humidité varient. Sur la figure 16, on peut voir une représentation schématique du taux d'humidité interne d'une dalle dont le séchage est réalisé exclusivement à partir de la surface supérieure (Harrison P. J., 2006).

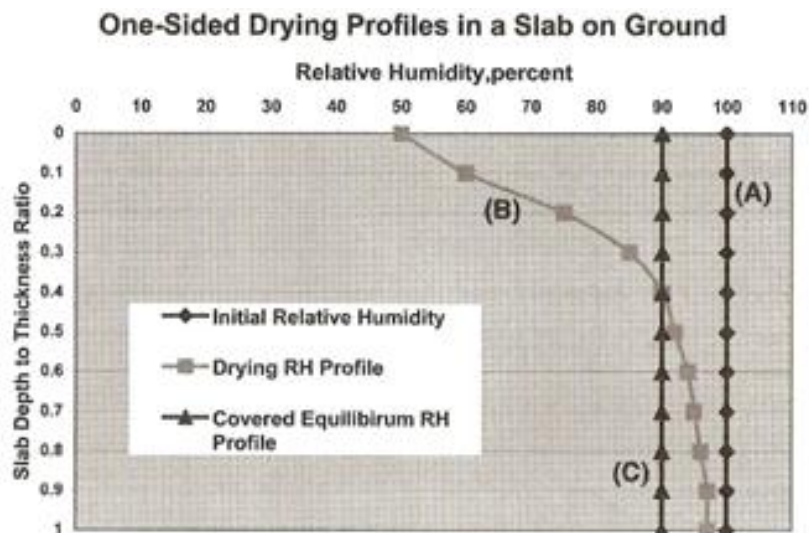


Figure 16: Profil de séchage d'une dalle (Harrison P.J., 2006)

La ligne verticale à 100% d'humidité relative montre la distribution initiale de l'humidité lorsque le séchage commence. Comme on peut s'y attendre, lorsque la dalle sèche, le béton perd une plus grande part d'humidité sur la partie supérieure que sur le milieu et sur la partie inférieure. Il en résulte donc une distribution différentielle d'humidité entre la partie supérieure et inférieure. Le profil de la courbe de séchage est fonction de la température, de l'humidité relative à la surface du béton, du temps de séchage ainsi que des propriétés du béton (Harrison P. J., 2006).

Dans son document, Khelidj (Khelidj A., 2001) propose également une étude de gradient mais, cette fois, en fonction du temps (figure 17). Cette étude est réalisée par sondes hygrométriques enfoncées 24 h après mise en place du béton frais. Dans cet essai, cinq faces ont été protégées contre la dessiccation, ce qui implique que le séchage ne peut se réaliser que par une seule face. Il est important de noter qu'une fois coulées, les éprouvettes ont été placées dans une ambiance contrôlée en température et en humidité relative ( $T = 20 \pm 1^\circ\text{C}$  et  $HR = 50 \pm 5\%$ ).

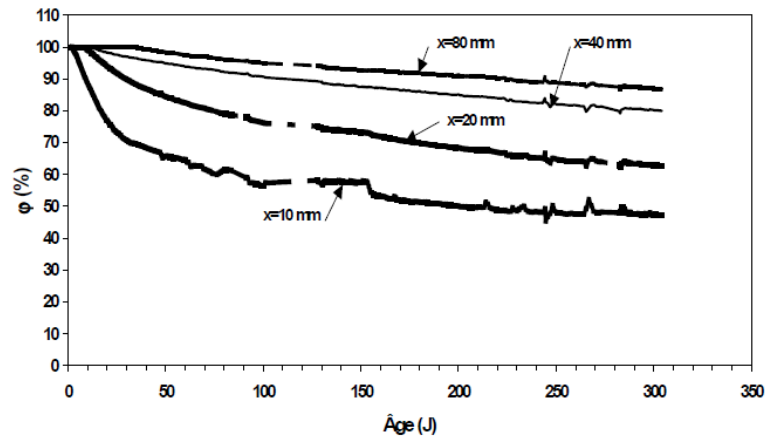


Figure 17: Evolution de l'humidité relative du béton ( $\phi$ ) en fonction de la profondeur ( $x$ ) par rapport à la face exposée au séchage (Khelidj A., 2001)

La figure 17 met clairement en évidence le fait que les mouvements d'eau au sein du béton sont des phénomènes extrêmement lents. Même si nous avons l'impression que l'humidité relative près de la surface chute rapidement, nous pouvons constater que l'équilibre avec le milieu ambiant extérieur n'est atteint qu'après 250 jours. En ce qui concerne l'évolution avec la profondeur, des gradients d'humidité se forment assez rapidement puisque les humidités relatives mesurées aux différentes profondeurs diffèrent l'une de l'autre. De tels gradients seront mesurés lors de la partie expérimentale de ce travail.

## 2. LE GPR (Ground penetrating radar)

Le radar géologique (souvent appelé GPR, d'après les initiales du terme anglais : Ground Penetrating Radar) est une méthode non destructive utilisée pour obtenir l'image interne de nombreux types de matériaux géologiques comme les sols, roches ainsi que les matériaux artificiels comme le béton et l'asphalte (Schmidt S., 2010).

Dans le domaine du génie civil, il existe de très nombreuses applications possibles du radar, notamment dans l'auscultation des bétons et de divers autres matériaux de construction. A l'aide d'une antenne haute fréquence portable, il est possible de détecter rapidement et de localiser très précisément les composants internes métalliques ou non (ferraillages, ancrages, câbles, tuyaux, défauts, etc.) sur des murs, radiers, piles et tabliers de ponts, avec une profondeur d'investigation pouvant aller jusqu'à 1 m. Le béton étant un matériau relativement homogène, les images délivrées sont souvent de bonne qualité (Schmidt S., 2010).

### 2.1. Principes de fonctionnement

Le GPR émet une impulsion électromagnétique (essentiellement non dispersive) de haute fréquence au moyen d'une antenne. Le signal émis voyage à travers le matériau et est réfléchi et

réfracté lors de tout changement de milieu et donc d'impédance. Par la suite, cette énergie réfléchie et réfractée est enregistrée par une antenne réceptrice. C'est l'image de cette onde réfléchie qui permet de construire une image du sous-sol ou, en ce qui nous concerne, du béton (Annan A.P., 2005 ; Giroux B., 2005).

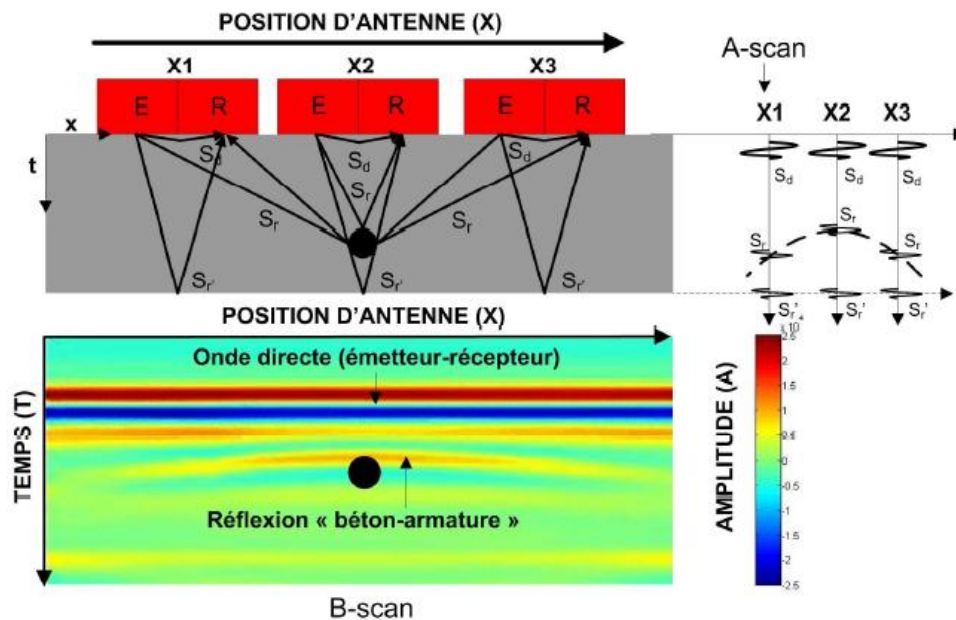


Figure 18: Principe de fonctionnement du radar (Viriyametanont K., 2008)

La figure 18 permet d'avoir une vision globale du principe de fonctionnement du radar. Initialement, une onde électromagnétique est envoyée par l'antenne émettrice E. L'antenne réceptrice, ici représentée par la lettre R, mesure l'amplitude (A) du champ électromagnétique reçu en fonction du temps. Ce signal amplitude-temps est représenté sur un graphique : l'A-scan. Sur celui-ci visible sur la partie droite de la figure 18, on peut observer une répartition de l'énergie du signal en plusieurs groupes. Tout d'abord, on distingue l'énergie qui est directement transmise de la source vers le récepteur : il s'agit de l'onde directe ( $S_d$ ). Ensuite, on distingue des pics qui sont dus à la réflexion d'une partie de l'énergie à chaque interface présentant un contraste d'impédance électromagnétique. Dans cet exemple, les réflexions sont dues au contraste entre le béton et l'armature ( $S_r$ ) ainsi qu'au contraste entre le béton et l'air sur la partie inférieure de la dalle ( $S_r'$ ). Si le radar est mobile, on peut rajouter une information spatiale aux données connues et aboutir au B-scan, qui n'est rien d'autre qu'une succession de profils A-scan placés les uns à côté des autres. De plus, si la vitesse de propagation est connue, la coupe temps-position peut être simplement convertie en coupe profondeur-position (Viriyametanont K., 2008).

En ce qui concerne la gamme de fréquences utilisable, celle-ci est assez large puisqu'elle est comprise entre 10 MHz et 2,6 GHz. Avec une antenne basse fréquence (entre 10 et 100 MHz), la profondeur d'investigation est élevée ( $> 10\text{m}$ ) mais la résolution est faible. En revanche, pour des antennes de 1 GHz ou plus, on obtient une bonne résolution, ce qui permet notamment de visualiser de fins détails dans les bétons, mais la profondeur d'investigation devient limitée. Une discussion plus approfondie sur les résolutions est présentée dans le paragraphe 2.4 de ce travail (Annan A.P., 2005 ; Schmidt S., 2010).

## 2.2. Théorie électromagnétique

Les équations de Maxwell, qui décrivent mathématiquement les champs électromagnétiques peuvent être combinées aux lois constitutives qui décrivent les propriétés physiques d'un matériau. La combinaison des deux théories précédentes fournit les fondements nécessaires pour décrire les signaux GPR (Annan A.P., 2001).

### 2.2.1. Equations de Maxwell

Les équations de Maxwell qui décrivent les propriétés des champs magnétiques s'expriment suivant les équations 7, 8, 9 et 10 :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = -\frac{\partial \vec{b}}{\partial t} \text{ (loi de Faraday)} \quad (7)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{d}}{\partial t} \text{ (loi d'Ampère)} \quad (8)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{d} = q \quad (9)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{b} = 0 \quad (10)$$

où :

$\vec{E}$  = vecteur champ électrique

$\vec{H}$  = vecteur champ magnétique

$\vec{d}$  = densité de flux électrique

$\vec{b}$  = densité de flux magnétique

$\vec{j}$  = densité de courant

q = densité de charge électrique

t = temps

L'équation 7, aussi appelée loi de Faraday, exprime qu'un champ magnétique variable dans le temps provoque un déplacement de charges électriques, ce qui implique la présence d'un champ électrique. On peut d'ores et déjà affirmer qu'il existe un lien entre ces deux champs. L'équation 8 quant à elle exprime le lien inverse : les courants électriques variables génèrent des champs magnétiques. L'équation 9 exprime que les charges électriques sont des sources ou des puits de champs électriques. En effet, les champs électriques émanent de charges électriques en mouvement. Enfin, l'équation 10 exprime le fait qu'aucune charge libre magnétique n'a jamais été observée dans la nature. Par conséquent, les champs magnétiques doivent former une boucle fermée (Annan A.P., 2001).

### 2.2.2. Equations constitutives

Les équations constitutives sont celles qui permettent de caractériser les propriétés physiques des matériaux. Pour déterminer la réaction d'un matériau à un champ électromagnétique, les propriétés électriques et magnétiques sont importantes. Pour l'analyse radar, on retrouve trois équations constitutives (équations 11, 12, 13):

$$\vec{J}_c = \tilde{\sigma} \vec{E} \quad (11)$$

$$\vec{d} = \tilde{\epsilon} \vec{E} \quad (12)$$

$$\vec{b} = \tilde{\mu} \vec{H} \quad (13)$$

où :

$\tilde{\sigma}$  = tenseur de conductivité électrique

$\tilde{\epsilon}$  = tenseur de permittivité diélectrique

$\tilde{\mu}$  = tenseur de perméabilité magnétique

$\vec{J}_c$  = courant de conduction

L'équation 11 permet de décrire le mouvement des charges libres en présence d'un champ électrique. Ce mouvement a pour conséquence la naissance d'un courant. L'équation 12 permet de décrire le déplacement subi par les charges déjà contraintes lorsque celles-ci sont soumises à un champ électrique. Finalement, l'équation 13 décrit la réponse des moments magnétiques moléculaires et atomiques d'un corps à un champ magnétique. Généralement, les tenseurs  $\tilde{\sigma}$ ,  $\tilde{\epsilon}$  et  $\tilde{\mu}$  sont non linéaires et peuvent présenter des termes complexes. Par contre, dans un milieu isotrope, ces trois tenseurs dégènèrent en un scalaire (Annan A.P., 2001 ; Giroux B., 2005).

En ce qui concerne le béton, celui-ci est un matériau non magnétique, ses propriétés électromagnétiques se réduisent donc à la conductivité électrique et à la permittivité diélectrique. Dans les diverses modélisations, nous pourrions supposer que la perméabilité magnétique de ce matériau est égale à la perméabilité magnétique du vide qui est de  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$  (Annan A.P., 2005 ; Viriyametanont K., 2008).

### 2.2.3. Densité totale de courant

Dans ses notes, Giroux (Giroux B., 2005) explique que, lorsque la densité de flux électrique ( $\vec{d}$ ) varie, les dipôles permanents se déplacent l'un par rapport à l'autre. A ce déplacement de charges correspond un courant, le courant de déplacement. A partir de l'équation 12, ce courant de déplacement peut être lié à la permittivité et à la variation de champs électriques (équation 14):

$$\vec{J}_d = \frac{\partial \vec{d}}{\partial t} = \tilde{\epsilon} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (14)$$

Dans tout matériau naturel, le courant s'écoulant en réponse à un champ électrique est la somme des courants de conduction et de déplacement (équation 15) :

$$\vec{J} = \vec{J}_d + \vec{J}_c = \tilde{\epsilon} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \tilde{\sigma} \vec{E} \quad (15)$$

### 2.2.4. Conductivité et permittivité électriques

Comme il a été dit précédemment, la conductivité ( $\sigma$ ) et la permittivité ( $\epsilon$ ) sont généralement des variables complexes. De plus, leurs valeurs dépendent de la fréquence d'excitation ( $f$ ). On peut donc adopter les notations suivantes :

$$\sigma(\omega) = \sigma'(\omega) + i\sigma''(\omega) \quad (16)$$

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon'(\omega) + i\varepsilon''(\omega) \quad (17)$$

Dans ces formules 16 et 17,  $\omega = 2\pi f$  représente la pulsation du signal d'excitation. Expérimentalement, dans les gammes de fréquences qui nous concernent pour l'analyse radar, il est très difficile de différencier les contributions de la conductivité électrique et de la permittivité diélectrique. D'autres paramètres, beaucoup plus facilement étudiés en laboratoire, sont donc utilisés. On va définir la permittivité effective ( $\varepsilon_e$ ) et la conductivité effective ( $\sigma_e$ ) qui tiennent compte de l'effet combiné de la conductivité électrique et de la permittivité diélectrique. Ces deux paramètres s'écrivent de la façon suivante :

$$\varepsilon_e = (\varepsilon'_e - i\varepsilon''_e) = \left( \varepsilon' + \frac{\sigma''}{\omega} \right) - i \left( \varepsilon'' + \frac{\sigma'}{\omega} \right) \quad (18)$$

$$\sigma_e = (\sigma'_e + i\sigma''_e) = (\sigma' + \omega\varepsilon'') + i(\sigma'' + \omega\varepsilon') \quad (19)$$

Ces nouveaux paramètres peuvent être reliés à la densité totale de courant :

$$\vec{j} = \sigma_e \vec{E} = i\omega\varepsilon_e \vec{E} \quad (20)$$

Pour plus de simplicité, la permittivité effective est généralement rapportée à la permittivité du vide  $\varepsilon_0$  définissant ainsi la permittivité relative  $\varepsilon_r$ :

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon_e}{\varepsilon_0} = \varepsilon'_r - i\varepsilon''_r \quad (21)$$

La partie réelle de la permittivité relative (définie comme étant la constante diélectrique) représente la capacité totale du matériau à stocker de l'énergie électrique tandis que la composante imaginaire traduit les pertes d'énergie par absorption (Giroux B., 2005 ; Viriyametanont K., 2008).

### 2.2.5. Equation d'onde transversale

L'équation décrivant l'évolution spatiale et temporelle de l'onde électromagnétique peut être obtenue en combinant les équations de Maxwell et les équations constitutives. Dans ce présent paragraphe, une forme très simple de l'équation dans laquelle on considère un milieu uniforme et un matériau dont les propriétés sont supposées isotropes, linéaires et indépendantes des fréquences est présentée. En réécrivant les équations 7 à 10 et les équations 11 à 13, et en éliminant le champ magnétique, nous obtenons :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{\nabla} \cdot \vec{E} + \mu \cdot \sigma \cdot \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \mu \cdot \varepsilon \cdot \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0 \quad (22)$$

Après plusieurs simplifications et remplacements repris en détails dans le document d'Annan (Annan A.P., 2005), l'équation 22 devient la suivante :

$$\frac{\partial^2}{\partial \beta^2} f(\beta, t) - \mu\sigma \frac{\partial}{\partial t} f(\beta, t) - \mu\varepsilon \frac{\partial^2}{\partial t^2} f(\beta, t) = 0 \quad (23)$$

dans laquelle  $f$  est une fonction dépendante du temps et de  $\beta$ , la distance scalaire dans la direction où le champ varie. De cette expression 23, nous pouvons trouver l'expression de la vitesse de l'onde. En négligeant les pertes, ce qui revient à supposer  $\sigma = 0$ , l'expression se réduit à :

$$\frac{\partial^2}{\partial \beta^2} f(\beta, t) = \mu \varepsilon \frac{\partial^2}{\partial t^2} f(\beta, t) \quad (24)$$

La solution de cette équation 24 aura la forme suivante :

$$f(\beta, t) = f(\beta \pm vt) \quad (25)$$

où

$$v = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon \mu}} \quad (26)$$

En utilisant les notations de permittivité relative précédemment introduite (équation 21), en supposant  $\mu = \mu_0$  et finalement en considérant la définition de la vitesse de la lumière:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}} = 3.10^8 \text{ m/s} \quad (27)$$

L'expression de la vitesse est réécrite de la manière suivante :

$$v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_r'}} \quad (28)$$

Dans cette expression 28, seule la partie réelle de la permittivité électrique est considérée. En effet, comme indiqué précédemment, les pertes diélectriques représentées ici par la partie imaginaire de la permittivité diélectrique  $\varepsilon_r''$  ont été négligées (Viriyametanont K., 2008).

Dans la réalité, contrairement à l'hypothèse précédemment posée, l'amplitude de l'onde électromagnétique ne reste pas constante mais elle subit une certaine atténuation avec la distance. Dans le cas où les atténuations sont faibles, ce qui se traduit par la condition suivante (Giroux B., 2005):

$$\frac{\sigma_e}{\varepsilon_e \cdot \omega} \ll 1 \quad (29)$$

Annan (Annan A.P., 2005) indique que la solution du problème a la forme ci-après :

$$f(\beta, t) = p_1(\beta \pm vt) p_2(\beta) \quad (30)$$

Dans cette expression,  $p_1$  est la solution de l'équation d'onde lorsque les pertes sont négligées, c'est-à-dire lorsqu'on suppose dans un premier temps que  $\sigma = 0$  (équation 31).

$$\frac{\partial^2 p_1}{\partial \beta^2} = \mu \varepsilon \frac{\partial^2 p_1}{\partial t^2} \quad (31)$$

Dans l'équation 30,

$$p_2 = e^{\pm\alpha\beta} \quad (32)$$

avec le facteur d'atténuation donné par l'expression suivante :

$$\alpha = \frac{\mu\sigma v}{2} = \frac{\sigma}{2} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0 \epsilon_r'}} \quad (33)$$

On constate donc que, dans ce cas, l'onde voyage avec une vitesse  $v$  et décroît exponentiellement en amplitude dans la direction de propagation (figure 19).

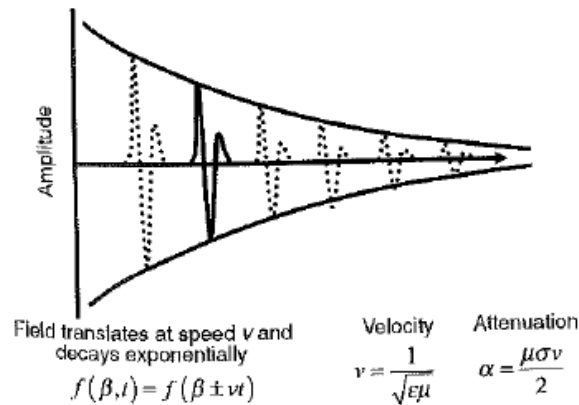


Figure 19: Evolution de l'onde électromagnétique dans un milieu à faible perte électrique (Annan A.P., 2005)

Le tableau 4 reprend quelques valeurs des paramètres précédemment définis. On peut déjà, à ce stade, constater que la présence ou l'absence d'eau influence fortement les propriétés des matériaux. Cependant, une discussion plus approfondie à ce sujet viendra plus loin dans ce travail (Annan A.P., 2005).

Tableau 4: Valeurs typiques de propriétés électromagnétiques pour divers matériaux (Annan A.P., 2005; Giroux B., 2005; Soustos M.N., 2001; Viriyametanont K., 2008)

Matériau	$\epsilon_r'$	$\sigma$ (mS/m)	$v$ (m/ns)	$\alpha$ (dB/m)
Air	1	0	0,3	0
Eau distillée	80	0,01	0,033	$2.10^{-3}$
Eau douce	80	0,5	0,033	0,1
Eau de mer	80	3000	0,01	103
Glace	3 – 4	0,01	0,16	0,01
Sable sec	3 – 5	0,01	0,15	0,01
Sable saturé	20 – 30	1 – 10	0,06	0,03 – 0,3
calcaire	4 – 8	0,5 – 2	0,12	0,4 – 1
Argile schisteuse	5 – 15	1 – 100	0,09	1 – 100
Argile	5 – 40	2 – 1000	0,06	1 – 300
Granit	4 – 6	0,01 – 1	0,13	0,01 – 1
Béton	4 – 10	0,005 – 0,10	0,15 – 0,095	0,0047 – 0,09

## 2.3. Réfraction et réflexion

Comme décrit dans l'introduction de ce chapitre, le radar émet une impulsion électromagnétique (essentiellement non dispersive) de haute fréquence au moyen d'une antenne. Le signal émis voyage à travers le matériau et est réfléchi et réfracté lors de tout changement de milieu. Dans ce présent paragraphe, nous allons détailler un peu plus les propriétés des ondes ainsi que leurs comportements lorsque celles-ci arrivent à une interface entre 2 milieux différents (Annan A.P., 2005 ; Giroux B., 2005).

### 2.3.1. Propriétés des ondes

Les champs magnétiques se propageant sous forme d'ondes peuvent être caractérisés par un front d'onde et par des rais. Le front d'onde représente la surface spatiale sur laquelle les signaux sinusoïdaux émis par la source sont tous en phase. Les rais sont des lignes perpendiculaires au front d'onde et représentent le parcours de l'onde entre 2 points (figure 20). Ces deux notions sont très utiles pour comprendre les concepts de réfraction et de réflexion (Annan A.P., 2005 ; Giroux B., 2005).

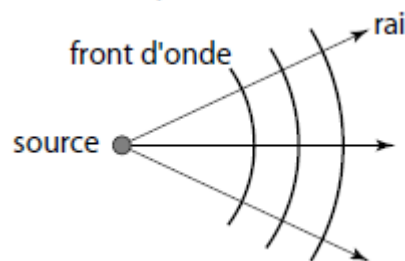


Figure 20: Rai et front d'onde (Giroux B., 2005)

### 2.3.2. Loi de Snell-Descartes

La théorie de Snell permet de décrire le comportement du front d'onde lorsque l'onde se propage dans un matériau où la vitesse de propagation n'est pas constante. Le concept est représenté sur la figure 21 ci-dessous :

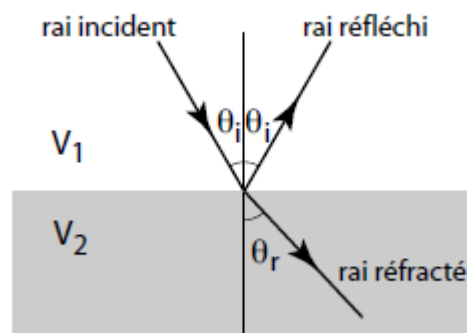


Figure 21: Changement de direction de l'onde à une interface entre deux milieux présentant des propriétés différentes (Giroux B., 2005)

Soit une onde représentée ici par un rai qui présente avec la verticale un angle  $\theta_1$  : lorsque cette onde rencontre l'interface entre les 2 milieux, une partie est réfléchi et une autre poursuit son

parcours. Cependant, la direction de cette dernière peut être légèrement modifiée pour présenter un angle  $\theta_2$ . La loi de Snell-Descartes stipule que :

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{v_1}{v_2} \quad (34)$$

S'il existe de multiples interfaces, cette règle peut être appliquée à chaque frontière entre les domaines. Les rais subiront un changement de direction à chaque interface (Giroux B., 2005).

Cependant, Annan (Annan A.P., 2005) rappelle qu'il existe un angle  $\theta_2$  critique. En effet, si on trouve un angle  $\theta_2 > \theta_c$ , cela implique que  $\sin(\theta_1)$  soit plus grand que 1, ce qui n'est pas possible physiquement. Cet angle critique est donné par la formule suivante :

$$\theta_c = \arcsin\left(\frac{v_2}{v_1}\right) \quad (35)$$

### 2.3.3. Coefficient de réflexion

Le coefficient de réflexion quantifie la modification d'amplitude subie par le champ électromagnétique lorsque celui-ci rencontre une interface entre deux matériaux. En effet, lorsqu'une onde électromagnétique rencontre une frontière entre 2 matériaux présentant des propriétés physiques différentes, une partie est transmise et réfractée et une autre partie est réfléchi. Soit  $I$  l'amplitude du champ incident et  $RI$  l'amplitude du signal réfléchi. Le coefficient de réflexion  $R$  est donné par la formule suivante :

$$R = \frac{\cos \theta_1 - \sqrt{\frac{\epsilon_{r2}}{\epsilon_{r1}} - \sin^2 \theta_1}}{\cos \theta_1 + \sqrt{\frac{\epsilon_{r2}}{\epsilon_{r1}} - \sin^2 \theta_1}} \quad (36)$$

Dans cette équation 36,  $\epsilon_{r1}$  est la permittivité diélectrique du premier milieu et  $\epsilon_{r2}$  la permittivité diélectrique du second milieu. L'angle  $\theta$  représente l'angle d'incidence (Van der Wielen A., 2011).

## 2.4. Résolution des radars

Comme il a déjà été dit dans le paragraphe relatif au principe de fonctionnement, la résolution, ainsi que le pouvoir de détection, sont liés à la fréquence utilisée. Giroux (Giroux B., 2005) donne quelques ordres de grandeur facilement utilisables. Il indique que le pouvoir de résolution vertical, qui n'est rien d'autre que la capacité à séparer clairement une information se situant à deux profondeurs distinctes, est de l'ordre de  $\lambda/4$  à  $\lambda/2$  selon le niveau de bruit. Le pouvoir de détection qui correspond à la plus petite couche qui puisse donner naissance à une réflexion se situe quant à lui entre  $\lambda/30$  à  $\lambda/10$ . Dans ces formules,  $\lambda$  est la longueur d'onde du signal. Vu que  $\lambda = v/f$ , on peut déjà conclure que, plus la longueur d'onde est courte (et la fréquence élevée), meilleure est la résolution. Dans les paragraphes suivants, la physique qui se cache derrière cette notion de résolution sera reprise en détails. Comme on peut le voir sur la figure 22, celle-ci peut en fait être séparée en deux composantes : la résolution verticale ( $\Delta_r$ ) et la résolution latérale ( $\Delta_l$ ) (Annan A.P., 2005 ; Giroux B., 2005).

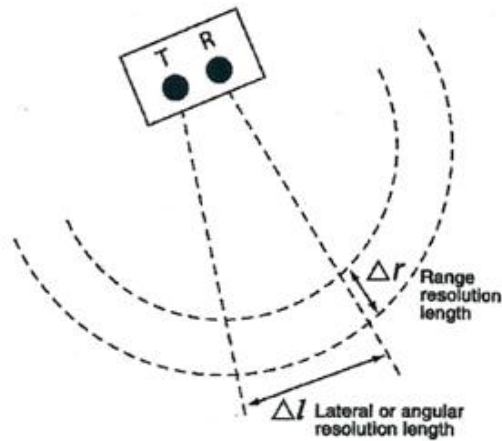


Figure 22: Résolutions verticale et latérale (Annan A.P., 2005)

### 2.4.1. Résolution verticale

Dans la suite, nous allons considérer que les ondes reçues par le récepteur sont des répliques exactes de l'impulsion émise. Les échos détectés peuvent arriver de manière simultanée, en superpositions ou totalement séparée les uns des autres. Couramment, une impulsion est caractérisée par une longueur  $W$  qui n'est rien d'autre que la distance, sur l'axe des abscisses, entre les deux points correspondant à une valeur de l'amplitude égale à la moitié de l'amplitude maximale.

De nombreux auteurs sont d'accord pour dire que deux impulsions peuvent être distinguées l'une de l'autre si elles sont séparées dans le temps par plus que leur demi-largeur. La figure 23 montre que  $T$  doit être supérieur à  $W/2$ .

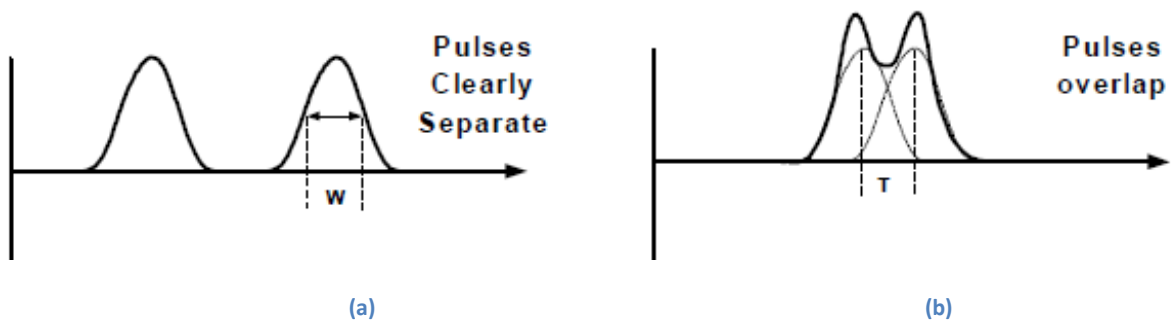


Figure 23: Impulsions clairement distinguables (a) et impulsions superposées (b) (modifié d'après Annan A.P., 2005)

Considérons deux points qui sont situés dans un même alignement radial. On peut relier directement le temps mis par le signal émis pour revenir au récepteur à la distance totale parcourue. Si la distance séparant le premier point et la surface est équivalente à  $d$ , le temps de parcours est de

$$t_1 = \frac{2d}{v} \quad (37)$$

Si le second point est séparé du premier par une distance  $\Delta r$ , le temps de parcours est de :

$$t_2 = \frac{2d + 2\Delta r}{v} \quad (38)$$

La différence entre les deux signaux est donc de

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \frac{2\Delta r}{v} \quad (39)$$

Comme indiqué précédemment, pour distinguer clairement les deux signaux, la différence doit être supérieure à la moitié de la largeur de la pulsation.

$$\Delta t = \frac{2\Delta r}{v} \geq \frac{W}{2} \quad (40)$$

La résolution verticale est donc égale à :

$$\Delta r \geq \frac{Wv}{4} \quad (41)$$

En conclusion, la résolution du radar est dictée par la largeur de l'impulsion (donc la fréquence) mais aussi par les propriétés du matériau, vu que la vitesse de propagation intervient aussi dans la résolution. Idéalement, cette résolution doit être indépendante de la distance entre la cible et l'émetteur : en pratique, cela n'est pas le cas. En effet, l'impulsion subit des dispersions et des atténuations qui peuvent affecter cette résolution radiale (Annan A.P., 2005).

#### 2.4.2. Résolution latérale

Pour trouver une expression de la résolution latérale, on procède de façon similaire à ce qui a été fait précédemment.

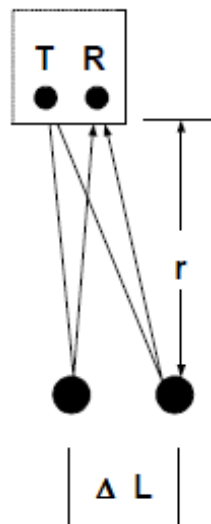


Figure 24: Résolution latérale (modifié d'après Annan A.P., 2005)

En suivant la géométrie présentée par le schéma précédent (figure 24), si la distance séparant le premier point et la surface est équivalente à  $d$ , le temps de parcours est de :

$$t_1 = \frac{2r}{v} \quad (42)$$

Vu que le second point est séparé latéralement du premier par une distance  $\Delta L$ , le second temps

de parcours est égal quant à lui à :

$$t_2 = \frac{2\sqrt{(r^2 + \Delta l^2)}}{v} \quad (43)$$

La différence de temps de parcours entre les deux signaux est égale à :

$$\Delta t = \frac{2(\sqrt{(r^2 + \Delta l^2)} - r)}{v} \quad (44)$$

Généralement, la distance  $r$  séparant le système de mesure des points de réflexion est beaucoup plus importante que le décalage latéral entre les deux points. Dès lors, l'expression précédente peut être simplifiée et devenir :

$$\Delta t \approx \frac{\Delta l^2}{vr} \quad (45)$$

Comme précédemment, pour distinguer clairement les deux signaux, la différence doit être supérieure à la moitié de la largeur de la pulsation. Cela revient donc à dire que :

$$\Delta t = \frac{\Delta l^2}{vr} \geq \frac{W}{2} \quad (46)$$

Donc la résolution latérale est égale à :

$$\Delta l \geq \sqrt{\frac{vrW}{2}} \quad (47)$$

Dans ce cas-ci, il est possible de voir que la résolution dépend de la vitesse de propagation de l'onde dans le milieu et de la distance entre les points et le radar : plus cette distance est grande, plus la résolution latérale se réduit. Finalement, il peut être signalé que, comme annoncé, cette résolution dépend bien de la largeur de l'impulsion et donc de la fréquence (Annan A.P., 2005).

Il existe une autre approche possible pour déterminer la résolution latérale d'un radar. C'est celle qui est présentée par Rial (Rial F.I., 2009). Il explique que la résolution latérale peut être reliée à la largeur du faisceau d'onde émis par l'antenne. Un faisceau plus étroit donnera bien entendu une meilleure résolution horizontale. Il se trouve que cette géométrie du faisceau dépend des caractéristiques de l'antenne et du milieu de propagation. D'une manière plus visuelle, le faisceau peut être considéré comme étant le cône d'énergie qui va venir intersecter la surface réfléchissante. Il va donc toucher une zone qui est appelée empreinte de l'antenne. Cette zone est visible sur la figure 25 :

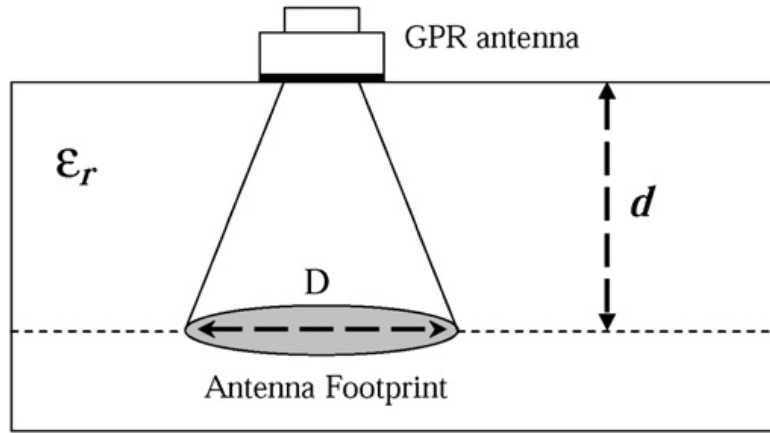


Figure 25: Empreinte de l'antenne (Rial F.I., 2009)

La zone de résolution peut être considérée comme étant la zone qui ne permet pas de distinguer clairement deux objets qui seraient présents dans celle-ci. La résolution horizontale peut donc être comparée avec la taille de l'empreinte. En effet, une distinction parfaite des deux signaux est obtenue si ceux-ci sont séparés d'une distance d'au moins le diamètre de l'empreinte. Or, des estimations de la taille de l'empreinte d'antenne peuvent être obtenues par différentes expressions mathématiques proposées dans la bibliographie spécialisée (Rial F.I., 2009). Un rapprochement commun identifie l'empreinte avec le diamètre ( $D$ ) de la première zone de Fresnel.

$$\Delta l = D = \sqrt{\frac{\lambda^2}{4} + \lambda d} \quad (48)$$

Une autre expression du diamètre peut être obtenue à l'aide de l'équation 49:

$$\Delta l = D = \frac{\lambda}{2} + \frac{2d}{\sqrt{\epsilon_r + 1}} \quad (49)$$

Les expressions précédentes donnent une résolution qui est telle que, chaque objet séparé d'une distance de  $D$ , a une réponse clairement distincte des autres réponses. Cependant, comme vu précédemment, il est possible d'avoir une légère superposition des impulsions correspondant à chaque objet tout en gardant une visualisation distincte de ceux-ci. Pour ce faire, il suffit de s'arranger pour que les deux impulsions soient séparées dans le temps par plus que leur demi-largeur ; cela revient en fait à considérer non pas  $\lambda$  mais  $\lambda/2$ . L'expression 48 devient donc :

$$\Delta l = \sqrt{\frac{\lambda^2}{16} + \frac{\lambda d}{2}} \quad (50)$$

Si la longueur d'onde est petite par rapport à la distance  $d$ , le premier terme peut être négligé:

$$\Delta l = \sqrt{\frac{\lambda d}{2}} \quad (51)$$

En utilisant la relation ci-après (équation 52), il est possible de voir que cette expression 51 est identique à l'équation 47 fournie par Annan (Annan A.P., 2005).

$$W = \frac{1}{f} = \frac{\lambda}{v} \quad (52)$$

## 2.5. Influence de l'humidité sur les propriétés électriques du béton

Depuis l'apparition des antennes à très haute fréquences, l'auscultation non destructive des ouvrages de génie civil a connu une expansion assez importante. Rapidement, on s'est rendu compte que de nombreux paramètres physiques des bétons testés sont susceptibles de modifier le rayonnement obtenu. Il peut être cité par exemple la teneur en chlorures des bétons, qui affecte la salinité de la solution interstitielle et donc la conductivité du matériau, mais aussi et surtout le volume d'eau contenu dans les pores du béton, qui influence les propriétés diélectriques du béton. Après analyse du document de Soustos (Soustos M.N., 2001), Viriyametanont (Viriyametanont K., 2008) explique clairement que la teneur en eau va avoir une influence très importante sur la permittivité relative du béton : l'eau va de par sa présence, déclencher certains mécanismes de polarisation. Grâce à cette augmentation de l'aptitude à la polarisation, la constante diélectrique  $\epsilon_r'$  va augmenter. Cependant, il faut noter que cette augmentation de  $\epsilon_r'$  s'accompagne également d'un accroissement de la relaxation diélectrique et de la conduction ionique, ce qui se traduit par une hausse du facteur de pertes  $\epsilon_r''$  (Laurens S., 2002 ; Viriyametanont K., 2008).

Dans un document paru en 2001, Soustos (Soustos M.N., 2001) montre l'influence de la teneur en eau sur les propriétés diélectriques des bétons, pour un ensemble d'éprouvettes (figures 26 et 27).

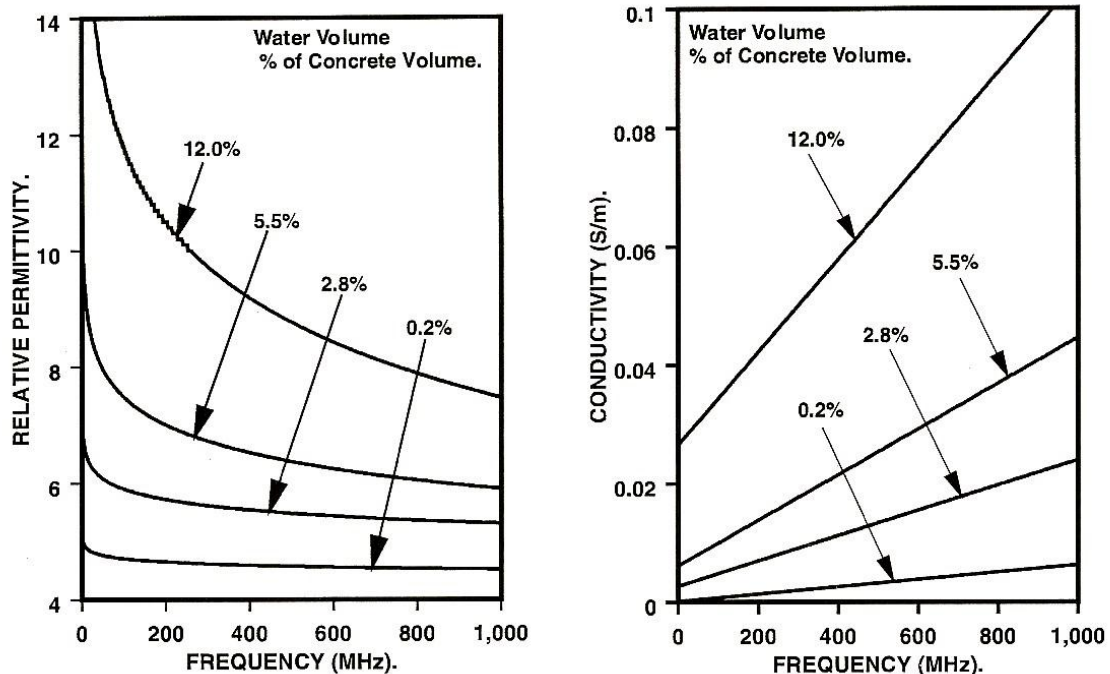


Figure 26: Influence de la teneur en eau sur les propriétés diélectriques des bétons en fonction de la fréquence (Soustos M.N., 2001)

Sur la figure 26, il est clairement observable que la permittivité relative est de moins en moins dépendante de la fréquence lorsque celle-ci est élevée. Cela est d'autant plus vrai que cette permittivité est faible (pour les échantillons secs). A ce stade, on peut déjà voir que la permittivité

ainsi que la conductivité augmentent avec la teneur en eau. Ce phénomène est encore plus visible sur la figure 27 :

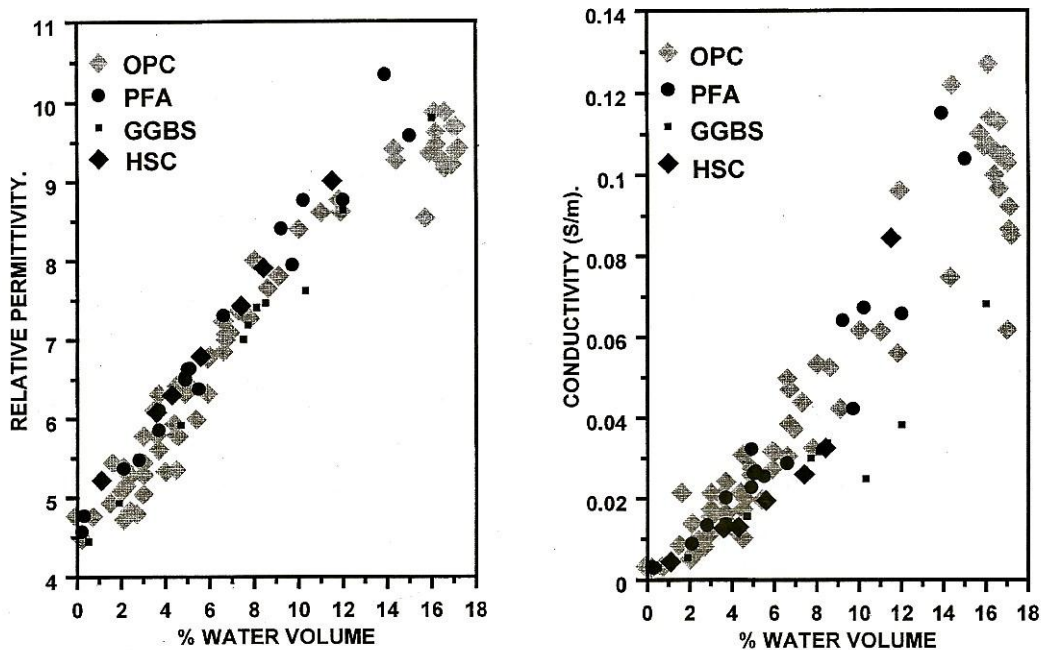


Figure 27: Influence de la teneur en eau sur les propriétés diélectriques des bétons (Soustos M.N., 2001)

Sur ces graphiques (figure 27), la tendance proportionnelle entre la teneur en eau et l'augmentation des propriétés électriques du béton est bien observée. Cette tendance est même linéaire. Soustos (Soustos M.N., 2001) signale aussi que la constitution des bétons ainsi que les propriétés résistives de ceux-ci ont une influence mineure comparée à l'effet de l'humidité. En effet, la dispersion entre les différentes éprouvettes reste très étroite pour la permittivité et un peu plus dispersée pour la conductivité.

## 2.6. Mesure dynamique

Au tout début de ce chapitre 2, il a été remarqué que l'on pouvait ajouter une information spatiale à l'étude radar. En effet, plutôt que de faire des mesures statiques, il est possible de bouger l'émetteur et le récepteur ensemble le long d'une ligne pour aboutir à un graphique du type B-scan visible sur la figure 18. Cependant, une étude peut être réalisée en utilisant une interdistance émetteur-récepteur variable. Ces techniques, consistant à changer l'interdistance entre le récepteur et l'émetteur, sont souvent utilisées afin de déterminer la vitesse de propagation de l'onde radar dans le milieu. Deux méthodes de mesure sont habituellement mises en œuvre : le WARR (wide angle reflection and refraction) et le CMP (common mid-point). La mesure WARR consiste à augmenter la distance entre émetteur et récepteur en déplaçant l'antenne de réception tandis que l'émetteur reste stationnaire. En ce qui concerne la mesure CMP, les deux antennes sont simultanément éloignées du point central du profil (Annan A.P., 2001 ; Viriyametantont K., 2008).

A la figure 28, sur le graphique b, il est possible de voir les courbes typiques obtenues dans le cas d'une étude au CMP :

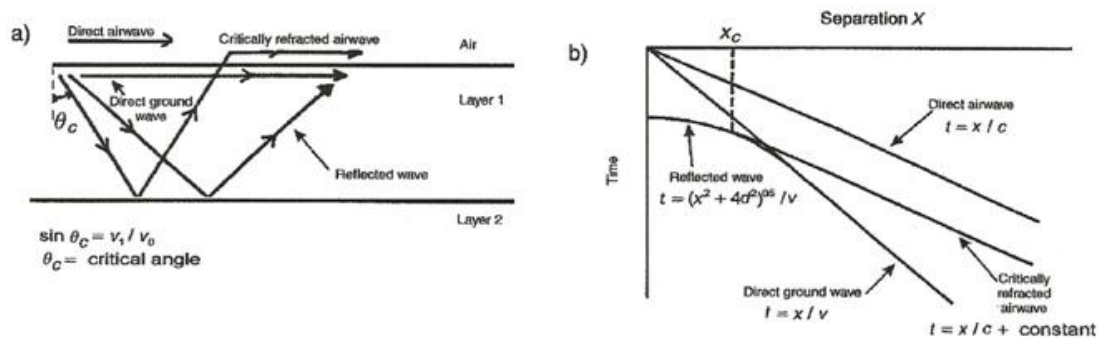


Figure 28 : Résultat d'un CMP (modifié d'après Annan A.P., 2005)

On distingue donc un ensemble de courbes correspondant à des ondes bien particulières, visibles sur la gauche de la figure. Sur le diagramme de droite (figure 28a), l'onde directe transmise dans l'air est représentée par la droite de pente  $x/c$  où  $c$ , est la vitesse de la lumière dans l'air ( $3.10^8 m/s$ ). La droite de l'onde directe passant par le sol est également visible. De celle-ci, on peut déterminer la vitesse de propagation au sein même du matériau. En ce qui concerne l'onde réfléchie, celle-ci se traduit par une parabole. L'équation de cette parabole fait intervenir la distance entre l'émetteur et le récepteur mais aussi la profondeur du point central du profil (Annan A.P., 2005).

### 3. Modélisation à l'aide d'un simulateur : GprMax

GprMax est un simulateur d'ondes électromagnétiques qui peut être utilisé pour la modélisation d'onde radar. Il est développé en utilisant la méthode des différences finies appliquée au domaine temporel FDTD (initiales de Finite-Difference Time-Domain en Anglais). Il existe deux programmes qui composent la suite GprMax: GprMax2D, qui est un simulateur à deux dimensions et GprMax3D, qui est le simulateur complet à trois dimensions. Dans ce travail, seule la version 2D du programme sera utilisée. Nous avons opté pour ce logiciel de simulation car celui-ci est facile d'utilisation et peut être téléchargé gratuitement sur le site suivant : <http://www.gprmax.org/Welcome.html> (Giannopoulos A., 2005).

Ce chapitre présente l'origine des équations utilisées, leurs discrétisations, l'algorithme de résolution utilisé et les hypothèses posées par le programme. Pour terminer, quelques recommandations importantes à respecter seront données.

#### 3.1. Concept de base et problème aux frontières

On peut résumer une simulation numérique de propagation d'ondes électromagnétiques dans un milieu comme un problème à valeur initiale connue (c'est-à-dire l'excitation de l'antenne de transmission GPR) et à frontière ouverte. Cela signifie qu'il faut permettre au champ électromagnétique de se propager à travers l'espace pour atteindre une valeur nulle à l'infini. Effectivement, dans la nature, il n'y a pas de bornes spécifiques où les champs électromagnétiques peuvent prendre une valeur prédéterminée limitant ainsi la géométrie du problème. Ce souci de frontière ouverte peut paraître anodin, mais il crée une complication lors de l'utilisation d'outils numériques. En effet, ceux-ci ont une capacité limitée et ne permettent pas de représenter un espace infini. Il faudra utiliser une astuce pour pouvoir résoudre ce genre de problème en utilisant un espace fini de calcul (Giannopoulos A., 2005).

Le passage d'un domaine infini à un domaine fini de calcul peut être résolu en utilisant des conditions limites absorbantes (ABC). Le rôle de cette frontière consiste, comme son nom l'indique, à absorber toutes ondes qui viendraient l'impacter. De cette manière, on peut simuler un espace infini. Bien entendu, cette frontière doit se situer à une distance suffisante de la source et de l'objet étudié afin de ne pas venir perturber la réponse que l'on devrait obtenir (Giannopoulos A., 2005 ; Irving J., 2006).

Le programme entoure automatiquement le domaine de définition par de telles conditions. Dès lors, tous les milieux contenant les cibles étudiées sont supposés s'étendre jusqu'à l'infini. Dans le cas où le milieu n'est pas infini (par exemple une dalle de béton), il faut faire attention au fait que l'on ne peut faire cette hypothèse d'étendue infinie que si les réflexions dues à la base de la dalle n'ont pas d'intérêt pour l'étude ou bien si la taille réelle de la dalle est assez grande pour que toutes ondes réfléchies qui proviendraient de sa base n'affectent pas la solution pour la fenêtre de temps considéré. La discussion précédente n'est pas anodine puisque le programme GprMax utilise ce genre de condition limite. D'une manière plus pratique, Giannopoulos (Giannopoulos A., 2005) indique que l'ABC, employé par défaut dans le programme, donne en général de bons résultats. En effet, celle-ci n'introduit pas de réflexions artificielles importantes si toutes les sources et les cibles sont conservées à au moins 15 cellules de cette frontière.

### 3.2. Equations discrétisées de Maxwell et algorithme de Yee

Comme expliqué au chapitre 2, tous les phénomènes électromagnétiques sont décrits par les équations de Maxwell et par les équations constitutives. Pour pouvoir simuler la réponse d'un milieu à un signal GPR, l'ensemble des équations nommées ci-dessus doivent être résolues de manière numérique.

Une discussion intéressante sur la modélisation d'onde électromagnétique peut être trouvée dans le document de Taflove (Taflove A., 2005). Celui-ci explique comment combiner les équations de Maxwell et les équations fondamentales pour arriver à une discrétisation assez simple. Les équations utilisées sont exactement les mêmes que celles écrites dans le chapitre deux, hormis le fait que Taflove (Taflove A., 2005) considère en plus une source magnétique. L'équation de Faraday (équation 7) devient donc :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = -\frac{\partial \vec{b}}{\partial t} - \vec{M} \quad (53)$$

où  $\vec{M}$  est un équivalent magnétique à la densité de courant  $\vec{j}$ .

Après avoir combiné les équations 8 à 13 et l'équation 53, et après avoir fait l'hypothèse d'un milieu linéaire, isotrope et non dispersif, il obtient les équations 54 et 55:

$$\frac{\partial \vec{H}}{\partial t} = -\frac{1}{\mu} \Delta \cdot \vec{E} - \frac{1}{\mu} (M_{source} + \sigma^* \vec{H}) \quad (54)$$

$$\frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = -\frac{1}{\varepsilon} \Delta \cdot \vec{H} - \frac{1}{\varepsilon} (J_{source} + \sigma \vec{E}) \quad (55)$$

En effet, il décompose la densité de courant et « la densité magnétique » selon 2 sources :

$$\vec{J} = \vec{J}_{source} + \sigma \vec{E} \quad (56)$$

$$\vec{M} = \vec{M}_{source} + \sigma^* \vec{H} \quad (57)$$

avec  $\sigma^*$ =perte magnétique équivalente.

Les équations 54 et 55 précédentes peuvent être écrites dans chacune des trois directions de l'espace. On obtient donc :

$$\frac{\partial E_x}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left[ \frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} - (J_{source_x} + \sigma E_x) \right] \quad (58)$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left[ \frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} - (J_{source_y} + \sigma E_y) \right] \quad (59)$$

$$\frac{\partial E_z}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left[ \frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} - (J_{source_z} + \sigma E_z) \right] \quad (60)$$

$$\frac{\partial H_x}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left[ \frac{\partial E_y}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial y} - (M_{source_x} + \sigma^* H_x) \right] \quad (61)$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left[ \frac{\partial E_z}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial z} - (M_{source_y} + \sigma^* H_y) \right] \quad (62)$$

$$\frac{\partial H_z}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left[ \frac{\partial E_x}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial x} - (M_{source_z} + \sigma^* H_z) \right] \quad (63)$$

Ce système de six équations aux dérivées partielles couplées forme la base des algorithmes FDTD étudiant les interactions d'ondes électromagnétiques avec un objet tridimensionnel.

### 3.2.1. Algorithme de Yee

L'algorithme de Yee mis au point en 1966 et dont la robustesse n'est plus à démontrer est utilisé pour trouver une solution aux 6 équations (équations 58 à 63) du chapitre précédent (Taflove A., 2005).

L'algorithme de Yee permet de résoudre à la fois les champs magnétique et électrique dans le temps et dans l'espace. Vu qu'il n'utilise pas d'équation d'onde, il n'étudie pas ces 2 champs de manière totalement séparée. La solution s'en trouve donc plus robuste et plus précise que s'il avait étudié ces 2 champs séparément. Cet algorithme centre les composants du champ magnétique ( $\vec{H}$ ) et du champ électrique ( $\vec{E}$ ) afin que chaque composant de  $\vec{E}$  soit entouré par 4 composants de  $\vec{H}$  et, inversement, chaque composant de  $\vec{H}$  soit entouré par 4 composants de  $\vec{E}$ . Sur la figure 29, il est possible de voir la position des composants vectoriels du champ magnétique et électrique sur une maille cubique du réseau spatial de Yee.

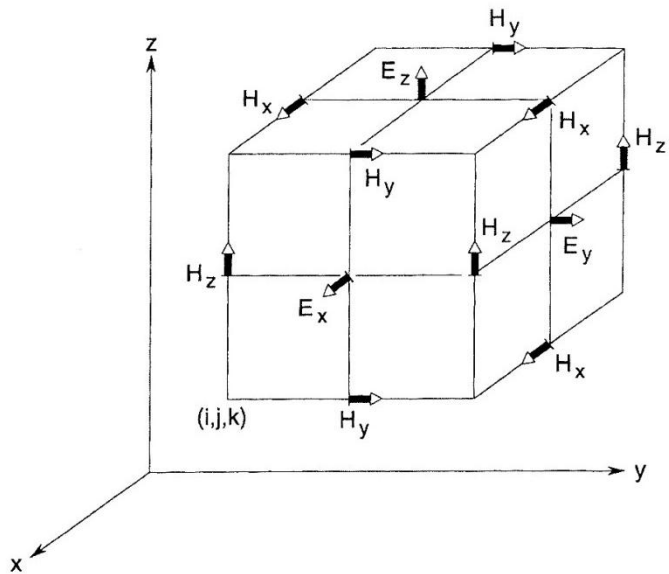


Figure 29 : Position des composants vectoriels du champ magnétique et électrique sur une maille cubique du réseau spatial de Yee (Taflove A., 2005)

La figure 29 montre une image merveilleusement simple de l'interaction en trois dimensions des lois de Faraday et des lois d'Ampère. Par exemple, il est possible d'identifier facilement les composants de  $\vec{E}$  associés au champ magnétique variable ( $\vec{H}$ ) dans le temps. En effet, comme il a déjà pu être expliqué au chapitre 2, ce champ magnétique provoque un déplacement de charges électriques, ce qui implique bien la présence d'un champ électrique. L'effet inverse peut aussi être observé.

En ce qui concerne la discrétisation, l'algorithme de Yee utilise une différence finie centrée pour approximer les dérivées spatiales. Une discussion plus approfondie à ce sujet peut être trouvée dans le paragraphe 3.2.2 : « différence finie et notation ». En ce qui concerne la discrétisation temporelle, Yee utilise aussi une différence finie centrée.

La figure 30 résume, selon l'algorithme de Yee, les différentes étapes de calcul dans l'espace et le temps.

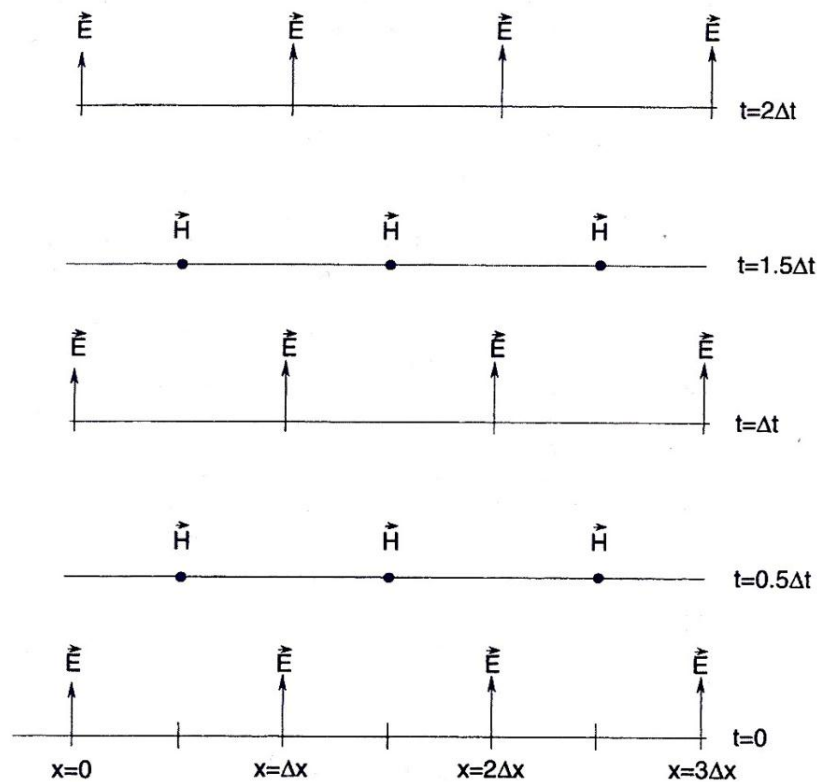


Figure 30 : Exemple de graphique espace-temps de l'algorithme de Yee pour une propagation d'onde unidirectionnelle (Taflove A., 2005)

Pour bien comprendre, il faut par exemple se placer au pas de temps  $\Delta t$ . A cet instant, toutes les composantes de  $\vec{E}$  dans l'espace sont calculées en utilisant entre autres les données de  $\vec{H}$  calculées au pas précédent ( $\Delta t/2$ ). En effet, comme on pourra s'en rendre compte dans les paragraphes suivants, l'inconnue  $\vec{E}$  peut être exprimée uniquement en fonction de valeurs précédemment calculées. Une fois que tous les calculs de  $\vec{E}$  sont réalisés, ces valeurs sont stockées et on passe au pas de temps  $\Delta t + \Delta t/2$ . L'objectif ici est de déterminer, pour chaque abscisse, les champs  $\vec{H}$ , en utilisant les champs électriques calculés précédemment. Une fois que cela est fait, on passe au temps  $2\Delta t$ . Et ainsi de suite, le cycle recommence. Il est donc possible de voir que les champs électriques et magnétiques sont calculés de manière décalée mais les évolutions des deux champs ne sont pas indépendantes l'une de l'autre, elles sont mêmes intimement liées (Taflove A., 2005).

On peut noter, qu'à chaque itération correspondant à un laps de temps  $\Delta t$ , l'onde électromagnétique se propage dans le milieu discrétisé. Ainsi, si on spécifie le nombre d'itérations, on peut demander au solveur de simuler la propagation de l'onde pour une période bien déterminée (Giannopoulos A., 2005).

### 3.2.2. Différence finie et notation

Dans le paragraphe 3.2.3, les équations 58 à 63 seront discrétisées numériquement. Cependant, avant de réaliser cette opération, les différentes notations que nous allons utiliser vont être introduites.

Dans ce qui suit on note tous points de l'espace appartenant à un maillage rectangulaire uniforme comme ceci :

$$(x, y, z) = (i\Delta x, j\Delta y, k\Delta z) \quad (64)$$

où  $\Delta x, \Delta y$  et  $\Delta z$ , sont respectivement les incréments d'espace du maillage dans la direction  $x, y$  et  $z$ , et  $i, j$  et  $k$  des entiers. Ensuite on note toute fonction  $u$  (fonction de l'espace et du temps) évaluée en un point du maillage et pour un point temporel bien précis:

$$u(i\Delta x, j\Delta y, k\Delta z, n\Delta t) = u_{i,j,k}^n \quad (65)$$

Dans cette équation 65,  $\Delta t$  est le pas temporel et  $n$  un entier.

Comme déjà mentionné dans le chapitre 3.2.1, Yee utilise dans son algorithme des différences finies centrées pour étudier les dérivées spatiales et temporelles des équations qu'il doit discrétiser. En effet, il utilise cette méthode car celle-ci est facile à programmer et offre une précision d'ordre deux, comparée à une différence avant ou arrière qui n'offre qu'une précision d'ordre un. Pour introduire les notations de cette différence centrée, prenons un exemple : considérons une dérivée première dans la direction de  $x$  qui doit être évaluée à un temps fixe  $t_n = n\Delta t$  :

$$\frac{\partial u}{\partial x}(i\Delta x, j\Delta y, k\Delta z, n\Delta t) = \frac{u_{i+1/2,j,k}^n - u_{i-1/2,j,k}^n}{\Delta x} + O[(\Delta x)^2] \quad (66)$$

Pour discrétiser sa dérivée, Yee utilise le point distant de  $\Delta x/2$  à sa droite et à sa gauche. Il utilise cette notation en  $\Delta x/2$  car, comme on a pu le voir dans le chapitre 3.2.1 : « Algorithme de Yee », il décale l'étude des composantes de  $\vec{E}$  et de  $\vec{H}$  d'un espace égal à  $\Delta x/2$ . Or, pour l'étude des composantes de  $\vec{E}$ , comme on le verra au chapitre suivant, les composantes de  $\vec{H}$  précédemment mesurées seront utilisées. Par souci d'exhaustivité, il peut être noté que les discrétisations numériques pour les dérivées selon l'axe  $y$  et  $z$  peuvent être écrites de manière similaire en incrémentant respectivement l'indice  $j$  ou  $k$  d'un terme  $\pm\Delta y/2$  et  $\pm\Delta z/2$ .

En ce qui concerne la dérivée temporelle, l'expression donnée par Yee pour une dérivée spatiale du premier ordre évaluée en un point fixe de l'espace  $(i, j, k)$ , possède la forme suivante :

$$\frac{\partial u}{\partial t}(i\Delta x, j\Delta y, k\Delta z, n\Delta t) = \frac{u_{i,j,k}^{n+1/2} - u_{i,j,k}^{n-1/2}}{\Delta t} + O[(\Delta t)^2] \quad (67)$$

Ici aussi, les champs électrique et magnétique sont étudiés de manière décalée. Cela explique pourquoi on utilise des incréments de  $\Delta t/2$ .

### 3.2.3. Expressions discrétisées des équations de Maxwell en trois dimensions

Désormais, les notations et les idées développées au point précédent peuvent être appliquées aux équations 58 à 63, afin d'obtenir une approximation numérique des équations de Maxwell. Toutes les étapes pour l'équation 58 sont expliquées. Cependant, vu que le raisonnement est similaire pour les autres, il n'y a que la forme finale qui est notée. De plus, par souci de lisibilité, celles-ci sont placées en annexe 1. Reprenons l'équation 58 sous forme différentielle (équation 68):

$$\frac{\partial E_x}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left[ \frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} - (J_{source_x} + \sigma E_x) \right] \quad (68)$$

Réalisons la substitution des dérivées spatiales et temporelles du premier ordre par des différences finies centrées. Par exemple, pour  $E_x(i, j + 1/2, k + 1/2, n)$ , nous avons :

$$\begin{aligned} & \frac{E_x|_{i,j+1/2,k+1/2}^{n+1/2} - E_x|_{i,j+1/2,k+1/2}^{n-1/2}}{\Delta t} \\ &= \frac{1}{\varepsilon_{i,j+1/2,k+1/2}} \left( \frac{H_z|_{i,j+1,k+1/2}^n - H_z|_{i,j,k+1/2}^n}{\Delta y} - \frac{H_y|_{i,j+1/2,k+1}^n - H_y|_{i,j+1/2,k}^n}{\Delta z} \right. \\ & \quad \left. - J_{source_x}|_{i,j+1/2,k+1/2}^n - \sigma_{i,j+1/2,k+1/2} \cdot E_x|_{i,j+1/2,k+1/2}^n \right) \end{aligned} \quad (69)$$

Tous les termes du membre de droite sont étudiés au pas de temps  $n$ . Toutes les valeurs de  $\vec{H}$  pour le temps  $n$  sont supposées connues et stockées dans la mémoire de l'ordinateur. Par contre, il reste le problème du terme  $E_x|_{i,j+1/2,k+1/2}^n$  qui, lui, n'est pas connu. En effet, seule la valeur précédente de  $E_x$ , c'est-à-dire celle correspondant au temps  $n - 1/2$  est connue. Nous allons donc utiliser une approximation semi-implicite pour trouver la valeur de ce terme. Cette approximation prend la forme suivante :

$$E_x|_{i,j+1/2,k+1/2}^n = \frac{E_x|_{i,j+1/2,k+1/2}^{n-1/2} + E_x|_{i,j+1/2,k+1/2}^{n+1/2}}{2} \quad (70)$$

La valeur de  $E_x$  au pas de temps  $n$  est considérée comme étant égale à la moyenne arithmétique de la valeur du champ électrique dans la direction  $x$  au pas de temps  $n-1/2$  et de la nouvelle valeur de  $E_x$  que l'on va calculer. Si cette équation 70 est placée dans l'équation 69, et que les deux membres sont multipliés par  $\Delta t$  nous obtenons :

$$\begin{aligned} & E_x|_{i,j+1/2,k+1/2}^{n+1/2} - E_x|_{i,j+1/2,k+1/2}^{n-1/2} \\ &= \frac{\Delta t}{\varepsilon_{i,j+1/2,k+1/2}} \left( \frac{H_z|_{i,j+1,k+1/2}^n - H_z|_{i,j,k+1/2}^n}{\Delta y} - \frac{H_y|_{i,j+1/2,k+1}^n - H_y|_{i,j+1/2,k}^n}{\Delta z} \right. \\ & \quad \left. - J_{source_x}|_{i,j+1/2,k+1/2}^n - \sigma_{i,j+1/2,k+1/2} \cdot \left( \frac{E_x|_{i,j+1/2,k+1/2}^{n-1/2} + E_x|_{i,j+1/2,k+1/2}^{n+1/2}}{2} \right) \right) \end{aligned} \quad (71)$$

Si on rassemble, dans le membre de gauche, tous les termes en  $(n + \frac{1}{2})$  et, dans le membre de droite les valeurs connues, nous obtenons :

$$\begin{aligned}
& \left( 1 + \frac{\sigma_{i,j+1/2,k+1/2} \cdot \Delta t}{2 \cdot \varepsilon_{i,j+1/2,k+1/2}} \right) E_x |_{i,j+1/2,k+1/2}^{n+1/2} \\
&= \left( 1 - \frac{\sigma_{i,j+1/2,k+1/2} \cdot \Delta t}{2 \cdot \varepsilon_{i,j+1/2,k+1/2}} \right) E_x |_{i,j+1/2,k+1/2}^{n-1/2} \\
&+ \frac{\Delta t}{\varepsilon_{i,j+1/2,k+1/2}} \left( \frac{H_z |_{i,j+1,k+1/2}^n - H_z |_{i,j,k+1/2}^n}{\Delta y} - \frac{H_y |_{i,j+1/2,k+1}^n - H_y |_{i,j+1/2,k}^n}{\Delta z} \right. \\
&\left. - J_{source_x} |_{i,j+1/2,k+1/2}^n \right) \tag{72}
\end{aligned}$$

Si on divise les deux membres par la valeur  $\left( 1 + \frac{\sigma_{i,j+1/2,k+1/2} \cdot \Delta t}{2 \cdot \varepsilon_{i,j+1/2,k+1/2}} \right)$ , nous trouvons l'expression explicite de  $E_x$  au temps  $(n+1/2)$  en fonction d'un ensemble de termes qui sont connus. Cette expression 73 est celle utilisée dans le calcul numérique :

$$\begin{aligned}
E_x |_{i,j+1/2,k+1/2}^{n+1/2} &= \left( \frac{\left( 1 - \frac{\sigma_{i,j+1/2,k+1/2} \cdot \Delta t}{2 \cdot \varepsilon_{i,j+1/2,k+1/2}} \right)}{\left( 1 + \frac{\sigma_{i,j+1/2,k+1/2} \cdot \Delta t}{2 \cdot \varepsilon_{i,j+1/2,k+1/2}} \right)} \right) E_x |_{i,j+1/2,k+1/2}^{n-1/2} \\
&+ \frac{\left( \frac{\Delta t}{\varepsilon_{i,j+1/2,k+1/2}} \right)}{\left( 1 + \frac{\sigma_{i,j+1/2,k+1/2} \cdot \Delta t}{2 \cdot \varepsilon_{i,j+1/2,k+1/2}} \right)} \left( \frac{H_z |_{i,j+1,k+1/2}^n - H_z |_{i,j,k+1/2}^n}{\Delta y} - \frac{H_y |_{i,j+1/2,k+1}^n - H_y |_{i,j+1/2,k}^n}{\Delta z} \right. \\
&\left. - J_{source_x} |_{i,j+1/2,k+1/2}^n \right) \tag{73}
\end{aligned}$$

Taflove (Taflove A., 2005) indique que l'approximation semi-implicite (équation 70) posée précédemment s'avère, dans la pratique, numériquement stable et donne des résultats précis pour des valeurs de conductivité ( $\sigma$ ) allant de 0 à l'infini. Pour rappel, les expressions discrétisées des équations 59 à 63 se trouvent en annexe 1.

### 3.3. Hypothèses réalisées par GprMax

Il a été possible de voir au chapitre précédent que Taflove (Taflove A., 2005) a dû réaliser certaines hypothèses pour obtenir une forme simple d'équations discrétisées. Dans le programme GprMax, de telles hypothèses sont aussi nécessaires, afin de garantir un besoin en ressource de calcul raisonnable. De plus, cela facilite l'étude de la réponse du signal GPR. En effet, si on limite la complexité du problème, on peut se concentrer sur une réponse intéressante et on n'encombre pas la solution avec des détails qui pourraient masquer la réponse fondamentale (Giannopoulos A., 2005).

Les hypothèses posées par le programme sont les suivantes (Giannopoulos A., 2005):

- tous les milieux sont considérés comme linéaires et isotropes ;

- en ce qui concerne le programme 2D de GprMax, l'antenne d'émission est modélisée comme une source linéaire. Cela découle directement de l'hypothèse d'invariance du problème dans la troisième direction de l'espace ;
- tout comme pour Taflove (Taflove A., 2005), les paramètres constitutifs sont supposés ne pas varier avec la fréquence. Cette hypothèse simplifie fortement le modèle. Cependant, en ce qui concerne la permittivité, un modèle de relaxation de celle-ci avec la fréquence est employé afin d'obtenir une valeur plus réaliste de celle-ci. On peut noter que le modèle employé est celui de Debye.

On constate donc que les hypothèses posées ici sont similaires à celles posées par Taflove (Taflove A., 2005) au point précédent. Par conséquent, les équations utilisées par le programme se réduisent à celles décrites précédemment.

### 3.4. Stabilité numérique

Comme on l'a vu, la solution numérique est directement obtenue en utilisant une version discrétisée des équations de Maxwell, qui sont appliquées à chaque cellule formant le maillage du domaine. Étant donné que ces équations sont discrétisées dans l'espace et le temps, la solution est obtenue de façon itérative. Pour obtenir directement une solution stable et précise en utilisant une version discrétisée des équations de Maxwell, il faut payer un prix. En effet, les valeurs  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  et  $\Delta t$  ne peuvent pas être prises indépendamment l'une de l'autre. Pour avoir un processus inconditionnellement stable, il faut respecter la condition CFL (d'après les initiales de Courant, Freidrichs et Lewy) suivante :

$$\Delta t \leq \frac{1}{c \sqrt{\left(\frac{1}{\Delta x}\right)^2 + \left(\frac{1}{\Delta y}\right)^2}} \quad (74)$$

où  $c$  correspond à la vitesse de la lumière. Ainsi on constate que  $\Delta t$  est borné par des valeurs de  $\Delta x$  et  $\Delta y$ . On peut noter que GprMax s'arrange pour toujours respecter cette condition. Il fixe lui-même le pas temporel après introduction du pas spatial dans la direction  $x$  et  $y$  (Giannopoulos A., 2005).

### 3.5. Discrétisation

Une étape importante dans une modélisation FDTD est le choix de la discrétisation spatiale. Idéalement, ce serait bien d'avoir  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  et même  $\Delta t$  aussi grand que possible afin d'exécuter le plus rapidement notre simulation. Toutefois, comme on vient de le voir, la valeur de  $\Delta t$  est conditionnée. En effet, si le pas de temps choisi est trop grand, la solution peut devenir numériquement instable. Il en est de même pour le pas spatial. Si  $\Delta x$  et  $\Delta y$  sont trop grands, les champs magnétiques et électriques peuvent ne pas être suffisamment échantillonnés et cela peut conduire à des résultats erronés (Irving J., 2006).

En fait, comme le précise Giannopoulos (Giannopoulos A., 2005), il n'y a pas vraiment de directives nettes et précises pour choisir un pas de discrétisation spatiale. En général, le pas choisit va dépendre de la précision requise, de la fréquence de l'impulsion venant de la source ainsi que de la taille des objets que l'on veut observer. Evidemment, l'ensemble des objets présents dans un modèle

doit être suffisamment discrétisé. Par exemple, cela signifie qu'un cylindre dont le rayon est égal à une ou deux fois le pas spatial ne ressemble pas vraiment à un cylindre. Donc, pour avoir quelque chose de précis, il faut diminuer ce pas.

Ensuite, d'autres facteurs importants qui influent sur la discrétisation sont les erreurs associées à la dispersion numérique. En effet, contrairement au monde réel dans lequel les ondes électromagnétiques se propagent à la même vitesse, quelles que soient leur direction et leur fréquence (en supposant un milieu non dispersif et isotrope), dans le monde numérique, ce n'est pas le cas. Une discussion fort intéressante à ce sujet peut être trouvée dans le document de Taflove (Taflove A., 2005) : il explique par calculs que la dispersion numérique, qui touche aussi bien la vitesse de propagation du signal que son amplitude, est fonction du pas spatial choisi par rapport à la longueur d'onde du signal, mais est aussi fonction de la direction de propagation de l'onde. Contrairement à ce que l'on pourrait penser, en utilisant un maillage carré l'atténuation de la vitesse est plus marquée dans les directions principales ( $\theta = 0^\circ, 90^\circ, \dots$ ) que dans une direction oblique. Mais logiquement, plus le nombre de points par rapport à la longueur d'onde augmente, plus le phénomène s'amenuise. Divers exemples sont présents dans ce document, dont notamment celui en figure 31.

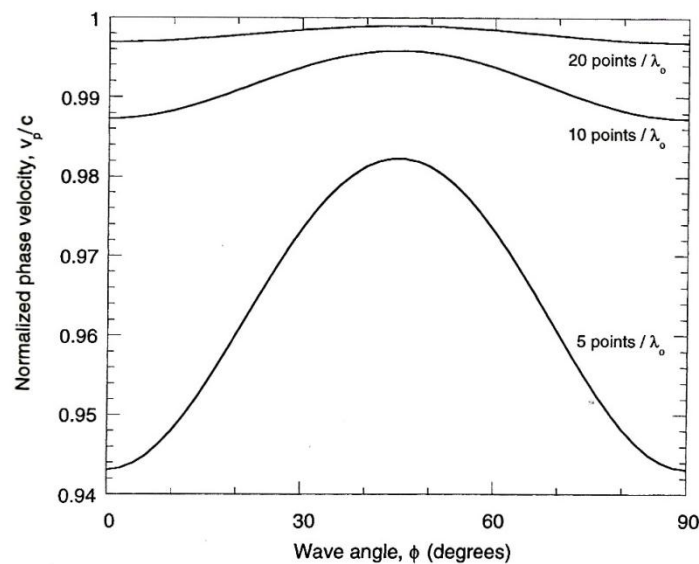


Figure 31: Variation de la vitesse de phase en fonction de la discrétisation et de la direction (Taflove A., 2005)

Grâce à ce qui vient d'être dit mais aussi grâce au document de Giannopoulos (Giannopoulos A., 2005), on peut arriver à la conclusion que, même si cette erreur existe, celle-ci peut être limitée à une valeur assez faible si la règle suivante est respectée : « le pas de discrétisation spatial doit être au moins dix fois plus petit que la longueur d'onde de l'onde électromagnétique ». Cette phrase peut être retranscrite sous forme mathématique (Giannopoulos A., 2005 ; Taflove A., 2005):

$$\Delta x, \Delta y \leq \frac{\lambda}{10} \quad (75)$$

En respectant l'ensemble des recommandations citées précédemment, la modélisation devrait donner des résultats concluants. Dans la suite de ce document, on trouvera un chapitre entier consacré à des modélisations.

# 2<sup>ème</sup> partie : Modélisation GprMax

## (partie pratique)

Dans le chapitre 3 des rappels bibliographiques, on a pu trouver une explication sur l'algorithme utilisé dans la plupart des programmes de modélisations de propagation d'ondes électromagnétiques. Ici, nous allons passer à un côté beaucoup plus pratique des choses puisque nous allons étudier la réponse du programme pour des cas de figure que l'on tentera de réappliquer en pratique au laboratoire. Dans ce chapitre, des mesures statiques seront modélisées puisque les essais de laboratoire seront basés sur cette méthode.

Avant de rentrer vraiment dans le cœur du sujet, il peut être utile de réaliser un chapitre sur l'étude de la réponse directe du radar. Il est intéressant d'étudier l'influence du type et de la position des conditions limites ainsi que l'influence de la discrétisation sur la réponse du programme. Cependant, afin de ne pas alourdir ce travail, l'ensemble de ce chapitre utile à toutes personnes voulant se familiariser avec les particularités du programme est placé en annexe 2. Le second chapitre parlera de l'étude de simples dalles en béton, avant d'introduire la présence de zones humides et de gradients d'humidité, qui sont les principaux sujets de ce travail.

Les objectifs de ce chapitre modélisation peuvent être regroupés en trois points :

- Anticiper les variations de champs électriques que l'on retrouvera dans la partie expérimentale.
- Etudier l'influence de la présence du gradient sur la détection d'une zone humide.
- Voir comment va évoluer le signal en fonction de l'évolution du gradient car celui-ci est loin d'être statique.

D'une manière générale, dans la suite, seuls les résultats des modélisations sont repris. Les fichiers textes de données introduits dans le programme sont donnés en annexe 3. Les explications des commandes introduites dans ces fichiers sont détaillées par Giannopoulos (Giannopoulos A., 2005).

### **4. Onde directe dans l'air**

La première modélisation réalisée porte simplement sur l'étude de l'onde électromagnétique dans l'air. Il est intéressant de passer par cette étape car de cette manière, il est facile de se rendre compte de la forme de l'onde émise par la source. En effet, l'onde reçue est l'image du signal émis puisqu'aucune interférence n'est rencontrée par celui-ci. D'une manière plus pratique, nous utilisons dans ce chapitre un signal émis possédant une forme prédéfinie par le programme. Nous avons opté pour un signal du type « Ricker » dont l'équation correspond à la dérivée première d'une onde gaussienne (équation 76).

$$I = -2\xi\sqrt{e^{1/2\xi}}e^{-\xi(t-\chi)^2}(t-\chi) \quad (76)$$

$$\text{où } \xi = 2\pi^2 f^2 \text{ et } \chi = \frac{1}{f}$$

La forme de cette onde est visible sur la figure 32a. Dans cette première simulation, un domaine suffisamment grand est défini afin d'éviter toutes interférences avec les conditions limites. Ici, nous avons opté pour un domaine de 1 m x 1 m et nous avons placé l'émetteur et le récepteur au centre de ce carré. Pour coller à la réalité, l'émetteur est éloigné du récepteur d'une distance de 4 cm. Le pas spatial choisi est de 1,25 mm et donc le pas temporel est de (Giannopoulos A., 2005).

$$\Delta t = \frac{\Delta l}{c\sqrt{2}} = 2.95 * 10^{-12} \text{ pour } \Delta l = \Delta x = \Delta y \quad (77)$$

Ce pas temporel est déterminé automatiquement par le programme afin de s'assurer que la réponse soit stable. On peut vérifier si le pas spatial choisi respecte bien la règle de bonne pratique précédemment définie dans le chapitre théorique:

Le radar utilisé émet à une fréquence de 2,3 GHz. En réutilisant les formules vues au chapitre 2 de la partie rappel théorique, nous pouvons écrire (Annan A.P., 2005):

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r} f} = \frac{300 * 10^6}{\sqrt{1} 2,3 * 10^9} = 0.13 \text{ m} = 13 \text{ cm} \quad (78)$$

En effet, la permittivité relative du vide est égale à 1. La règle de bonne pratique énoncée par Giannopoulos (Giannopoulos A., 2005 ) conseillait de prendre un pas spatial inférieur au dixième de cette valeur. Or, nous avons pris  $\Delta x = \Delta y = 1.25 \text{ mm}$  ce qui est bien inférieur à 13 mm. Le signal est étudié sur une période de 10 nanosecondes, ce qui correspond à 3392 itérations.

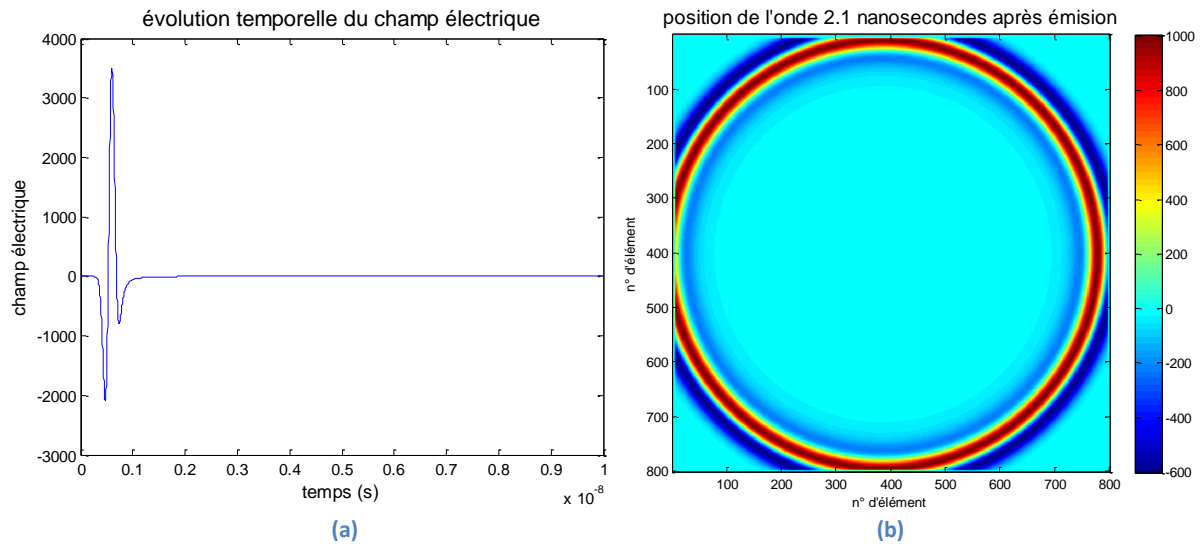


Figure 32 : Evolution du champ électrique dans le vide

Grâce à la figure 32a, il est possible de se faire une idée d'une image visuelle du signal émis par le radar. Pour rappel, il s'agit ici du signal non perturbé. Le lecteur pourra à tout moment revenir sur cette image pour comparer les prochains signaux de ce chapitre à cette figure. De la sorte, il pourra se rendre compte de l'influence du milieu sur le signal. Ici, on observe qu'une fois le signal passé, aucune nouvelle variation de l'amplitude n'est visible sur le reste du graphique. Cela indique que la simulation est stable et que les parois ont bien absorbé le signal. L'hypothèse d'un domaine infini est donc bien respectée. La figure 32b quant à elle permet de se rendre compte de l'évolution de l'onde électromagnétique dans l'espace. Cette image montre clairement que même si nous ne recevons

plus rien au récepteur à 2,1 nanosecondes, l'onde continue à se propager dans le milieu. Si celle-ci rencontrait un obstacle, elle serait réfléchiée et une image de cette onde réfléchiée pourrait être visible sur le graphique donnant l'évolution temporelle du champ électrique. Ce cas de figure sera rencontré plus loin dans ce rapport (chapitre 6).

## 5. Etude de l'onde directe sur une dalle en béton infinie

Comme il a été vu sur la figure n°32a, l'onde directe présente un pic maximal assez conséquent. Si réflexion il y a, l'intensité du champ réfléchi est nettement moindre que l'intensité du champ direct. Dès lors, pour des soucis de lisibilité, il est parfois intéressant de venir soustraire à la réponse reçue, une réponse du type onde directe. Cependant, l'onde qu'il faut retirer ici ne correspond pas à l'onde précédemment étudiée mais bien à l'onde reçue par un récepteur qui serait placé sur une dalle dont les dimensions sont supposées infinies. De cette manière, nous évitons toutes réflexions venant des bords de cette dalle. Pour ce faire, il suffit de venir modéliser à l'aide de GprMax une dalle en béton dont les bords latéraux et la face inférieure sont limités par le domaine de calcul. Dans un souci de réalisme, l'émetteur et le récepteur ne sont pas positionnés directement sur la face du béton mais en sont éloignés de l'équivalent d'une cellule. Vérifions le pas spatial minimal à respecter (Giannopoulos A., 2005).

$$d_{x_{\max}} = \frac{\lambda_{\text{béton sec}}}{10} = \frac{v}{10f} = \frac{c}{10\sqrt{\varepsilon_r}f} = \frac{300 * 10^6}{10\sqrt{4,5} * 2,3 * 10^9} = 0,00615 \text{ m} = 6,15 \text{ mm} \quad (79)$$

On constate que le pas de 1,25 mm utilisé précédemment convient parfaitement. L'émetteur et le récepteur sont de nouveau situés au centre du domaine discrétisé.

Le tableau 5 reprend les caractéristiques retenues pour la modélisation :

Tableau 5: Caractéristiques de la modélisation de l'onde directe sur une dalle sèche de dimension infinie

$\Delta x = \Delta y = \Delta l$		1,25mm		
$\Delta t$		$2,95 * 10^{-12}$ secondes		
Durée de l'étude		$10 * 10^{-9}$ secondes		
Nombre d'itérations		3392 itérations		
Position de l'émetteur (x, y) en m		(0,48 ; 0,50125)		
Position du récepteur (x, y) en m		(0,52 ; 0,50125)		
Matériau utilisé				
Nom	Permittivité relative $\varepsilon_r$	Conductivité électrique	Perméabilité relative $\mu_r$	caractéristique
Béton sec	4,5	0,005	1	Béton très sec non magnétique

Voici les résultats obtenus :

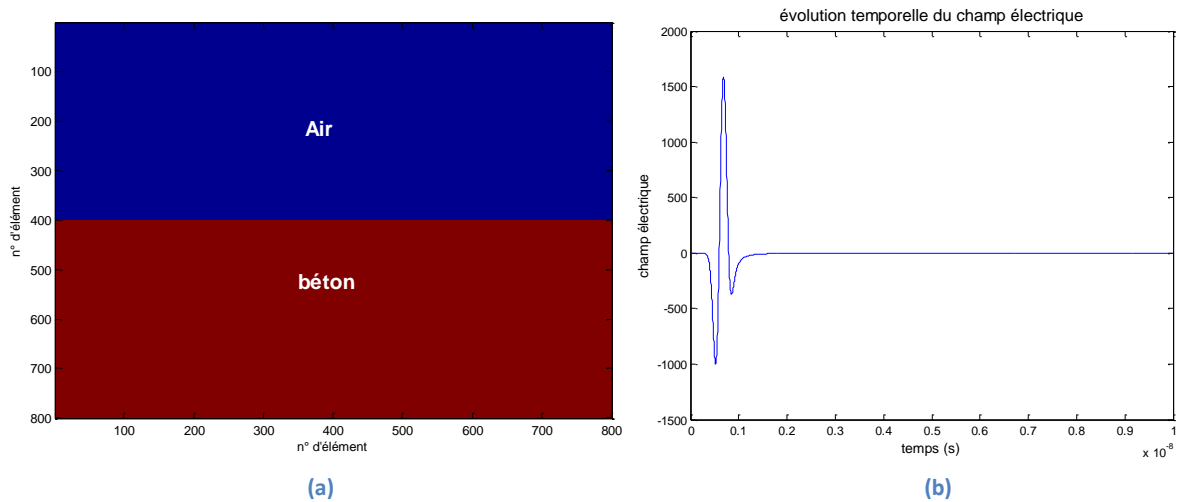


Figure 33: Géométrie (a) et évolution du champ électrique dans une dalle en béton infinie (b)

La figure 33a renseigne juste sur la géométrie du problème. La seconde par contre (figure 33b) montre l'évolution du signal reçu par le récepteur. On constate que la forme de celui-ci est similaire à la forme obtenue précédemment dans le vide. Cependant, l'amplitude du signal mesuré sur le béton est 2 fois plus faible que l'amplitude du signal dans l'air, et son pic est légèrement décalé. Cette onde est en réalité une combinaison de l'onde directe dans l'air, de l'onde directe dans le béton et d'une onde se réfléchissant à la surface du béton. Par souci de simplification, dans la suite de ce rapport, le terme onde directe est utilisé pour nous référer à celle-ci.

On peut signaler qu'il existe un effet de la présence du béton sur l'onde électromagnétique car comme on a pu le voir dans les rappels bibliographiques, les propriétés du béton sont différentes de celles de l'air. Cette différence de propriétés peut être constatée en regardant la position de l'onde à deux pas de temps bien distincts (figures 34a et 34b):

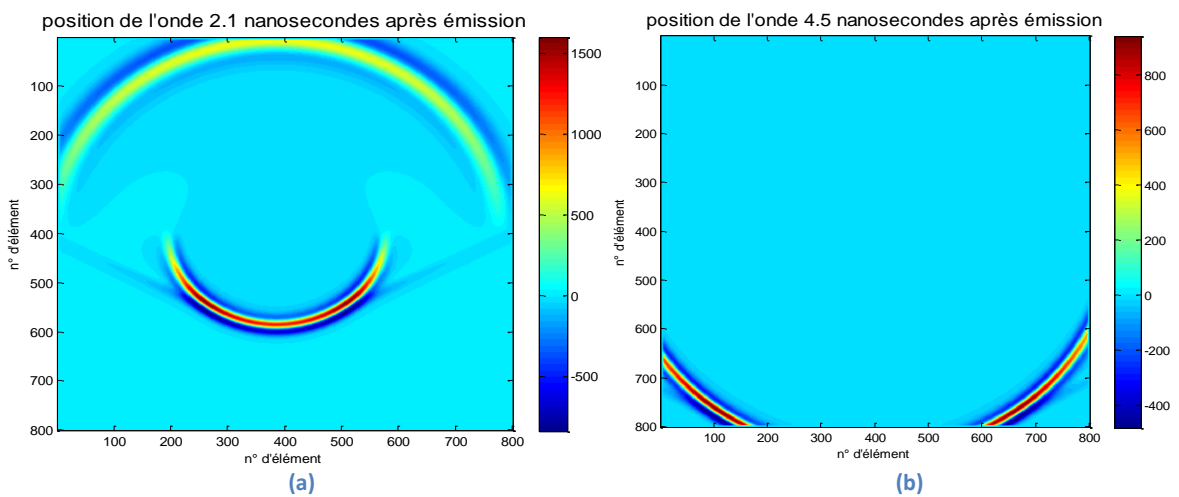


Figure 34: Evolution du champ électrique dans une dalle infinie

En effet, la permittivité relative du béton étant plus élevée, l'onde voyage beaucoup moins rapidement au sein du béton qu'au sein de l'air. C'est ce qui explique pourquoi à 2,1 nanosecondes l'onde a déjà atteint le bord supérieur du domaine tandis qu'elle n'est pas encore à mi-chemin dans la partie inférieure. De plus, l'onde est beaucoup plus étroite et plus intense que l'onde qui voyage dans l'air.

## 6. Etude de l'onde sur une dalle finie

Ici, on se rapproche de notre cas réel, c'est-à-dire une dalle limitée par des faces bien nettes. Un élément de béton de 10 cm de haut et de 80 cm de long est modélisé au centre de notre domaine. Les dimensions n'ont pas été choisies au hasard car il s'agit des dimensions des dalles qui seront utilisées dans la partie expérimentale. Au vu de la discussion du point II de l'annexe 2, nous n'avons pas besoin d'augmenter la dimension du domaine. En effet tant que l'on s'arrange pour placer notre dalle en dehors des 8 cellules constituant la PML, la réponse du signal n'est pas perturbée.

Le tableau 6 reprend les caractéristiques retenues pour la modélisation:

Tableau 6: Caractéristiques de la modélisation de l'onde sur une dalle sèche de dimension finie

$\Delta x = \Delta y = \Delta l$		1,25mm		
$\Delta t$		$2,95 \cdot 10^{-12}$ secondes		
Durée de l'étude		$10 \cdot 10^{-9}$ secondes		
Nombre d'itérations		3392 itérations		
Position de l'émetteur (x, y) en m		(0.48, 0.55125)		
Position du récepteur (x, y) en m		(0.52, 0.55125)		
Position de la dalle [coin inférieur gauche (x, y) ; coin supérieur droit(x, y)] en m		[(0.1, 0.45) ; (0.9, 0.55)]		
Matériau utilisé				
Nom	Permittivité relative $\epsilon_r$	Conductivité électrique	Perméabilité relative $\mu_r$	caractéristique
béton	4,5	0,005	1	Béton très sec non magnétique

De cette manière le bord de la dalle est situé à 80 cellules du bord du domaine le plus proche. Il n'y a donc aucun problème d'influence de ceux-ci. Voici les graphiques que l'on obtient après réalisation de la simulation:

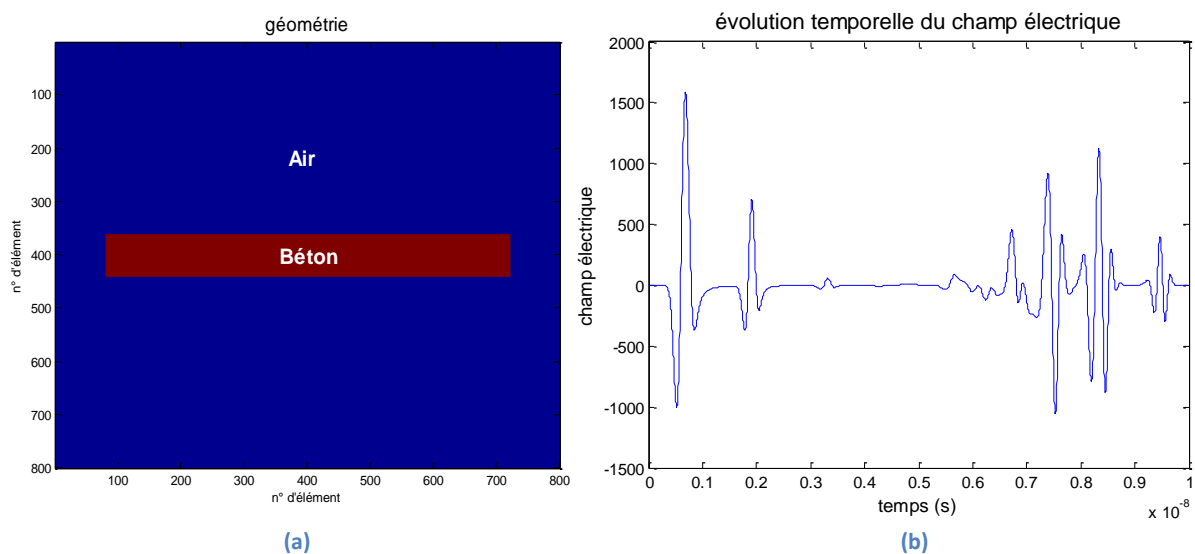


Figure 35: Géométrie (a) et évolution du champ électrique dans une dalle en béton(b)

Le premier graphique (figure 35a) renseigne simplement sur la géométrie du problème. Sur celui-ci on voit la proximité qui existe entre les bords extérieurs et la limite du domaine. Le second graphique (figure 35b) montre l'évolution du champ électrique en fonction du temps. Pour éclaircir

les choses, l'onde directe étudiée au point 5 : « étude de l'onde directe sur une dalle en béton infinie » (figure 33b) peut être enlevée. Voici les résultats après simulation :

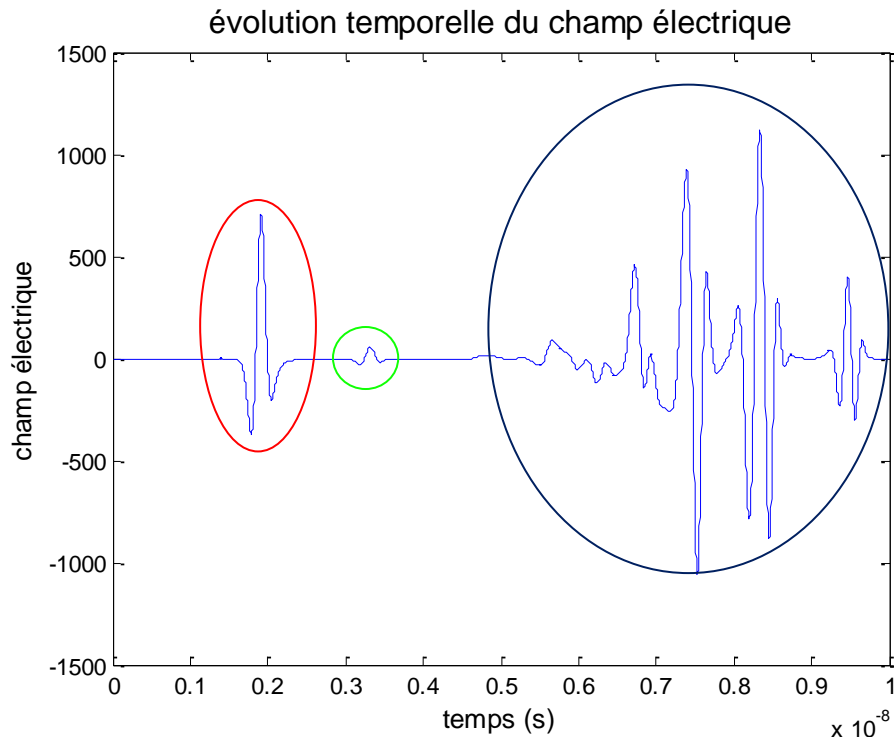
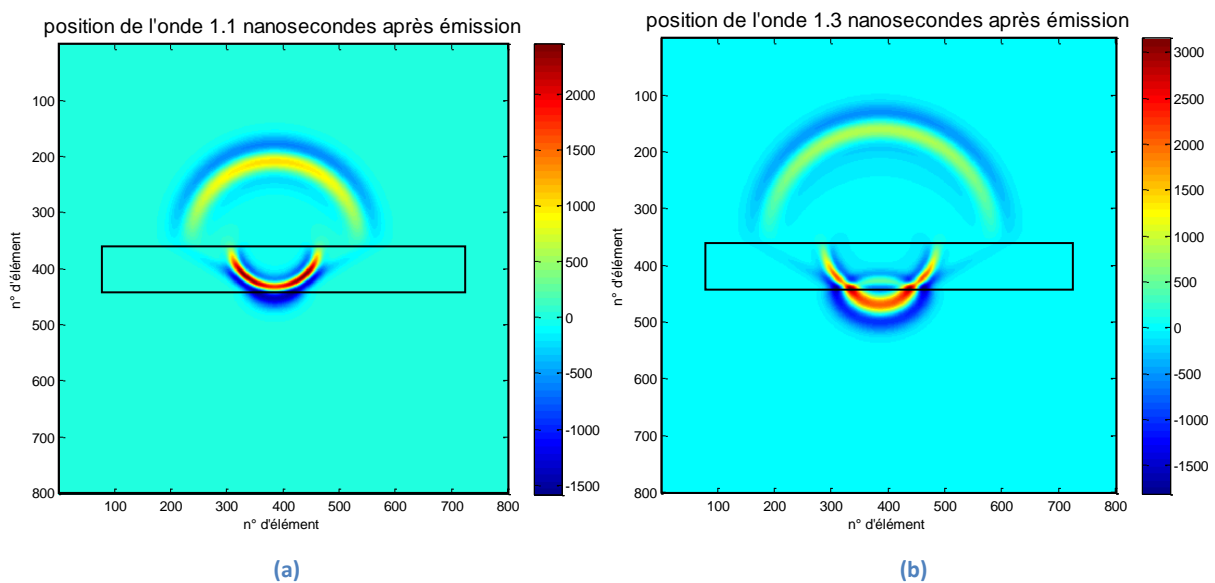


Figure 36 : Evolution du champ électrique dans une dalle en béton (sans onde directe)

Sur cette figure 36, trois zones bien distinctes apparaissent, celles-ci sont chaque fois entourées par une couleur. Chacun de ces pics est dû à une réflexion de l'onde sur une surface bien particulière. Pour comprendre lesquelles, la position de l'onde en fonction du temps sera étudiée. Le premier pic entouré en rouge sur la figure n°36 apparaît aux alentours de la deuxième nanoseconde. Regardons donc ce qui s'est passé avant :



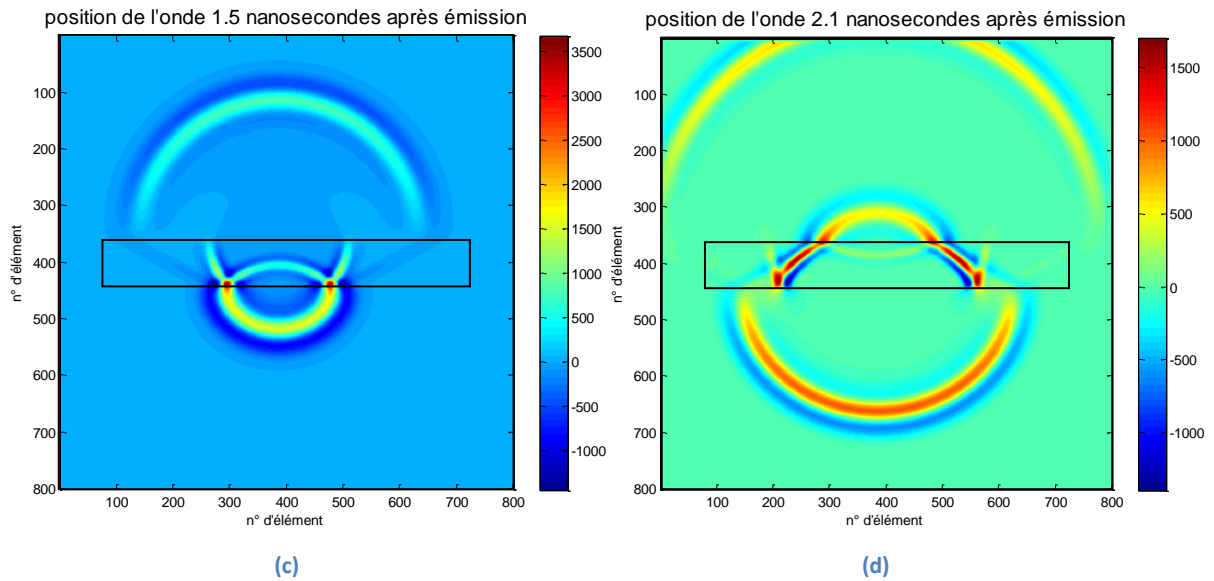


Figure 37 : Evolution du champ électrique dans une dalle finie de 1 à 2,1 nanosecondes

Grâce aux figures 37a, 37b, 37c et 37d, nous pouvons mieux comprendre l'origine du premier pic. En fait l'onde émise initialement se propage dans la dalle en béton. Aux alentours de 1,1 nanosecondes, on voit que l'onde a atteint le bord inférieur de la dalle. A cet endroit, il existe une interface entre deux milieux présentant des propriétés électromagnétiques différentes : l'air et le béton. Il y a donc une certaine transmission de l'onde et une certaine réflexion. C'est ce qui est visible sur les graphiques 37b et 37c nous montrant la position de l'onde à 1,3 et 1,5 nanosecondes. L'onde réfléchi, se propage dans la dalle à contre-sens de l'onde initiale. Elle remonte donc progressivement vers le récepteur pour atteindre celui-ci aux alentours de la deuxième nanoseconde. Ensuite, il y a de nouveau une certaine réflexion de l'onde à cet endroit, onde qui se propage de nouveau vers le fond de la dalle. Une fois le fond atteint, il y a réflexion et l'onde revient vers le récepteur aux alentours de la quatrième nanoseconde (Pic en vert) sur la figure 36. La troisième zone quant à elle est plus difficile à expliquer précisément. Pour nous aider, regardons les figures 38a et 38b:

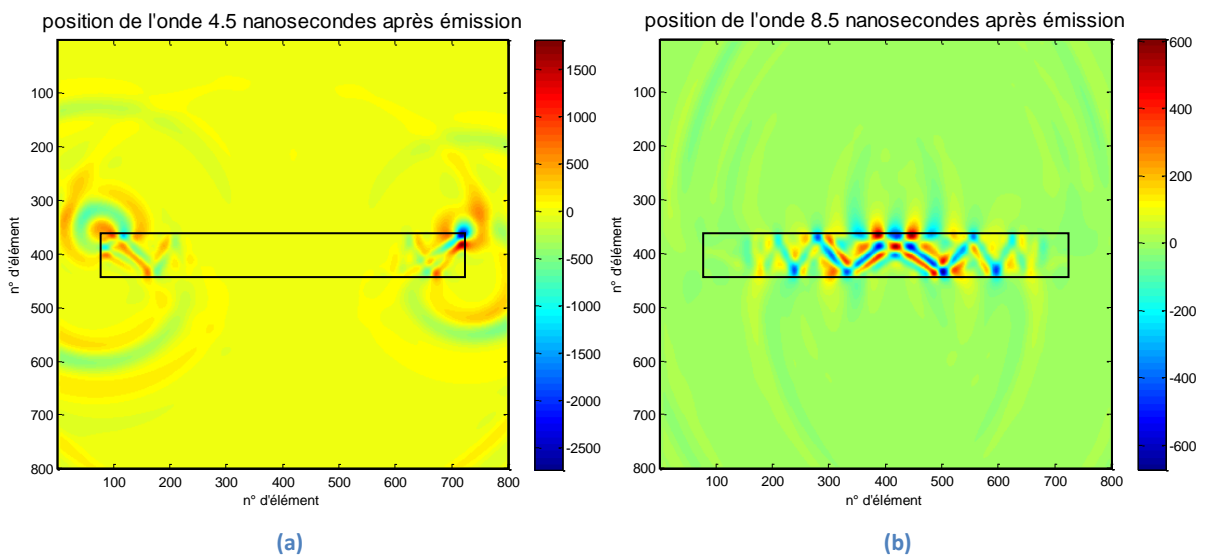


Figure 38: Evolution du champ électrique dans une dalle finie de 4,5(a) à 8,5 nanosecondes (b)

Grâce à ceux-ci il est plus facile de comprendre l'origine de ces variations du champ électrique,

l'onde a atteint à toute une série d'endroits l'interface entre le béton et l'air et ce y compris sur les bords latéraux de la dalle. Il y a donc toute une série d'ondes réfléchies qui voyagent dans tous les sens en subissant de nombreuses interférences. Les dimensions de la dalle ont été choisies suffisamment importantes afin que ces réflexions complexes puissent être séparées facilement des réflexions à la base de la dalle. Dans la suite de ce travail, on ne s'intéressera donc qu'à la première partie du signal.

## 7. Influence de la teneur en eau sur la réponse du signal

Dans cette partie, pour déterminer les propriétés électriques du béton en fonction de l'humidité, nous allons utiliser des propriétés moyennes présentées par Soustos (Soustos M.N., 2001). Pour rappel un des deux graphiques présentés dans la partie théorique se présentait de la manière suivante :

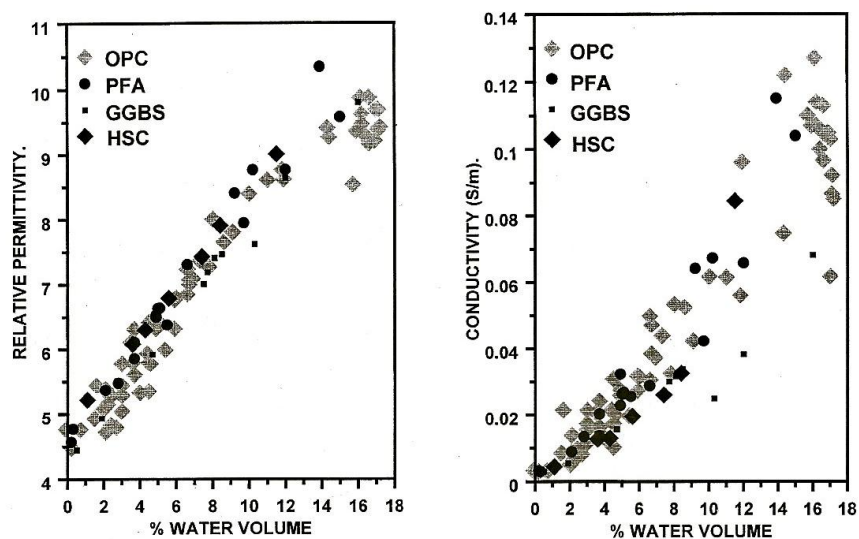


Figure 39: Influence de la teneur en eau sur les propriétés diélectriques des bétons (Soustos M.N., 2001)

Ce graphique (figure 39) est utilisé car initialement, les propriétés électriques réelles de notre béton ne sont pas connues.

Pour étudier l'influence de cette teneur en eau, nous allons donc considérer deux bétons différents. Un béton sec dont l'étude a déjà été faite précédemment et un béton humide. Afin de bien observer les différences causées par la présence d'humidité, les deux modélisations sont présentées en vis-à-vis. Les caractéristiques de la modélisation sur béton sec peuvent être trouvées au chapitre 6 (tableau 6). En ce qui concerne le béton humide la modélisation est identique, la seule différence vient des propriétés du béton. Ce sont désormais les valeurs du tableau 7 qui sont utilisées :

Tableau 7: Propriétés électriques du béton humide retenu pour la modélisation

Matériau utilisé				
Nom	Permittivité relative $\epsilon_r$	Conductivité électrique ( $mS/m$ )	Perméabilité relative $\mu_r$	caractéristique
Béton humide	9	0,08	1	Béton humide (12% de teneur en eau) non magnétique

A nouveau, on vérifie si le pas spatial utilisé est suffisant :

$$\lambda_{\text{béton humide}} = \frac{v}{f} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r} f} = \frac{300 * 10^6}{\sqrt{9} 2,3 * 10^9} = 0,0435 \text{ m} = 4,35 \text{ cm} \quad (80)$$

Une discrétisation utilisant un pas spatial de 1,25 mm est donc largement suffisante. Après réalisation de la simulation, voici ce qui est obtenu :

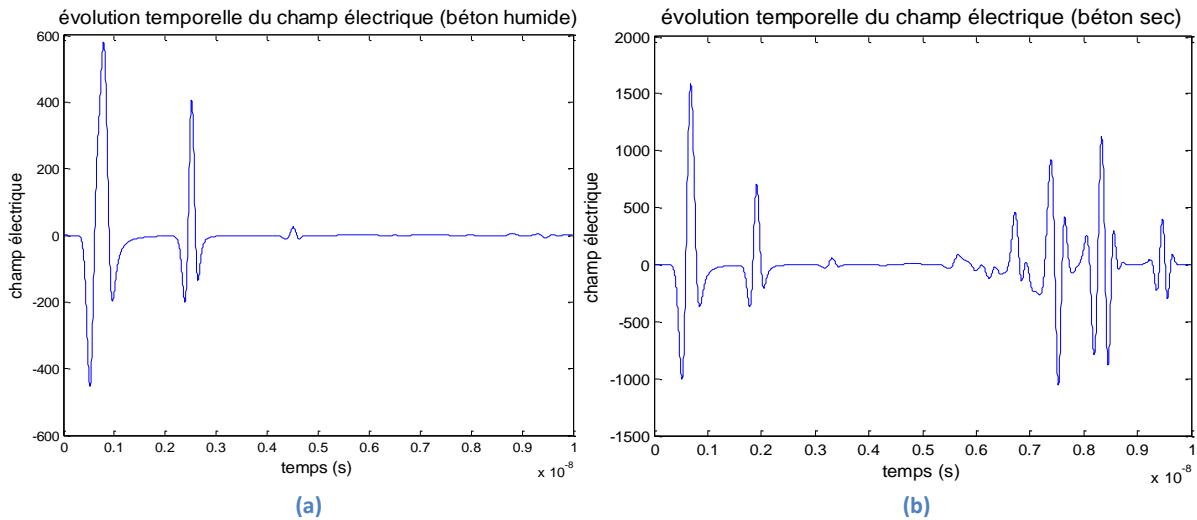


Figure 40: Comparaison de l'évolution temporelle du champ électrique entre une dalle sèche (a) et une dalle humide (b)

Le graphique de gauche (figure 40a) montre l'évolution du champ électrique au récepteur lorsque l'onde voyage dans une dalle humide. Le graphique de droite (figure 40b) est le graphique obtenu précédemment sur la dalle sèche. Au premier coup d'œil on voit directement que le signal est beaucoup plus atténué lorsqu'il doit traverser la dalle humide. Effectivement, on ne distingue plus aussi clairement les réflexions venant des bords latéraux. De plus l'amplitude du signal direct est beaucoup moins importante. Pour y voir plus clair dans l'analyse, il va falloir de nouveau soustraire à ces deux graphiques l'onde directe. Pour le graphique de gauche (figure 40a), il n'est pas possible d'utiliser l'onde directe calculée sur une dalle infinie sèche (figure 33b) mais nous devons utiliser une onde directe mesurée sur une dalle infinie humide :

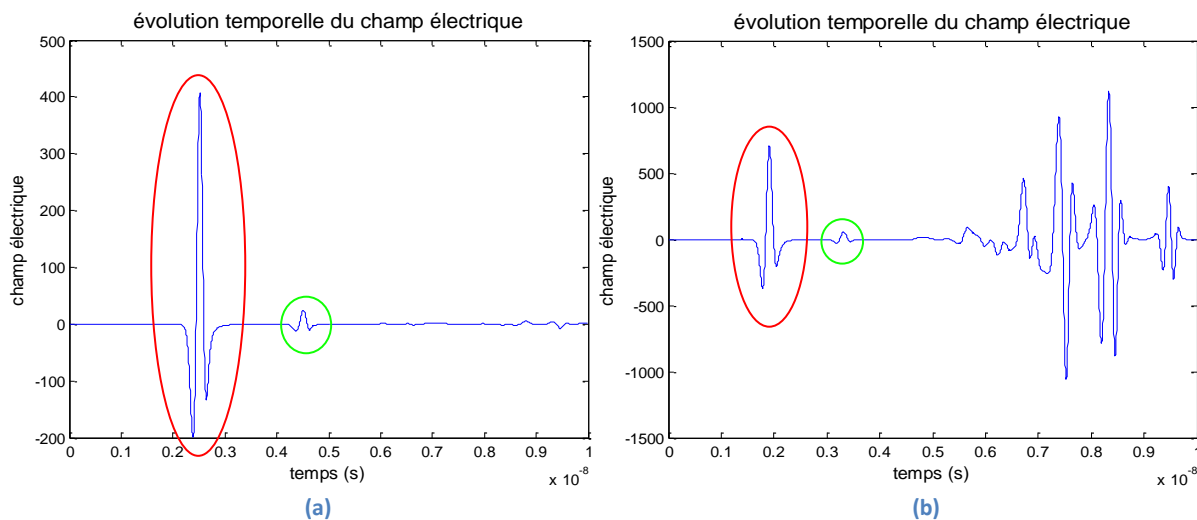


Figure 41 : Comparaison de l'évolution temporelle du champ électrique entre une dalle sèche et une dalle humide sans onde directe

Dans les deux configurations précédentes (figures 41a et 41b), on retrouve l'onde réfléchiée une première fois (entourée en rouge) et une seconde fois (entourée en vert) sur le bord inférieur de la dalle. Cependant, sur la figure 41a, on constate que ces réflexions apparaissent avec un peu plus de retard que dans la configuration d'une dalle sèche (figure 41b). Cela s'explique facilement par l'étude de la vitesse de propagation de l'onde. En effet, celle-ci est égale à :

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} = \begin{cases} = \frac{300 * 10^6}{\sqrt{4,5}} = 141 * \frac{10^6 m}{s} = 14,1 cm/ns \text{ (béton sec)} \\ = \frac{300 * 10^6}{\sqrt{9}} = 100 * \frac{10^6 m}{s} = 10 cm/ns \text{ (béton humide)} \end{cases} \quad (81)$$

On constate donc que le retard dans le signal provient du fait que la vitesse de propagation dans le béton humide est moins importante que dans le béton sec. En effet, la permittivité diélectrique du béton humide est plus importante. On constate aussi une certaine atténuation du signal qui est plus marquée dans la dalle humide. Cela est lié au fait que la conductivité électrique de ce béton est elle aussi plus importante.

Pour exprimer cette atténuation, on a pu voir dans le rappel théorique qu'on utilise un certain facteur d'atténuation  $\alpha$  dont la définition est la suivante (Annan A.P., 2005):

$$\alpha = \frac{\mu\sigma v}{2} = \frac{\sigma}{2} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0 \epsilon_r'}} \quad (82)$$

Le béton humide possède certes une vitesse de quelques pourcents moins grande que la vitesse du béton sec mais il se trouve que la conductivité du béton humide est plusieurs fois supérieure à la conductivité du même béton à l'état sec. Au final, en faisant la balance, le facteur d'atténuation est plus important dans le cas d'une dalle humide. On peut pour s'en convaincre mesurer ce facteur d'atténuation dans les deux cas (Annan A.P., 2005):

**Tableau 8: Comparaison des coefficients d'atténuation pour une dalle sèche et une dalle humide**

Type de béton	$\epsilon_r$ (permittivité relative)	$\mu$ (H/m) (perméabilité magnétique)	$\sigma$ (mS/m) (conductivité)	$v$ (m/ns) (vitesse)	$\alpha$ (dB/m) (facteur d'atténuation)
Béton humide	9	$4 * \pi * 10^{-7}$	0,08	0,1	0,0503
Béton sec	4,5	$4 * \pi * 10^{-7}$	0,005	0,14	0,0047

Si on regarde le tableau 8, on constate bien que l'atténuation doit être plus forte dans le cas d'une dalle humide puisqu'au final il existe un facteur 10 entre les deux coefficients.

## **8. Superposition de deux éléments à humidité différente**

Le sujet de ce travail porte sur la mise en évidence d'une zone humide en présence d'un gradient d'humidité. L'idée première consiste à utiliser deux dalles, une que l'on sature et qui reste tout au long des essais à saturation et une autre dans laquelle se réalise le gradient d'humidité. Cependant, pour la bonne réalisation de ce travail, il faut des dalles à un taux d'humidité uniforme. On a donc utilisé des dalles qui ont été réalisées en 2009 : dalles présentant malheureusement une face inférieure qui est loin d'être plane. En superposant simplement deux de ces dalles, on risquait de se

retrouver avec des vides d'air entre les deux, vides qui risquaient de venir perturber fortement le signal. Dès lors, une fine couche de mortier a été appliquée entre les deux. Vu que les caractéristiques du mortier se rapprochent très fortement de celles du béton humide, dans les modélisations qui vont suivre, cette couche sera ignorée et nous supposons un contact parfait entre les deux dalles.

Dans le cadre des essais, deux configurations sont testées. En effet, comme on le verra dans la partie expérimentale, deux dalles dans lesquelles des capteurs étudiant la formation du gradient ont été placés, sont disposées chacune sur une dalle à saturation. Une de ces dalles est à 100% HR (et donc le gradient se fait par le séchage via la face supérieure de celle-ci) et une autre est en équilibre à 60% HR. Pour cette dernière, le gradient se fait par remontée capillaire dans la partie inférieure de la dalle. Il est bon de noter que tout échange par les faces latérales est proscrit grâce à la pose d'une résine époxy sur chacune des quatre faces de chaque dalle.

### 8.1. Superposition de deux dalles à saturation

Dans ce qui suit, la fenêtre temporelle est réduite pour ne pas être perturbé par les réflexions des bords latéraux. A par ce petit changement, il s'agit d'un cas assez simple qui n'est rien d'autre que l'extension du cas précédent. En effet, il a fallu simplement doubler l'épaisseur de la dalle puisque nous avons fait l'hypothèse d'un contact parfait entre les dalles humides. Les caractéristiques de la modélisation sont reprises dans le tableau 9.

Tableau 9: Caractéristiques de la modélisation de l'onde sur deux dalles à saturation

$\Delta x = \Delta y = \Delta l$	1,25mm
$\Delta t$	$2,95 \cdot 10^{-12}$ secondes
Durée de l'étude	$6 \cdot 10^{-9}$ secondes
Nombre d'itérations	2036 itérations
Position de l'émetteur (x, y) en m	(0.48, 0.60125)
Position du récepteur (x, y) en m	(0.52, 0.60125)
Position de la dalle [coin inférieur gauche (x, y) ; coin supérieur droit (x, y)] en m	[(0.1, 0.4) ; (0.9, 0.6)]

Dans toutes les modélisations qui vont suivre, les paramètres définis au tableau 9 sont utilisés. Ils ne seront donc plus rappelés mais il est bon de garder ces quelques chiffres en tête. Après simulation, voici ce que l'on obtient :

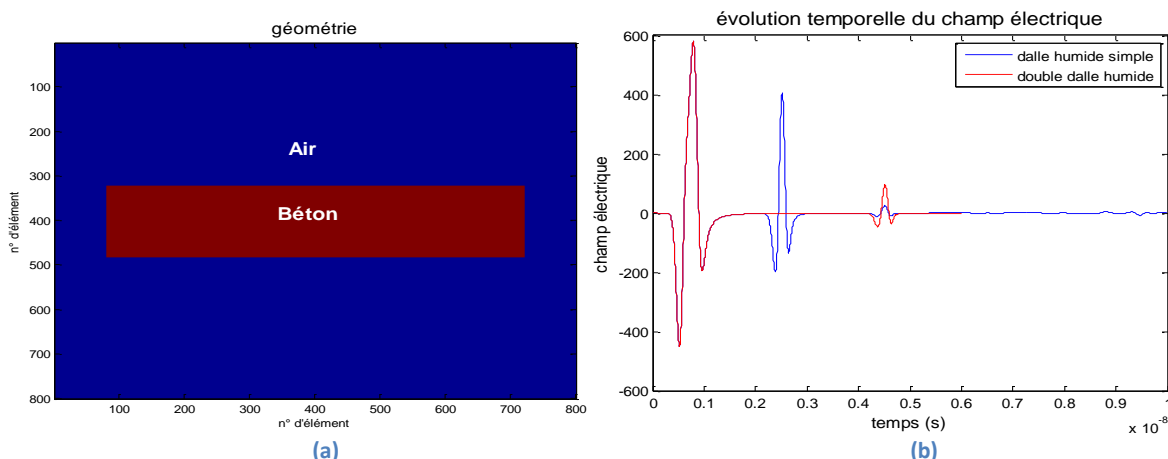


Figure 42: Géométrie (a) et évolution du champ électrique (b) dans le cas d'une superposition de deux dalles humides

En regardant la figure 42b, logiquement nous constatons que le temps nécessaire à la vision de la réflexion du signal sur la face inférieure a doublé par rapport au cas d'une dalle unique. L'amplitude de cette première réflexion est bien plus faible que l'amplitude de la première réflexion du cas précédent. Cela est dû tout simplement à l'atténuation (géométrique et intrinsèque) subie par l'onde qui doit parcourir une distance double de celle précédente.

## 8.2. Superposition d'une dalle sèche et humide

En gardant les mêmes paramètres de modélisation que dans le cas précédent, voici ce que l'on obtient après résolution du problème :

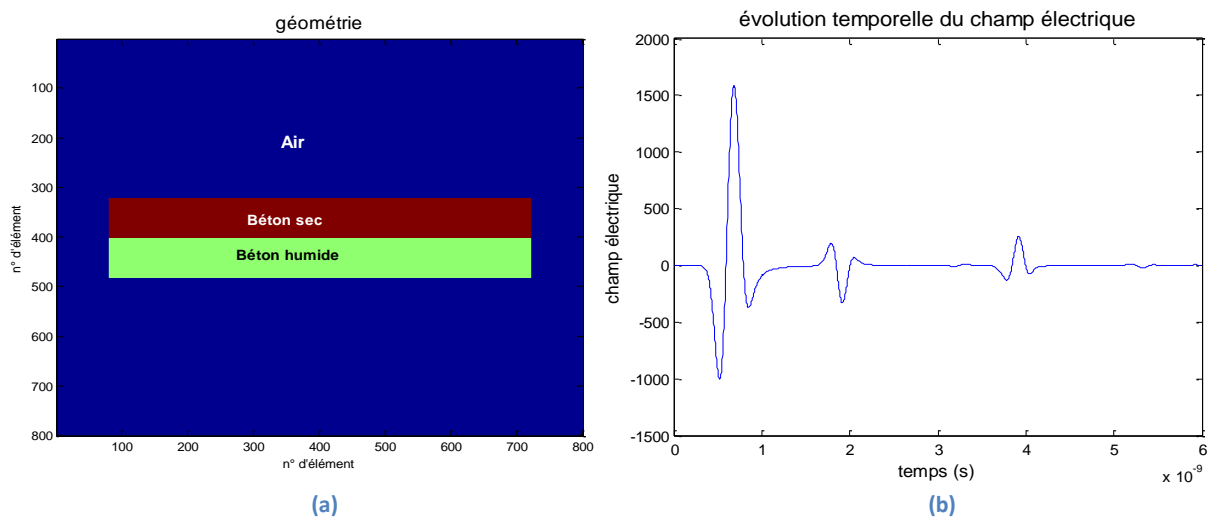


Figure 43: Géométrie (a) et évolution du champ électrique (b) dans le cas d'une superposition d'une dalle sèche sur une dalle humide

Afin de rendre la figure 43b donnant l'évolution du champ électrique perçu par le récepteur au cours du temps plus facilement lisible, nous pouvons venir soustraire l'onde directe mesurée sur une dalle sèche (figure 33b du chapitre 6). Après cette opération voici à quoi ressemble le signal :

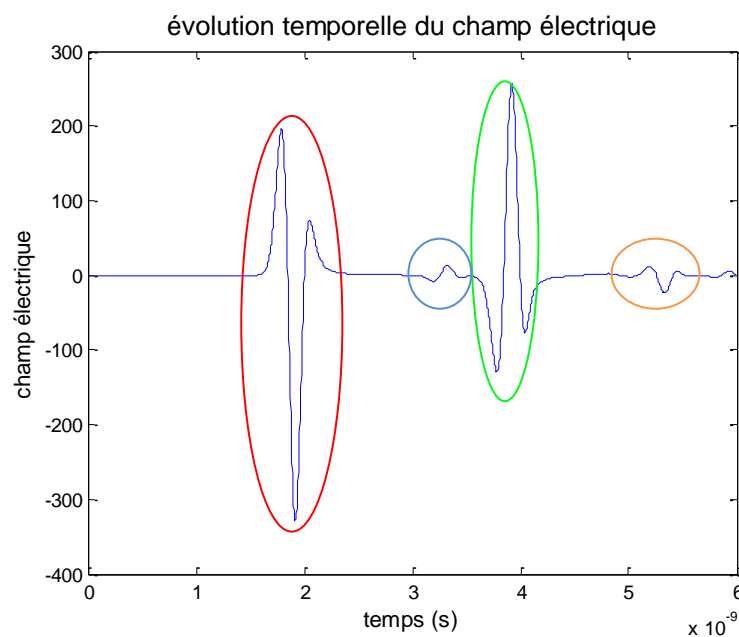


Figure 44: Evolution du champ électrique dans le cas d'une superposition d'une dalle sèche sur une dalle humide (sans onde directe)

Comme il est visible sur la figure 44, en retirant l'onde directe, on peut distinguer 4 pics dans le signal. Deux importants (en rouge et en vert) et deux autres moins marqués (en bleu et en orange). Le pic rouge correspond à une réflexion ayant lieu à l'interface entre la dalle sèche et humide. En effet, en regardant bien, le signal observé est inversé. Si on se souvient de la formule donnant le coefficient de réflexion (équation 36), celui-ci devient négatif si le signal est réfléchi à une interface entre un matériau 1 et un matériau 2 dont la permittivité diélectrique suit la règle :  $\epsilon_{r2} > \epsilon_{r1}$ . Effectivement, ici la permittivité diélectrique du béton humide est supérieure à la permittivité diélectrique du béton sec. Voilà pourquoi on observe cette inversion. Précédemment, nous n'avions jamais rencontré ce cas de figure puisque toutes les réflexions étudiées avaient eu lieu dans la configuration où le signal venait du béton et rencontrait de l'air. Chaque fois nous avons donc  $\epsilon_{r2} < \epsilon_{r1}$ . Les autres pics sont quant à eux plus difficiles à comprendre, pour mieux visualiser, comme dans le chapitre 6, il est possible de regarder la position des ondes à des pas de temps bien précis.

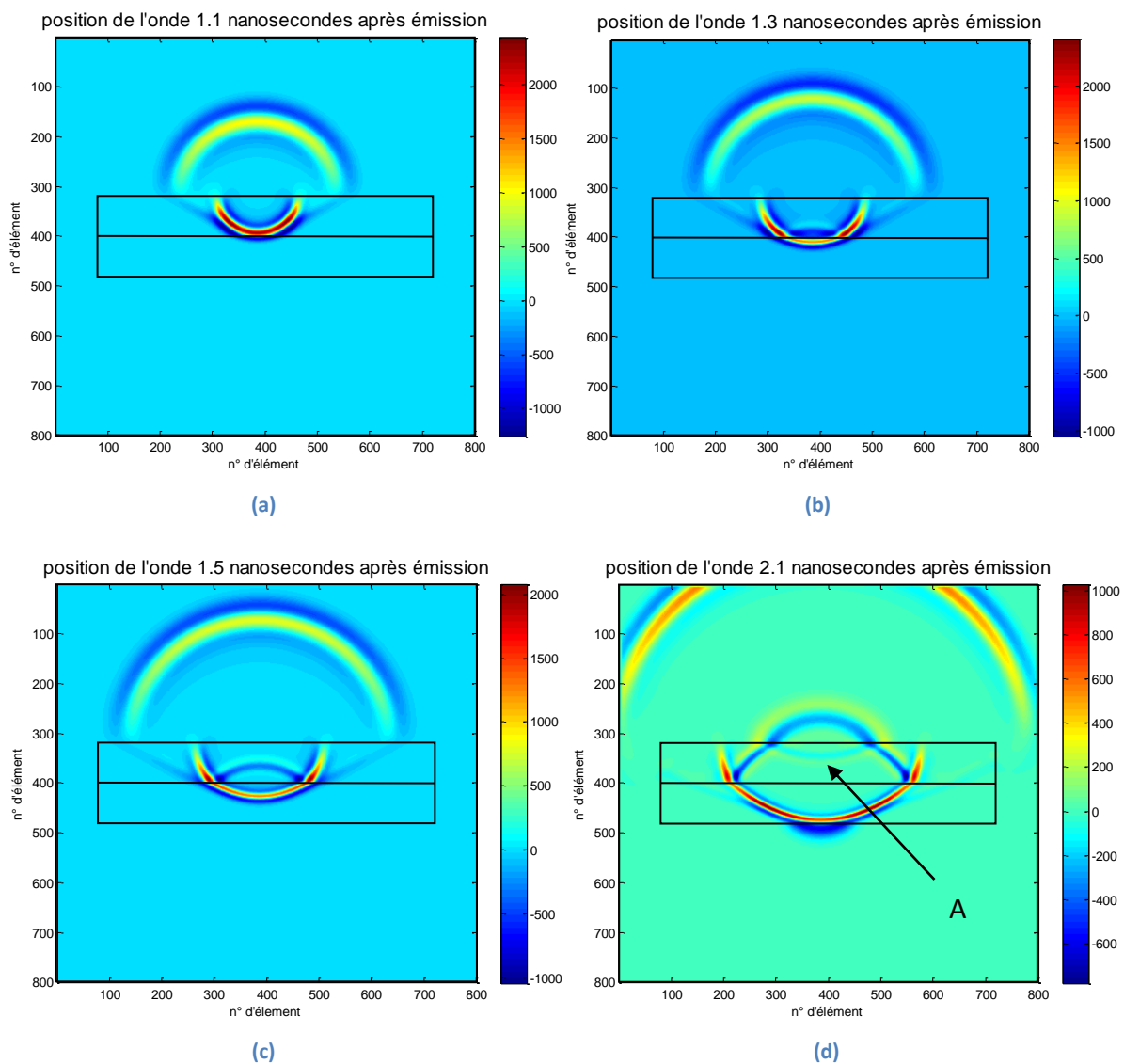


Figure 45: Evolution du champ électrique dans le cas d'une superposition d'une dalle sèche sur une dalle humide (de 1 à 2,1 nanosecondes)

Ces quatre premiers graphiques (figures 45a, 45b, 45c, 45d) confirment l'hypothèse précédemment posée. En effet, à la 2<sup>ème</sup> nanoseconde l'onde réfléchi à l'interface entre les deux

bétons a atteint le récepteur. Cette réflexion est clairement visible sur les graphiques 45b et 45c. Plus ou moins au même moment (2,1 nanosecondes), une onde se réfléchit sur la partie inférieure de la dalle humide à la jonction entre celle-ci et l'air (figure 45d). Dans la première dalle, l'onde réfléchi précédemment par l'interface béton humide et béton sec s'est de nouveau réfléchi à l'interface béton sec et air (partie supérieure de la dalle) et repart dans le sens opposé avec une amplitude très réduite (onde A). Voyons ce qui se passe ensuite :

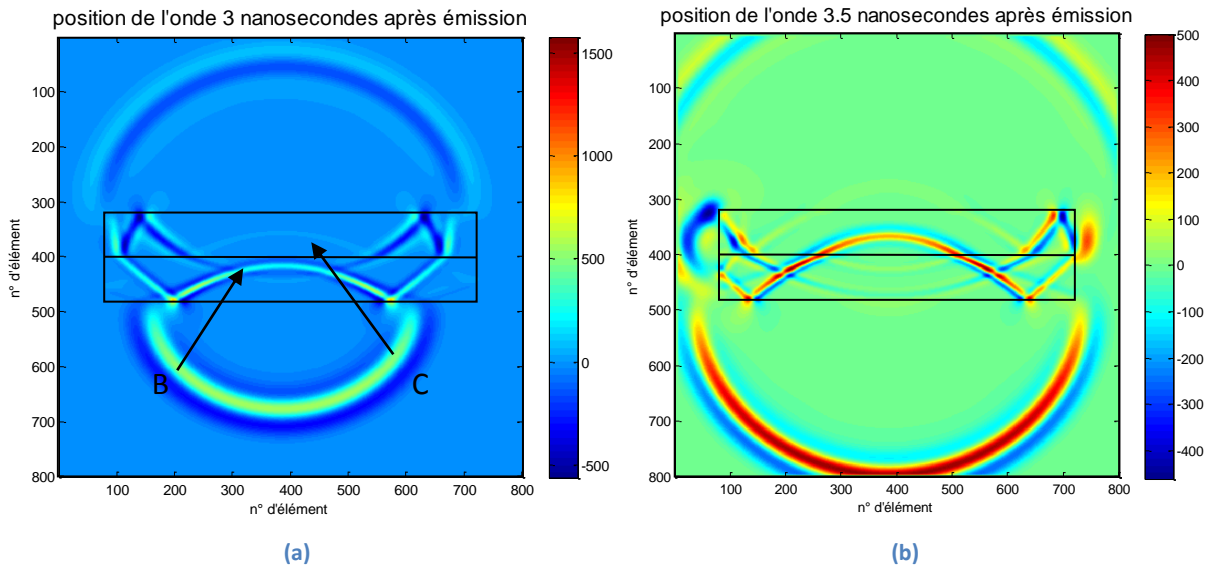


Figure 46: Evolution du champ électrique dans le cas d'une superposition d'une dalle sèche sur une dalle humide (de 3 (a) à 3,5 nanosecondes(b))

Sur la figure 46a, on peut observer l'onde ayant subi une réflexion sur la face inférieure de la dalle. On constate que celle-ci remonte progressivement dans le béton humide (onde B). Entre temps on constate que l'onde A a de nouveau subi une réflexion sur l'interface entre la dalle humide et sèche et remonte progressivement vers le récepteur avec une amplitude très faible. Le deuxième pic de la figure 44 (pic entouré en bleu) correspond donc à ce signal C. La figure 46b montre l'origine du pic vert qui n'est rien d'autre que le reste de l'onde qui partant de l'émetteur, a traversé la dalle sèche puis la dalle humide. Ensuite cette onde a subi une réflexion à l'interface dalle humide-air (surface inférieure de la dalle) pour tout doucement remonter dans la dalle humide, traverser celle-ci ainsi que l'interface dalle sèche-dalle humide pour enfin traverser la dalle sèche et atteindre le récepteur. Il s'agit bien entendu de l'onde B. On pourrait se demander pourquoi l'onde venant du béton humide possède toujours une amplitude élevée alors que l'onde C, qui n'est restée que dans du béton sec possédant un coefficient d'atténuation plus faible, a une amplitude si faible. Il faut chercher l'origine de cette différence dans les coefficients de réflexion. Effectivement, on peut noter que la réflexion à l'interface béton sec-béton humide n'est pas très importante puisque en supposant un signal perpendiculaire à l'interface ( $\theta = 0^\circ$ ), le coefficient de réflexion est de (Van der Wielen A., 2011):

$$R = \frac{\cos \theta_1 - \sqrt{\frac{\epsilon_{r2}}{\epsilon_{r1}} - \sin^2 \theta_1}}{\cos \theta_1 + \sqrt{\frac{\epsilon_{r2}}{\epsilon_{r1}} - \sin^2 \theta_1}} = \frac{1 - \sqrt{\frac{9}{4,5}}}{1 + \sqrt{\frac{9}{4,5}}} = -0.171 \quad (83)$$

Si on compare celui-ci au coefficient de réflexion dalle humide-air (équation 84) :

$$R = \frac{\cos \theta_1 - \sqrt{\frac{\epsilon_{r2}}{\epsilon_{r1}} - \sin^2 \theta_1}}{\cos \theta_1 + \sqrt{\frac{\epsilon_{r2}}{\epsilon_{r1}} - \sin^2 \theta_1}} = \frac{1 - \sqrt{\frac{1}{9}}}{1 + \sqrt{\frac{1}{9}}} = 0.5 \quad (84)$$

on constate une différence assez nette. On remarque bien aussi le signe négatif du premier coefficient ce qui signifie que l'onde réfléchiée est en opposition de phase avec l'onde incidente (cf. le pic entouré en rouge sur la figure 44 qui est inversé vis-à-vis de l'onde directe de la figure 43b). En s'intéressant juste à la différence de valeurs entre ces coefficients, il est possible de comprendre en partie pourquoi le signal C qui donne le pic bleu est si faible vis-à-vis du signal B qui donne le pic vert. En effet, en regardant juste le nombre d'interfaces rencontrées, les deux signaux ont rencontré chacun trois interfaces. Le signal B a rencontré 2 fois l'interface béton sec -béton humide, surface qu'il a traversée deux fois. Enfin, il a aussi rencontré une fois l'interface béton humide - air. En multipliant tous les coefficients de réflexion ou de transmission rencontrés, on arrive à :

$$\text{amplitude } B = I * (1 - 0.171) * 0.5 * (1 - 0.171) = 0.343 I \quad (85)$$

Avec  $I$  = amplitude du signal initial. Pour rappel ici l'influence de l'atténuation subie par le signal lorsqu'il traverse le matériau est négligée. Pour le signal C, celui-ci a rencontré une fois l'interface béton sec -air dont le coefficient de réflexion vaut :

$$R = \frac{\cos \theta_1 - \sqrt{\frac{\epsilon_{r2}}{\epsilon_{r1}} - \sin^2 \theta_1}}{\cos \theta_1 + \sqrt{\frac{\epsilon_{r2}}{\epsilon_{r1}} - \sin^2 \theta_1}} = \frac{1 - \sqrt{\frac{1}{4,5}}}{1 + \sqrt{\frac{1}{4,5}}} = 0.359 \quad (86)$$

De plus, il a aussi rencontré deux fois l'interface béton humide - béton sec. Chaque fois il a subi une réflexion. Dès lors en multipliant tous les coefficients, on obtient :

$$\text{amplitude } C = I (-0.171) * 0.359 * (-0.171) = 0.0105 I \quad (87)$$

Voilà donc l'origine de cette différence d'amplitude entre les deux signaux. Malgré le fait que le signal traversant le béton humide est plus atténué par le matériau, ce signal a quand même perdu beaucoup moins d'énergie dans les diverses réflexions et donc au final il arrive avec beaucoup plus d'énergie au récepteur.

Sur la figure 44, il reste encore l'origine du signal orange à rechercher. En continuant d'analyser la position des diverses ondes au cours du temps, on obtient :

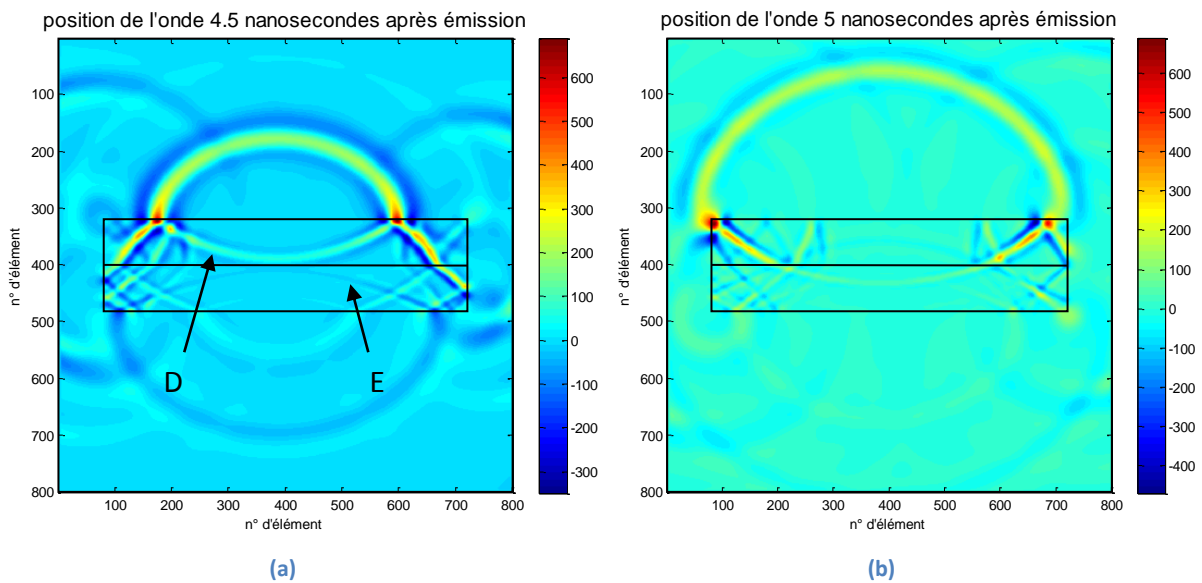


Figure 47 : Evolution du champ électrique dans le cas d'une superposition d'une dalle sèche sur une dalle humide (de 4,5 (a) à 5 nanosecondes (b))

Pour le pic entouré en orange, cela devient difficile d'en déduire graphiquement l'origine. Il s'agit soit de la réflexion de l'onde D (figure 47a) soit il s'agit du reste de l'onde E qui subsiste après transmission à l'interface béton sec et béton humide. Cependant vu que le signe est inversé par rapport à l'onde initiale, il ne peut s'agir que de la réflexion de l'onde D. En effet, toute onde venant de la partie inférieure de la dalle ne peut jamais être inversée. Contrairement aux ondes qui subissent une réflexion à cette interface.

## 9. Introduction progressive d'un gradient d'humidité

Dans la réalité, il arrive souvent que les interfaces entre les matériaux ne soient pas nettes. Dès lors, dans ces deux premiers chapitres, nous introduirons des couches présentant des propriétés qui évoluent de manière progressive entre les deux cas limites (dalle sèche, dalle humide). Dans un premier temps, nous supposons donc une zone de transition d'épaisseur fixe, mais le nombre de couches la constituant variera. Au fur et à mesure, ce nombre de couches sera augmenté jusqu'à obtention de la représentation d'un gradient. Vu que dans la partie expérimentale la position de ce gradient variera, il en sera fait de même ici. En effet, pour rappel, nous disposons de deux dalles dans lesquelles des capteurs étudiant la formation du gradient sont placés. Une de ces dalles est à 100% HR et une autre est en équilibre à 60% HR. Dans la première, le gradient s'établit par séchage dans la partie supérieure de la dalle. Dans la seconde, le gradient se fait par remontée capillaire dans la partie inférieure de la dalle après être venu la poser sur la dalle saturée. Ces deux cas seront étudiés séparément.

Dans un second temps, il faudra tenir compte de la dynamique du système. En effet, nous partons dans nos essais d'une interface franche et progressivement une zone de transition s'établit. Cette zone est initialement peu épaisse mais son épaisseur va s'accroître au cours du temps. L'impact de cette évolution sur la détection de la zone humide sera visualisé dans le chapitre 9.3 : « étude de l'influence de l'épaisseur du gradient ».

Le chapitre 9.4 étudiera quant à lui l'influence de la forme du gradient tandis que le l'avant dernier chapitre essaiera d'isoler la dynamique de celui-ci en jouant sur son épaisseur mais en

gardant une humidité moyenne constante dans la dalle. Le dernier chapitre de ce point 9 : « introduction progressive d'un gradient d'humidité » sera en quelque sorte un petit résumé des observations réalisées, résumé présenté sous forme numérique.

### 9.1. Etude du gradient se formant à la surface supérieur du béton.

Dans ce cas-ci, le gradient ne peut se faire que sur la partie supérieure puisque, comme on le verra dans la partie expérimentale, la dalle inférieure est immergée dans de l'eau afin de s'assurer qu'elle reste à saturation. Avant de réaliser un gradient, il faut regarder un peu la forme qu'il devrait avoir. En reprenant la figure 16 des rappels théoriques, figure qui montrait une représentation schématique du taux d'humidité interne d'une dalle dont le séchage se réalise exclusivement par la surface supérieure, il est déjà possible d'avoir une idée de celui-ci :

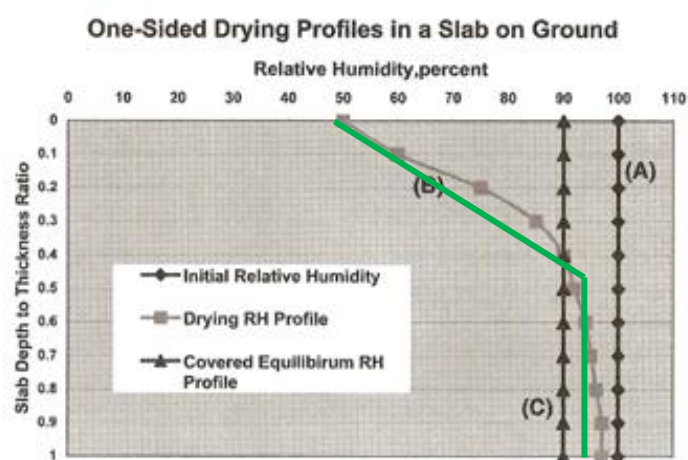


Figure 48: Profil de séchage d'une dalle (modifié d'après Harrison P.J., 2006)

On remarque l'allure non linéaire de cette courbe d'humidité relative en fonction de la profondeur qui, de plus, dépend de nombreux facteurs. Pour approcher cette courbe, il faut dans un premier temps modéliser un système bi-linéaire, représenté par la droite en vert dessinée sur la figure 48. Plus loin, dans le chapitre 9.4, l'influence de cette approximation sera analysée. En effet, pour un des deux cas, on comparera les résultats obtenus en utilisant des propriétés qui évoluent de manière linéaire et les résultats obtenus en utilisant une évolution plus réaliste de l'humidité et donc des propriétés.

En revenant à l'approximation, la teneur en eau évolue donc linéairement jusqu'à la moitié de la dalle, à partir de laquelle nous supposons un béton totalement humide. L'évolution des propriétés dans ces deux premiers paragraphes se fera donc sur une épaisseur de 5 cm. Pour des raisons numériques, ce gradient va être approximé par une évolution en marches d'escalier, qui seront progressivement affinées dans le courant du chapitre.

Pour éviter de mettre chaque fois un tableau avec toutes les caractéristiques des matériaux, si cela est possible, elles seront mises directement sur le graphique nous montrant la géométrie du problème. Lorsque les couches deviendront trop nombreuses, il deviendra impossible de les noter toutes. Cependant, il est très facile de les retrouver vu qu'il s'agit d'une interpolation linéaire entre le béton sec et le béton humide dont les propriétés ont maintes fois déjà été citées dans cette seconde partie.

Dans un premier temps, nous considérons un gradient très brusque, passant en une fois du béton sec au béton humide (figure 49a):

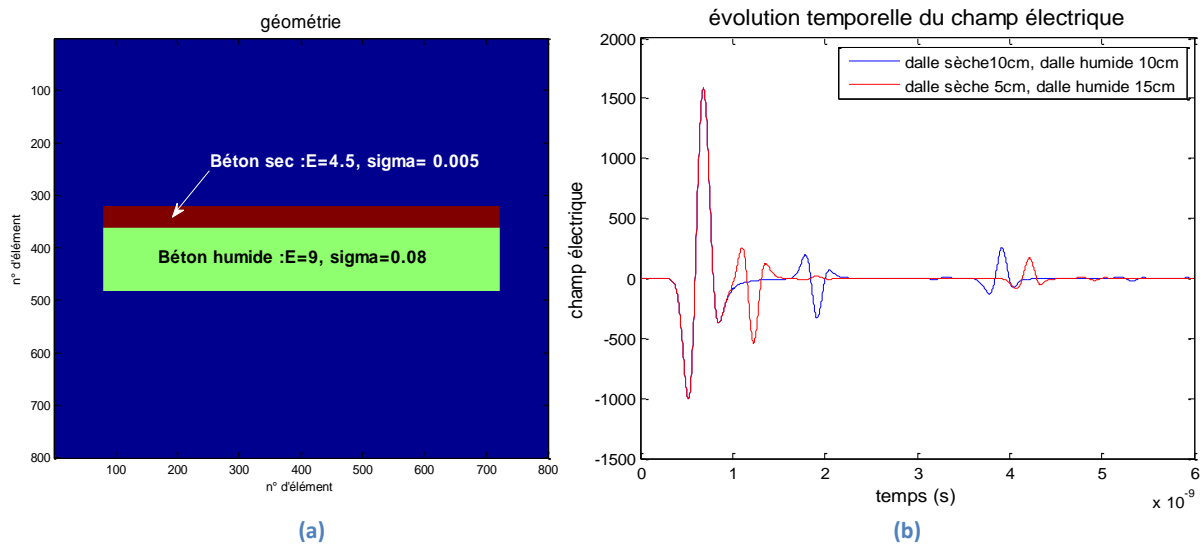


Figure 49: Géométrie (a) et comparaison de l'évolution du champ électrique en fonction de la profondeur de la zone humide (b)

Ce cas se rapproche très fort de l'étude du point 8.2 qui étudie la superposition d'une dalle sèche et d'une dalle humide. Dès lors, il est intéressant de les mettre en vis-à-vis sur la figure 49b. Sur celle-ci, l'onde directe a chaque fois été laissée et on constate qu'elles sont identiques. Comme attendu on constate que la réflexion à l'interface des deux couches arrive beaucoup plus vite dans cette seconde configuration puisque l'interface est située plus haut dans la dalle. Le chemin parcouru par l'onde avant de la rencontrer est donc nettement plus faible. De plus, vu que le signal a parcouru moins de distance, il revient aussi avec une amplitude plus grande que dans le cas précédent. On retrouve aussi le pic correspondant à la réflexion de l'onde sur l'interface inférieure de la dalle. Cependant on constate que celui-ci revient avec du retard puisque l'onde parcourt une plus grande distance dans le béton humide où la vitesse y est moins grande et l'atténuation plus forte. C'est ce qui explique pourquoi l'onde revient en retard et avec une amplitude plus faible. Voyons maintenant ce qui se passe si on augmente le nombre de couches constituant ce gradient:

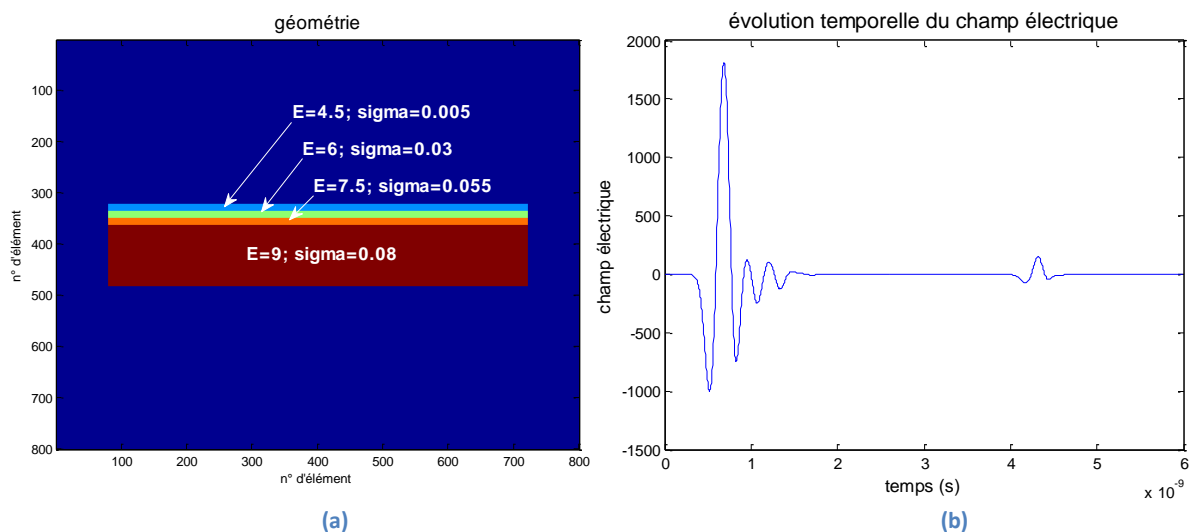


Figure 50: Géométrie (a) et évolution du champ électrique (b) en présence d'un gradient constitué de 3 couches

Grâce à la représentation géométrique (figure 50a), il est possible de voir que la dalle est discrétisée en 4 couches, dont trois formant le gradient. Les propriétés de celles-ci évoluent de manière linéaire pour respecter l'approximation réalisée plus haut. Sur la figure de droite (figure 50b) montrant l'évolution du signal au cours du temps, on constate au début tout un ensemble de pics qui correspondent vraisemblablement à l'ensemble des réflexions se réalisant à l'interface entre le changement de couches. Vu que les couches apparaissent sur la partie supérieure de la dalle, les signaux réfléchis risquent de se confondre avec le signal direct. Afin de clarifier les choses, nous allons venir soustraire l'onde directe mesurée sur une dalle sèche de dimension infinie. Attention, il faut garder en tête qu'il y a de grandes chances pour que l'onde directe soit déjà influencée par la présence de l'humidité près de la surface. Cependant, la soustraction de l'onde directe d'une dalle sèche qui est l'onde possédant la forme la plus proche disponible rend quand même la figure plus lisible :

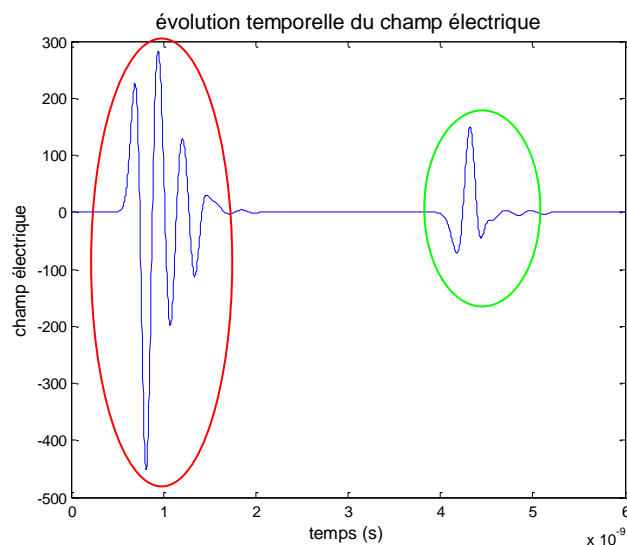
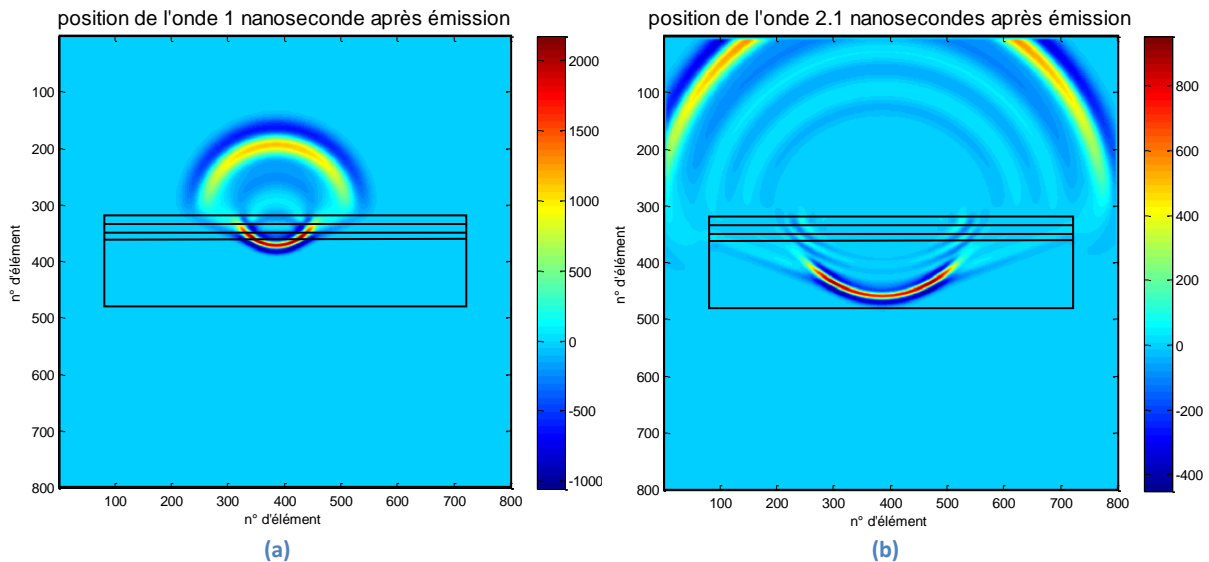


Figure 51: Evolution du champ électrique en présence d'un gradient constitué de 3 couches (sans onde directe)

Sur la figure 51, on constate donc bien un ensemble de réflexions concentrées sur les deux premières nanosecondes (entourées en rouge), ensuite une zone de calme et enfin une dernière réflexion qui correspond à la réflexion de l'onde sur le bord inférieur de la dalle (entourée en vert). Pour s'en convaincre, voici quelques images de la position de l'onde au cours du temps :



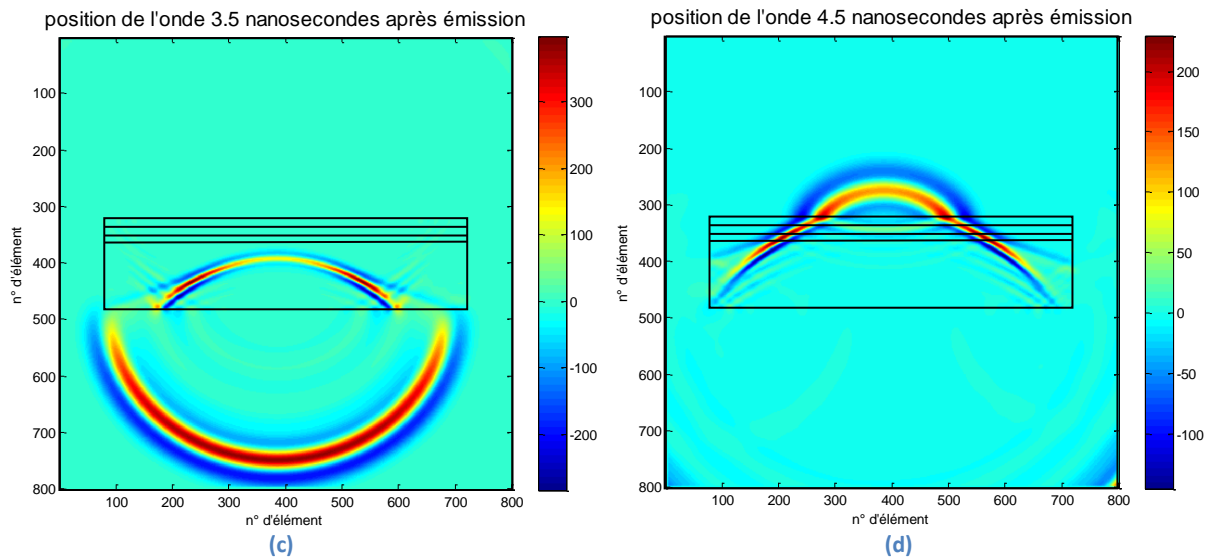


Figure 52 : Evolution du champ électrique en présence d'un gradient constitué par 3 couches (de 1 à 4,5 nanosecondes)

Les figures 52a, 52b, 52c et 52d corroborent les affirmations précédentes. Initialement de multiples réflexions se font, ensuite, quand l'énergie de ces signaux réfléchis devient trop faible pour être vue, on arrive à la zone de calme. Celle-ci perdure jusqu'à ce que l'onde réfléchi sur le bord inférieure revienne.

Regardons maintenant ce qui se passe si nous réalisons un gradient le plus fin possible. Nous devrions modifier les propriétés du béton sur les 40 premières cellules. En effet, il y en a 40 de disponibles puisque nous supposons dans un premier temps que le gradient se fait sur 5 cm de dalle et que le pas de discrétisation spatial est de 1,25 mm. Cependant, le programme limite à 38 le nombre d'objets différents qu'il est possible d'introduire dans le domaine. Dès lors, ci-dessous, le gradient n'est réalisé que sur 38 cellules. De nouveau, nous utilisons une interpolation linéaire pour déterminer les propriétés des différentes couches. Voici ce que nous obtenons :

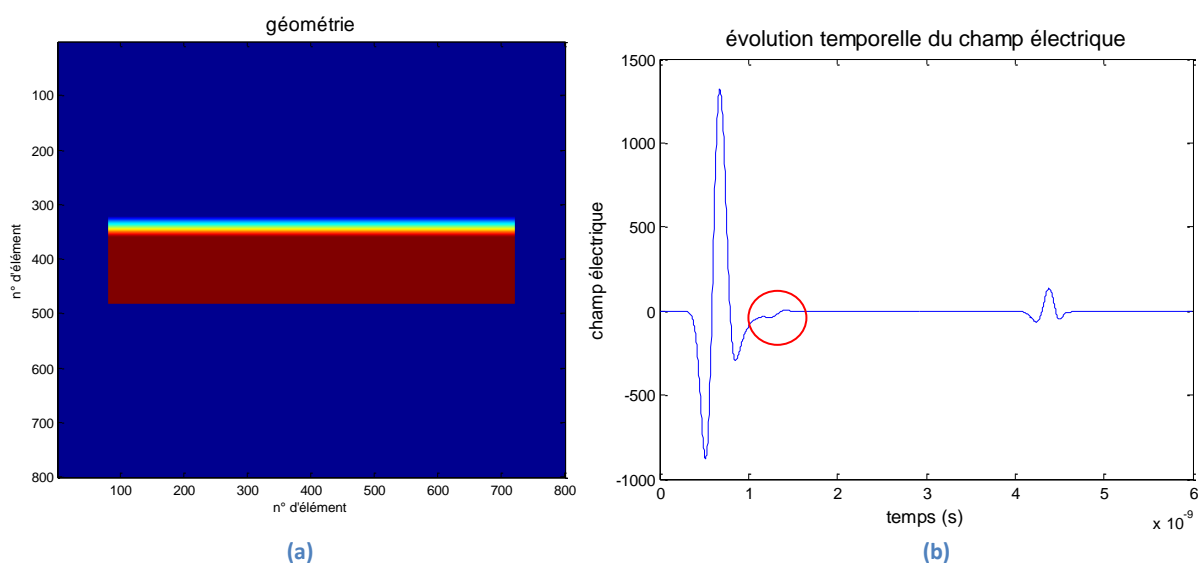


Figure 53: Géométrie (a) et évolution du champ électrique (b) en présence d'un gradient constitué de 40 couches

En regardant la figure 53b, on constate que le signal se simplifie fortement. On pourrait même penser qu'il n'existe pas du tout de variation de propriétés au sein du milieu. Le seul élément qui

peut nous mettre la puce à l'oreille est la petite perturbation entourée en rouge. Cependant il est difficile d'interpréter cette zone. Est-ce une trace d'éventuelles réflexions dues à la présence réelle du gradient ou est-ce des réflexions dues à l'approximation du gradient en marche d'escalier ? Nous reviendrons sur cette question dans le chapitre 9.3 qui porte sur l'étude de l'influence de l'épaisseur du gradient.

Comparons maintenant ce graphique à celui obtenu pour une dalle totalement sèche ou totalement humide. Il est bon de noter que le cas où on superpose deux dalles sèches n'a pas été étudié en détails. En effet, vu qu'il est très similaire à son homologue « superposition de deux dalles humides », il n'y aura pas de chapitre là-dessus. Dès lors, ci-dessous, on ne reprend que les résultats de l'évolution temporelle du champ électrique obtenu après une simulation similaire à celle du chapitre 8.1 qui concernait la superposition de deux dalles à saturation. En combinant les trois signaux, on obtient le graphique de la figure 54.

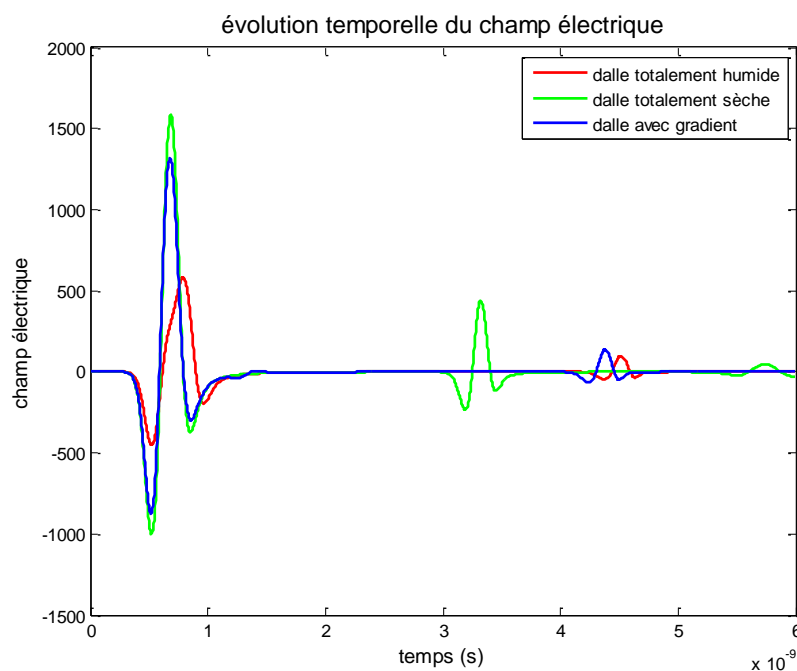


Figure 54 : Comparaison de l'évolution temporelle du champ électrique entre une dalle totalement sèche, totalement humide et une possédant un gradient

Si la géométrie et plus particulièrement l'épaisseur de la dalle est connue avec précision, grâce à la comparaison des signaux, on se rend compte qu'il devient possible de s'imaginer la présence de ce gradient. En effet, si des tests de teneur en eau et d'analyse de propriétés sont faits uniquement en surface, l'expérimentateur pourra rapidement se rendre compte que le signal qu'il mesurera ne correspondra pas à la modélisation qu'il pourrait faire en supposant la dalle totalement sèche. En effet, il trouvera certes une onde directe qui est proche de celle qu'il doit obtenir comme c'est le cas ici sur la figure 54 puisque l'onde directe de la courbe bleue colle assez bien à celle de la verte, même si l'amplitude est légèrement moindre. Mais par contre, il obtiendra une onde réfléchie venant d'un objet ou bien du fond de la dalle qui arrive avec pas mal de retard par rapport à la théorie. S'il connaît l'enfoncement de cet objet, il pourra facilement en déduire une vitesse et de celle-ci il en déduira une permittivité par la formule suivante (Annan A.P., 2005):

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (88)$$

Donc s'il fait cette analyse, il verra que la permittivité mesurée en surface (par estimation du coefficient de réflexion) est différente de celle en profondeur. Il pourra donc en toute logique en déduire la présence du gradient et d'une zone humide sous la surface sèche. Effectivement, en comparant la réflexion seule, on voit que les propriétés moyennes du béton se rapprochent beaucoup plus de la dalle humide puisque les pics correspondants à la réflexion du fond de la dalle arrivent presque en même temps. Il pourra donc même en déduire que cette zone est importante.

Dans l'hypothèse où l'épaisseur de la dalle est connue, il est possible d'affirmer par cette modélisation que la mise en évidence d'une zone humide sous un gradient est possible et ce même si on ne voit pas de réflexions nettes dues à une interface franche entre la zone humide et sèche. Cette détection est possible grâce à l'existence d'une incohérence. En effet, ici (figure 54) on constate que même si la surface est sèche, il y a quelque chose qui ne colle pas dans la vitesse de propagation du signal et même dans l'atténuation de celui-ci puisque le signal réfléchi possède une amplitude beaucoup plus faible que le signal qui serait attendu dans une dalle totalement sèche. Cependant, ici il est assez facile de mettre en évidence cette incohérence puisque la proportion de dalle humide était importante (plus du  $\frac{3}{4}$  de l'épaisseur de la dalle). De plus nous sommes dans un problème numérique simple où la géométrie est connue. Il est clair que dans la pratique la détection de cette incohérence est très difficile puisque le signal est beaucoup plus complexe et il n'est peut-être pas possible de connaître toujours l'épaisseur des éléments avec précision. Regardons si nous arrivons toujours à mettre en évidence cette incohérence dans la configuration suivante :

## 9.2. Etude du gradient se formant à l'interface entre une dalle sèche et humide.

La forme du gradient qui est retenue ici est une approximation similaire au cas précédent. Comme il a déjà été dit, dans le chapitre 9.4 : « influence de la forme du gradient », l'influence de cette approximation sera étudiée. Il est bon de noter qu'ici le gradient n'est plus dû à un séchage mais bien à une remontée capillaire. Sur la première moitié de la dalle nous supposons l'humidité constante et sèche. Ensuite sur la moitié inférieure de la première dalle nous réalisons une évolution linéaire des propriétés entre un état de saturation (correspondant à la dénomination précédente dalle humide) et un état sec (dalle sèche).

La figure 55 représente l'évolution de la permittivité au sein de la dalle selon l'approximation considérée:

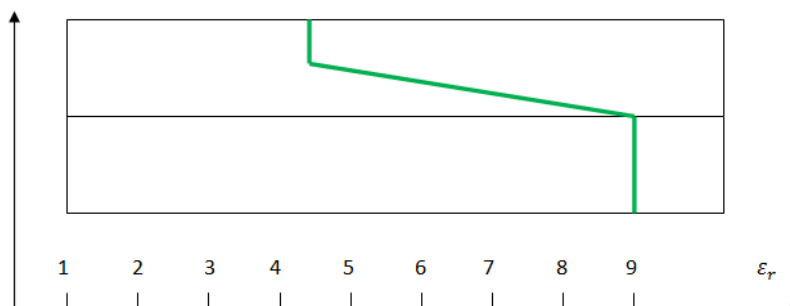


Figure 55: Approximation de l'évolution de la permittivité au sein de la dalle

De nouveau il est impossible de modéliser exactement ce profil dans le programme GprMax.

Nous l'avons donc approximé en marches d'escalier. La première approximation possible et brutale consiste à remplacer l'évolution linéaire par une interface nette entre le béton sec et humide. L'étude de la configuration de l'interface nette au centre de la première dalle a déjà été réalisée précédemment, de même que celle où on superpose une dalle sèche et une dalle humide. Il est bon de remarquer que ce dernier cas est la situation réelle de départ d'une partie des tests vu qu'une dalle sèche est mise en contact avec une dalle humide. Pour rappel, dans la simulation, on avait clairement pu mettre en évidence l'interface et la différence de propriétés entre les deux zones. Nous allons essayer de voir si c'est toujours le cas en présence d'un gradient. En passant comme précédemment par une étape intermédiaire de 3 couches (figure 56a), voici ce que l'on obtient :

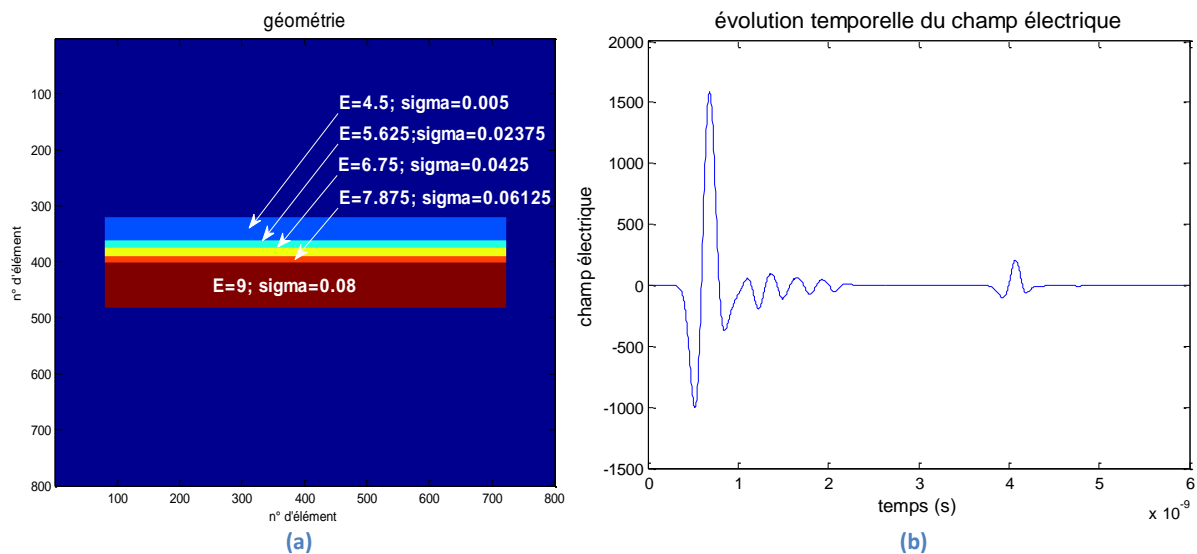


Figure 56: Géométrie (a) et évolution du champ électrique (b) en présence d'un gradient constitué de 3 couches

Sur la figure 56b, il est facilement possible de voir les diverses réflexions dues aux interfaces. On les voit même mieux que dans le chapitre précédent vu que celles-ci s'éloignent de l'onde directe. Il est donc plus facile de les analyser. D'un côté pratique il est quand même intéressant de venir enlever cette onde directe pour mieux se rendre compte de l'amplitude des réflexions :

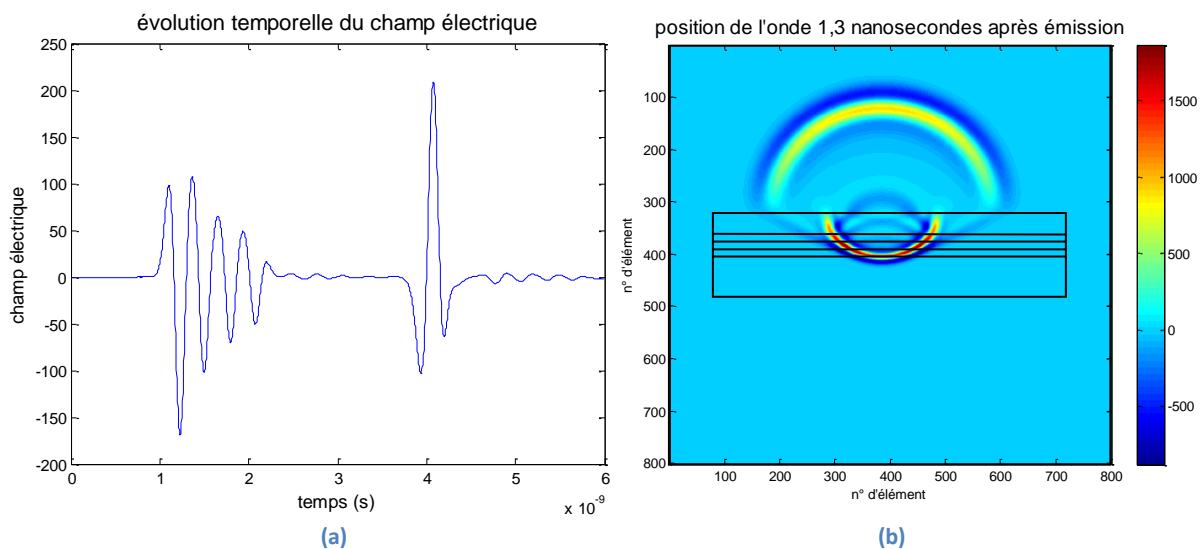


Figure 57: Evolution temporelle du champ électrique (sans onde directe) (a) et position de l'onde à 1,3 nanosecondes (b)

Les quatre réflexions venant des frontières entre les matériaux présentant des propriétés

différentes apparaissent encore plus nettement sur la figure 57a. Il est logique de constater que ces ondes ont des amplitudes décroissantes vu qu'à chaque réflexion, le signal perd un peu de puissance. La seconde figure (figure 57b) est juste là pour confirmer l'hypothèse sur l'origine de ces quatre variations d'amplitude du champ électrique. Maintenant poussons à l'extrême le gradient. Celui-ci sera constitué de 38 couches, chaque couche étant égale à une cellule.

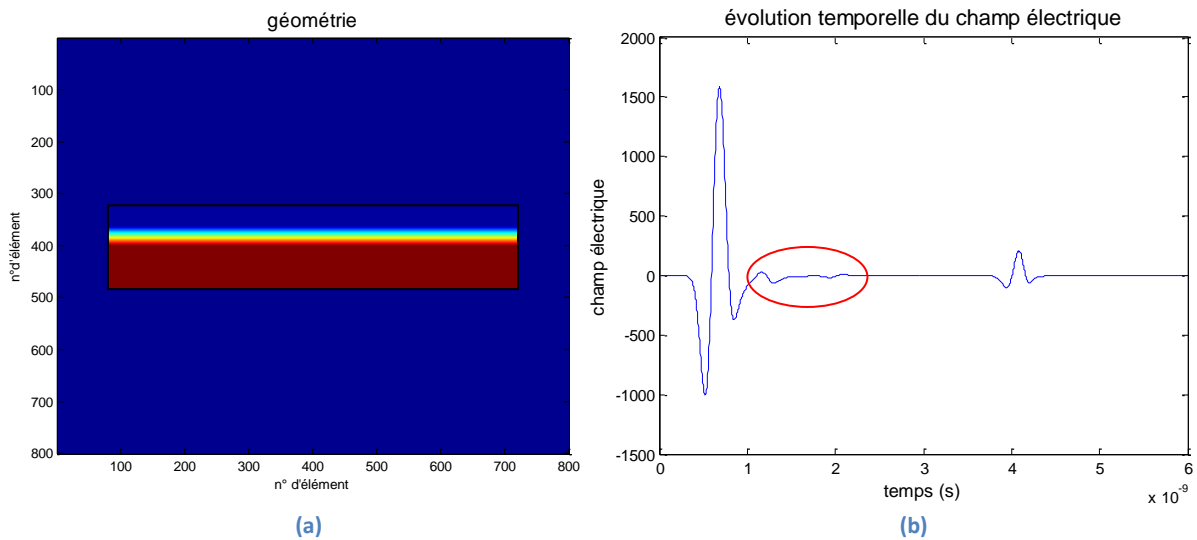


Figure 58: Géométrie (a) et évolution du champ électrique (b) en présence d'un gradient constitué de 40 couches

La première constatation à faire sur la figure 58b est similaire à celle du cas précédent (figure 53b) : plus le gradient devient finement discrétisé, plus il devient difficile de détecter la zone humide. En effet, hormis une petite zone où on constate de légères perturbations (zone entourée en rouge), on pourrait croire que nous sommes en présence d'un signal très simple voyageant dans une dalle dans laquelle les propriétés sont uniformes. Cependant, il est possible de réaliser le même exercice que tout à l'heure en comparant les signaux avec les cas simples en question :

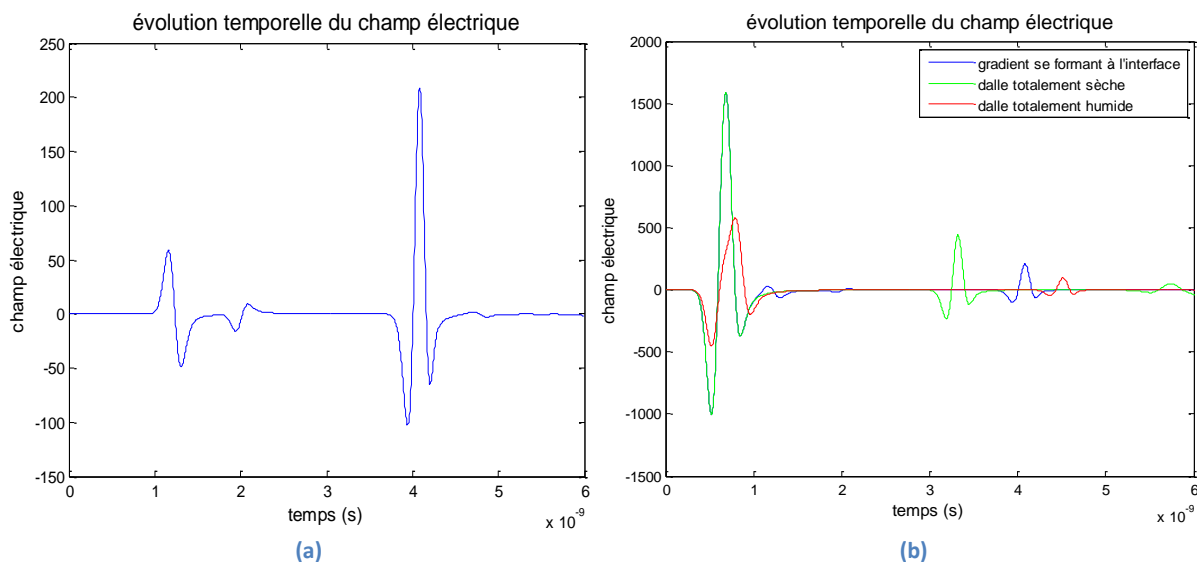


Figure 59: Evolution temporelle du champ électrique (sans onde directe) (a) et comparaison entre l'évolution temporelle du champ électrique pour une dalle totalement sèche, totalement humide et pour une possédant un gradient (b)

En regardant le graphique de gauche (figure 59a), qui n'est rien d'autre que le graphique de la figure 58 auquel on est venu soustraire l'onde directe, on constate quand même qu'il reste des traces du gradient puisqu'il reste des petites perturbations. Comme précédemment, il est difficile de

dire s'il s'agit vraiment d'un impact du gradient ou si ces perturbations sont d'origine numérique. En effet, cette question a du sens puisqu'au vu des analyses précédentes qui ont permis de montrer que lorsque le nombre de ces marches augmentaient, c'est-à-dire lorsque l'on se rapproche d'un gradient parfait, ces réflexions diminuaient, on pourrait être tenté de dire que celles-ci disparaîtraient s'il était possible de faire un gradient parfaitement continu. Mais c'est peut être aller vite en besogne, il faudrait mieux étudier l'impact de l'évolution de l'épaisseur du gradient avant de faire cette affirmation. Laissons donc l'analyse de cette zone pour le chapitre suivant. Par contre, les conclusions à tirer du graphique de droite (figure 58b) sont bien plus intéressantes et identiques à celles précédemment tirées. L'onde directe se confond cette fois parfaitement avec l'onde dans le cas d'une dalle totalement sèche. Seulement de nouveau, la réflexion sur la face inférieure de la dalle arrive avec un temps de retard et une amplitude moins forte par rapport au cas d'une dalle totalement sèche. C'est le signe que quelque chose ne colle pas avec les modèles théoriques aux propriétés uniformes.

Dans ce cas-ci, comme on pouvait s'y attendre, l'impact de la zone humide est légèrement moindre vu que son volume est lui aussi moins important. En superposant les graphiques donnant l'évolution du champ électrique en fonction du temps pour cette configuration-ci (figure 58b) et la précédente (figure 53b), nous obtenons la figure 60 :

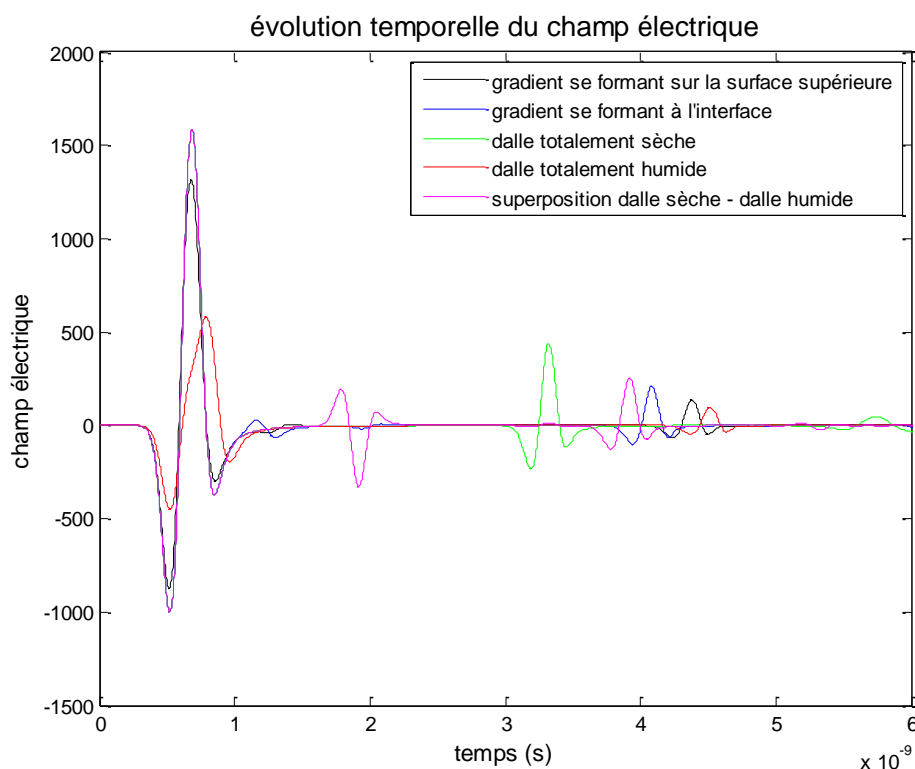


Figure 60: Comparaison entre l'évolution temporelle du champ électrique pour les deux configurations de gradients, pour une dalle totalement sèche et pour une dalle totalement humide

En regardant les deux graphiques mis l'un au-dessus de l'autre et comparés aux trois cas théoriques, on constate que ce second cas colle beaucoup plus au cas de la dalle sèche superposée à une dalle humide aussi bien en ce qui concerne l'onde directe que l'onde réfléchi. Cependant, vu que l'interface n'apparaît plus de manière aussi nette, il devient difficile de faire le rapprochement avec une telle configuration. Dès lors, il est peut-être plus facile de se raccrocher au cas d'une dalle totalement sèche. L'autre cas collait très bien au cas de la dalle totalement humide en ce qui

concerne la réflexion de l'onde à sa base mais il y avait clairement une incohérence entre l'onde directe perçue et l'onde directe attendue si on se mettait dans cette hypothèse de dalle humide. Ici si on se place dans la perspective d'une dalle totalement sèche cette incohérence est toujours présente et donc il est toujours possible de déduire la présence d'une zone humide. Comme précédemment, ces hypothèses restent valables dans le cas où l'épaisseur de la dalle est connue avec précision. Si ce n'est pas le cas, il n'est plus possible de déduire ces problèmes d'incohérence. Dans ce cas-là, pour visualiser la zone humide, il ne reste plus que les zones de perturbations entourées en rouge sur la figure 53b et la figure 58b qui font l'objet du paragraphe suivant.

### 9.3. Etude de l'influence de l'épaisseur du gradient

Dans les deux cas précédents, l'influence de la discrétisation formant le gradient a été analysée ainsi que l'influence de la position de celui-ci. Il peut être aussi intéressant de regarder l'influence de sa taille. En effet, lorsque l'on vient poser les dalles l'une sur l'autre, il n'apparaît pas directement un gradient de 5 cm, il se forme un gradient sur une faible épaisseur et, progressivement, ce gradient va se répandre sur une plus grande profondeur. En toute logique, on peut se poser les questions suivantes : est-ce qu'un gradient de faible taille peut être perçu comme une interface nette ? Est-ce que les fluctuations relevées dans les deux points précédents sont réellement dues au gradient ?

Dans ce paragraphe, nous allons essayer de voir comment évolue la réponse du radar en introduisant un gradient dont la taille varie de 1 cm à 5 cm. Afin de ne jouer que sur un seul paramètre, nous allons garder la dimension des marches d'escalier formant le gradient identique et égale à une cellule. Afin de clarifier les choses, la deuxième configuration est utilisée puisque s'il y a une réflexion dans la zone du gradient, la variation dans l'amplitude du champ électrique due à cette réflexion est située à une bonne distance de l'onde directe. Il est donc plus simple d'analyser les résultats.

La figure 61 représente l'évolution de la permittivité considérée dans les différentes modélisations, celle-ci traduit en fait l'évolution de l'humidité en fonction de la profondeur :

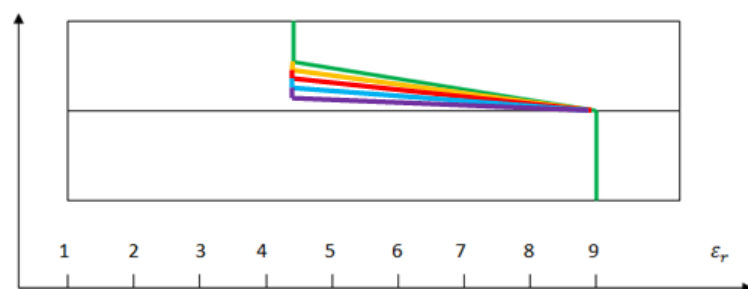


Figure 61: Evolution de la permittivité au sein de la dalle (gradient de 1 à 5cm)

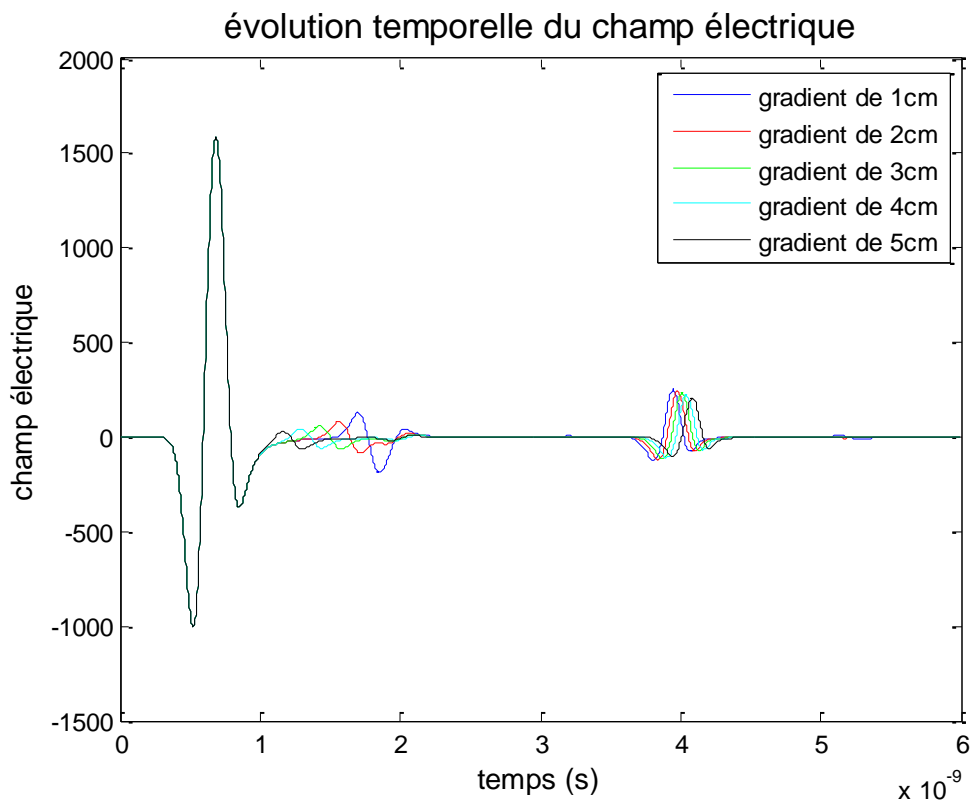
Comme on peut le voir entre toutes les simulations, il y a simplement une modification de la pente de notre gradient. En procédant comme ci-dessus, nous avons une variation de l'humidité moyenne de notre dalle en fonction de la remontée capillaire puisque la dalle inférieure reste à saturation et dispose d'autant d'eau que nécessaire. Il pourrait quand même être intéressant d'étudier juste la dynamique du gradient en conservant entre chaque modélisation une humidité moyenne constante. Vous pourrez donc retrouver les résultats d'une telle étude dans le paragraphe 9.5 : « étude de la variation de l'épaisseur du gradient à teneur en eau constante ».

Le tableau 10 ci-dessous reprend les diverses caractéristiques de ces modélisations :

**Tableau 10: Caractéristiques de la modélisation étudiant l'influence de l'épaisseur du gradient**

$\Delta x = \Delta y = \Delta l$	1,25mm
$\Delta t$	$2,95 \cdot 10^{-12}$ secondes
Durée de l'étude	$6 \cdot 10^{-9}$ secondes
Nombre d'itérations	2036 itérations
<b>Gradient de 1cm</b>	
<i>nombre de marches formant le gradient</i>	8 cellules
<b>Gradient de 2cm</b>	
<i>nombre de marches formant le gradient</i>	16 cellules
<b>Gradient de 3cm</b>	
<i>nombre de marches formant le gradient</i>	24 cellules
<b>Gradient de 4cm</b>	
<i>nombre de marches formant le gradient</i>	32 cellules
<b>Gradient de 5cm (4,75cm vu la limitation du nombre d'objet)</b>	
<i>nombre de marches formant le gradient</i>	38 cellules

Une fois que les diverses configurations présentées ont été mémorisées, nous pouvons passer à l'analyse de la variation du champ électrique pour chacun des cas.



**Figure 62: Evolution temporelle du champ électrique en fonction de la taille du gradient**

Après analyse de la figure 62, il est possible de constater, dans tous les cas, une certaine zone de réflexions après passage de l'onde directe. On peut aussi noter que cette onde directe se superpose parfaitement dans chaque simulation. On peut essayer de réaliser un agrandissement sur les perturbations et venir les comparer à la réflexion sur une interface nette (figure 63):

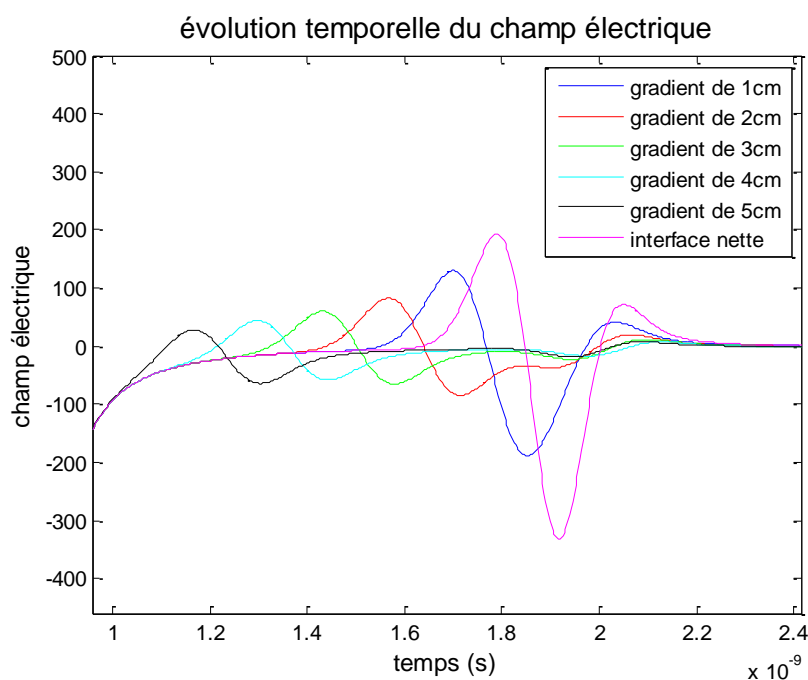


Figure 63: Zone de réflexion due au gradient

Ces fluctuations qui avaient déjà été mises en évidence dans les deux chapitres précédents ont une amplitude d'autant plus importante que le gradient est réparti sur une faible distance. Ceci est logique car si on pousse le raisonnement à l'extrême on finit par avoir un gradient se réalisant sur une épaisseur infinitésimale et donc on en revient au cas de l'interface nette. De plus, en regardant la forme du signal pour le cas correspondant au gradient de 1 cm, on voit que l'on se rapproche de la forme obtenue pour l'interface nette, avec une amplitude moindre. La variation de l'amplitude du champ électrique due au gradient de 5 cm est plus difficile à analyser puisqu'on s'éloigne déjà fortement de l'hypothèse d'une interface nette. Il peut être signalé que, logiquement, l'impact de ce dernier gradient est moins net en termes d'amplitude mais plus étendu du point de vue temporel.

En comparant maintenant la réflexion du bord inférieur de la dalle, visible sur la figure 62, on constate que la réflexion, dans la configuration où le gradient n'est que de 1 cm, arrive en avance sur tous les autres cas. Cela s'explique simplement par le fait que la proportion de béton sec, présentant une vitesse de propagation plus élevée, y est plus importante. Si la teneur moyenne en eau du béton était restée identique, normalement, toutes les réflexions auraient dû arriver en même temps. Ce point sera vérifié au chapitre 9.5 étudiant le même sujet mais à teneur en eau constante.

#### 9.4. Influence de la forme du gradient

Dans les chapitres précédents, nous avons utilisé un gradient pour lequel les propriétés évoluaient de manière linéaire. Ne disposant pas d'équation traduisant l'évolution d'un gradient réaliste en fonction de la profondeur, nous avons opté pour cette forme de gradient. Or d'un point de vue didactique, il est intéressant de pouvoir comparer comme dans le point 9.3 des gradients dont l'épaisseur est différente. Cela est facilement faisable dans le cas d'une évolution linéaire car il suffit de changer la pente de la droite (cf. figure 61).

Cependant, dans la réalité, cette évolution n'est pas vraiment linéaire. Il est donc logique de se demander si les résultats obtenus précédemment sont dignes d'intérêts ou non. Pour cela, il faut

simplement venir comparer les résultats obtenus précédemment aux résultats obtenus en utilisant un gradient non linéaire. Cette comparaison se fera pour une configuration bien déterminée. Nous avons opté pour la configuration n°2 et pour un gradient de 5 cm déjà étudié au point 9.2 : « étude du gradient se formant à l'interface entre une dalle sèche et humide ». Ci-dessous, sur la figure 64, il est possible de voir une courbe plus réaliste de la variation des propriétés obtenues par remontée capillaire de l'eau:

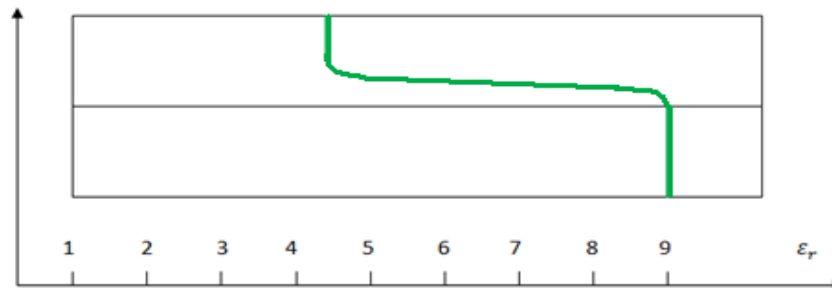


Figure 64: Remontée capillaire dans le béton

Une simulation va donc être faite en essayant de faire varier les propriétés du béton le long de cette droite verte. Comme précédemment, vu que nous supposons une zone de transition épaisse de 5 cm, ces variations de propriétés diélectriques se feront sur 38 cellules. En comparant les résultats de cette simulation aux résultats obtenus par approximation linéaire, voici ce que l'on obtient :

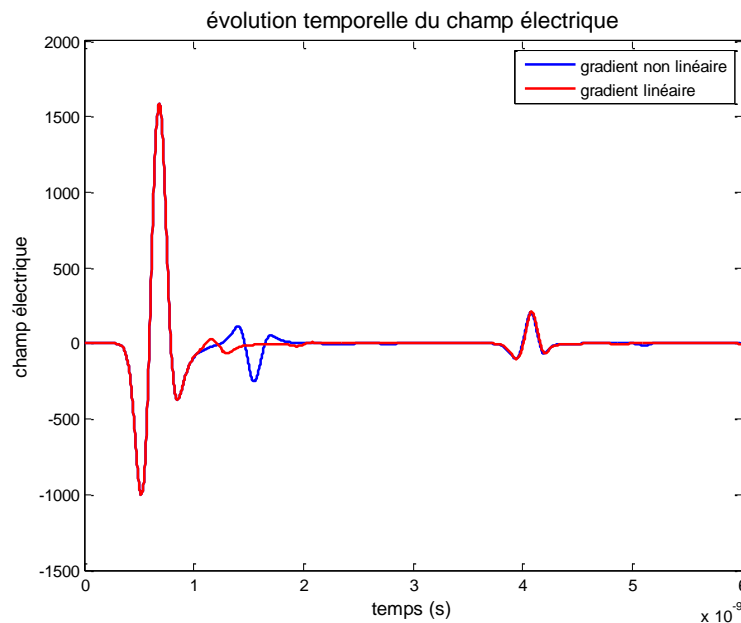


Figure 65: Comparaison entre un gradient linéaire et un gradient non linéaire

Globalement à l'aide de la figure 65, on voit qu'en changeant la forme du gradient, la forme de la réflexion change aussi. Le pic de réflexion dû à l'interface inférieure de la dalle avec l'air arrive plus ou moins simultanément entre les deux configurations. Cela signifie simplement que la teneur moyenne en eau est presque identique dans les deux configurations. Pour en être convaincu, il faut lire le chapitre suivant : « étude de la variation de l'épaisseur du gradient à teneur en eau constante ». Concentrons-nous sur la zone de réflexion et comparons-la à la réflexion obtenue dans le cas d'une interface nette (figure 66) :

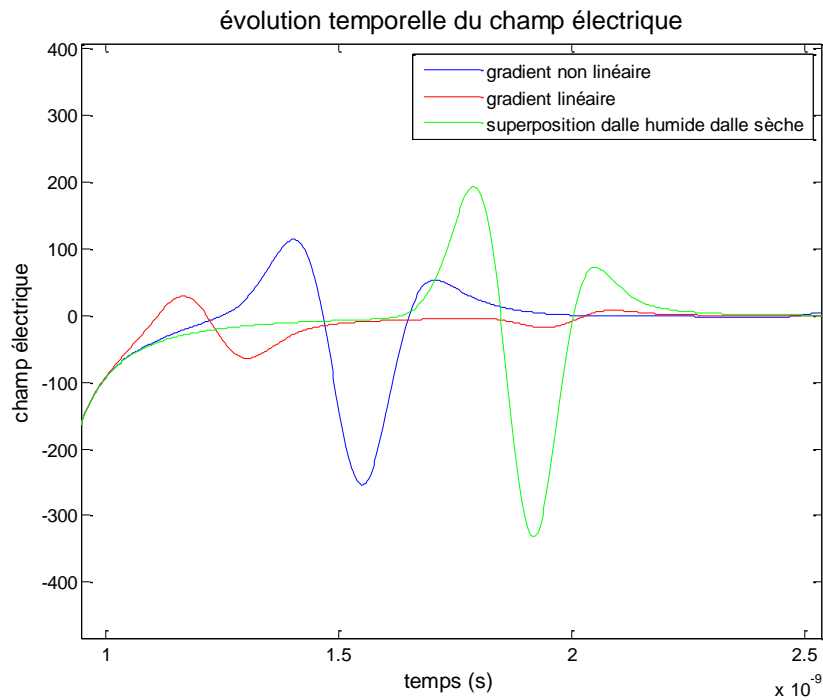


Figure 66: Influence de la forme du gradient sur la zone de réflexion

On constate qu'en utilisant l'approximation linéaire, la réflexion de l'onde sur la zone de transition est beaucoup plus difficile à détecter que la zone de transition dans le cas d'une variation non linéaire. En effet, dans le second cas, on se rapproche très fortement de la réflexion sur une interface nette. Cela est facilement explicable puisque en regardant la figure 64, on constate qu'initialement les propriétés au sein de la zone de transition évoluent très lentement. Par contre, au centre de cette zone il y a une variation rapide de la teneur en eau et donc des propriétés du béton. Ensuite, plus on se rapproche de la limite inférieure, plus les propriétés évoluent doucement pour tendre tangentiellement à la droite correspondant à une permittivité de 9. Donc nous avons en fait une zone centrale où les propriétés évoluent de manière très rapide, il est donc logique de se rapprocher d'un signal qui serait obtenu sur une interface nette. Cependant, vu que cette zone de variation de propriétés est située plus haut que l'interface nette de départ, le pic de réflexion arrive en avance par rapport au pic initial. Grâce à cette comparaison de signaux, on peut en conclure plusieurs choses :

- la zone humide est plus facilement détectable en utilisant une variation non linéaire des propriétés vu que l'on se rapproche de l'hypothèse d'interface nette. Donc lorsque l'on arrivait à détecter facilement une zone humide avec l'hypothèse de variation linéaire des propriétés, il est possible de se dire que la détection de toutes autres formes de variation de la teneur en eau est détectable puisqu'en fait la variation linéaire de la teneur en eau correspond au cas où les propriétés évoluent le plus doucement possible, il s'agit en quelque sorte du cas le plus critique ;
- si la variation de la teneur en eau dans le béton suit la forme de la courbe présente à la figure 64, on peut conclure que si l'épaisseur du gradient est nulle ou du moins très faible, on se rapproche de la courbe verte (correspondant à une interface nette). Lorsque cette zone de transition va remonter, autrement dit lorsque l'épaisseur du gradient augmente, on va avoir la zone de variation brusque des propriétés qui elle aussi va monter. Dès lors, le pic dans le champ électrique dû à cette réflexion arrive de plus en plus vite puisque la distance parcourue par l'onde avant de l'atteindre diminue progressivement ;

- si l'épaisseur de la zone de variation brusque des propriétés devenait plus importante, le signal dégénérerait progressivement vers le signal rouge.

### 9.5. Etude de la variation de l'épaisseur du gradient à teneur en eau constante

Dans le point 9.3, l'influence de la variation de l'épaisseur du gradient avait déjà été analysée. Cependant, pour faire une simulation qui collait le plus possible à l'expérience de la troisième partie de ce travail, nous avons considéré un front humide qui remontait progressivement sur la hauteur de la première dalle. Ce cas simule mieux la réalité des expériences mais malheureusement en procédant de la sorte, deux paramètres changeaient : l'épaisseur de la zone de transition et l'humidité moyenne de la dalle. Pour mieux visualiser l'impact du gradient à proprement parlé, il est possible de venir réaliser une modélisation dans laquelle l'humidité globale reste la plus constante possible. Pour cela, il suffit de faire tourner la droite d'évolution de l'humidité (et donc des propriétés) autour d'un point unique. Voici un schéma représentant ces diverses variations (figure 67):

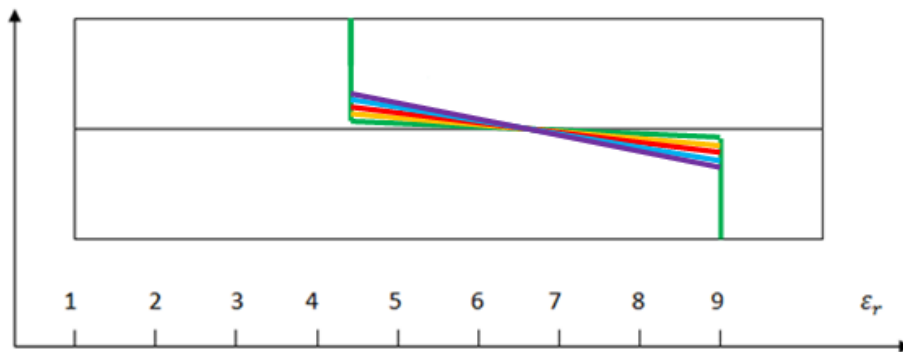


Figure 67: Evolution de la permittivité au sein de la dalle (teneur en eau constante)

En réalisant les modélisations suivant ce schéma, nous obtenons une évolution de l'épaisseur de la zone de transition sans avoir de modification de la teneur en eau moyenne. Nous utilisons des programmes de simulations similaires à ceux du chapitre 9.3, il suffit juste de venir modifier la localisation des couches formant le gradient. Nous avons donc un gradient dont l'épaisseur varie de 1 cm à 5 cm. La figure 68 présente les résultats obtenus :

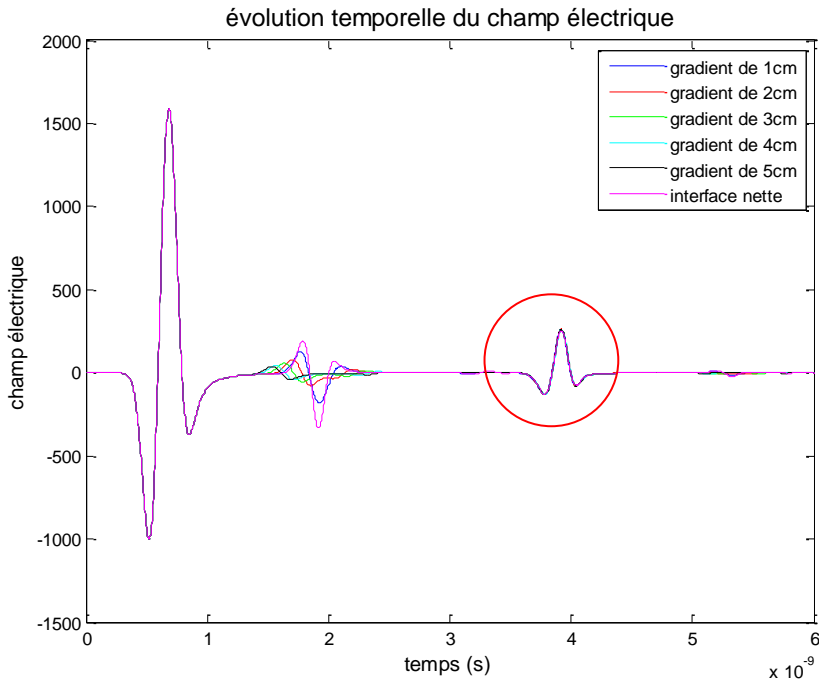


Figure 68: Evolution du champ électrique en fonction de l'épaisseur du gradient (teneur en eau constante)

Comme on pouvait s'y attendre, ce graphique est fort proche de la figure 62 obtenue dans le point 9.3. Cependant, les pics correspondant à la réflexion sur la zone inférieure de la dalle arrivent cette fois presque tous en même temps et avec une même amplitude. La légère différence que l'on peut observer lorsque l'on agrandit l'image vient du fait que nous n'arrivons pas à réaliser exactement une teneur en eau constante à cause de l'approximation discontinue du gradient. Pour obtenir une superposition parfaite, il aurait fallu pouvoir réaliser une zone de transition continue. Cela est logique puisque la vitesse et l'atténuation sont fonction de propriétés électriques qui sont elles-mêmes fonction de la teneur en eau. Dès lors, cette légère différence de teneur en eau et donc des propriétés, influence la vitesse de propagation d'où ces petits décalages. Les pics en question ont été entourés en rouge. Cependant, si la teneur moyenne en eau était parfaitement constante sur l'épaisseur totale de la dalle, peu importe la distribution de l'humidité, cette réflexion arriverait en même temps et avec une même amplitude. Comparons maintenant les réflexions de l'onde sur la zone de transition dans ces configurations avec celles du point 9.3 :

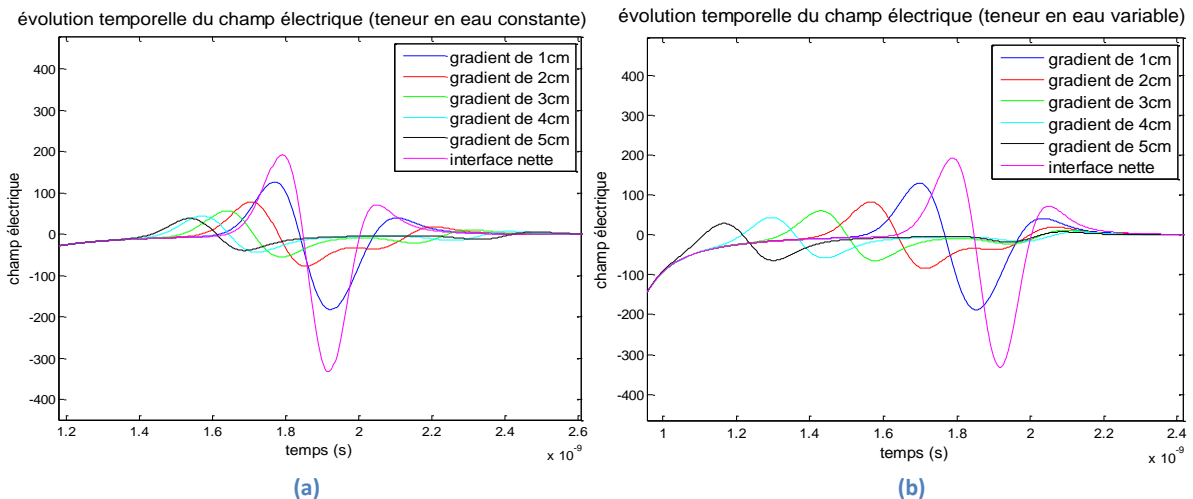


Figure 69: Comparaison de l'évolution du champ électrique en fonction de l'épaisseur du gradient (teneur en eau constante (a) et variable (b))

En comparant les deux graphiques précédents, on constate que toutes les réflexions ont la même amplitude, la seule différence réside dans l'axe des abscisses. En effet, dans les cas de la figure 69b, vu que la remontée du gradient vers la surface était progressive, les réflexions arrivaient de plus en plus rapidement avec l'augmentation du gradient. Dans la configuration actuelle (figure 69a), la valeur centrale d'humidité reste toujours au même point. Dès lors, la réflexion est elle aussi toujours centrée sur un seul point temporel. Comme précédemment, on peut aussi observer que plus le gradient est étendu plus son influence temporelle est large et plus l'amplitude de la réflexion est faible.

## 9.6. Variation du coefficient de réflexion en fonction de l'épaisseur du gradient

Grâce aux divers chapitres précédents, il a été possible de se rendre compte que la zone humide restait détectable même si elle était précédée d'une zone de variation progressive des propriétés. Nous avons pu constater aussi que plus cette zone était étroite plus on se rapprochait de l'hypothèse d'interface nette. Progressivement, lorsque l'épaisseur du gradient s'accroît, nous avons de plus en plus de mal à détecter la réflexion puisque l'amplitude de celle-ci diminue. Il pourrait être intéressant de traduire cette diminution de l'amplitude en fonction de l'épaisseur du gradient.

Pour ce faire, il faut simplement comparer l'amplitude de la réflexion du signal sur une interface totalement réfléchissante (par exemple une feuille métallique) et l'amplitude obtenue par réflexion sur la zone humide. Ce rapport d'amplitude pic à pic correspond en fait au coefficient de réflexion déjà présenté dans le rappel théorique et réutilisé dans le chapitre 8.2 relatif à la superposition d'une dalle sèche et d'une dalle humide. Pour l'interface nette, il est possible d'utiliser directement la formulation théorique suivante (Van der Wielen A., 2011):

$$R = \frac{\cos \theta_1 - \sqrt{\frac{\epsilon_{r2}}{\epsilon_{r1}} - \sin^2 \theta_1}}{\cos \theta_1 + \sqrt{\frac{\epsilon_{r2}}{\epsilon_{r1}} - \sin^2 \theta_1}} \quad (89)$$

Les permittivités des deux milieux étant connus, il ne reste plus que l'angle  $\theta$  à trouver. Pour rappel cet angle est l'angle d'incidence de l'onde sur l'interface entre les deux milieux. Notre émetteur et notre récepteur sont éloignés de 4 cm, notre dalle fait quant à elle 10 cm. En regardant la figure 70, on constate que l'angle  $\theta = \arctan(2/10)$  et donc celui-ci vaut  $11^\circ$ .

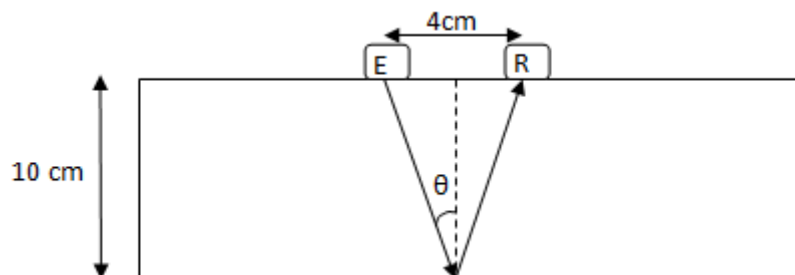


Figure 70: Angle d'incidence de l'onde

En remplaçant toutes les données dans la formule précédente, nous trouvons que :

$$R = \frac{\cos \theta_1 - \sqrt{\frac{\epsilon_{r2}}{\epsilon_{r1}} - \sin^2 \theta_1}}{\cos \theta_1 + \sqrt{\frac{\epsilon_{r2}}{\epsilon_{r1}} - \sin^2 \theta_1}} = \frac{\cos(11) - \sqrt{\frac{9}{4,5} - \sin^2(11)}}{\cos(11) + \sqrt{\frac{9}{4,5} - \sin^2(11)}} = -0.1809 \quad (90)$$

Pour les autres, il faut travailler graphiquement. Une simulation a été réalisée en venant placer une feuille métallique à l'interface entre la dalle totalement sèche et la dalle totalement humide. Connaissant la réponse pour ce cas de figure, il reste juste à venir superposer les résultats de l'étude du point précédent sur le graphique obtenu (figure 71).

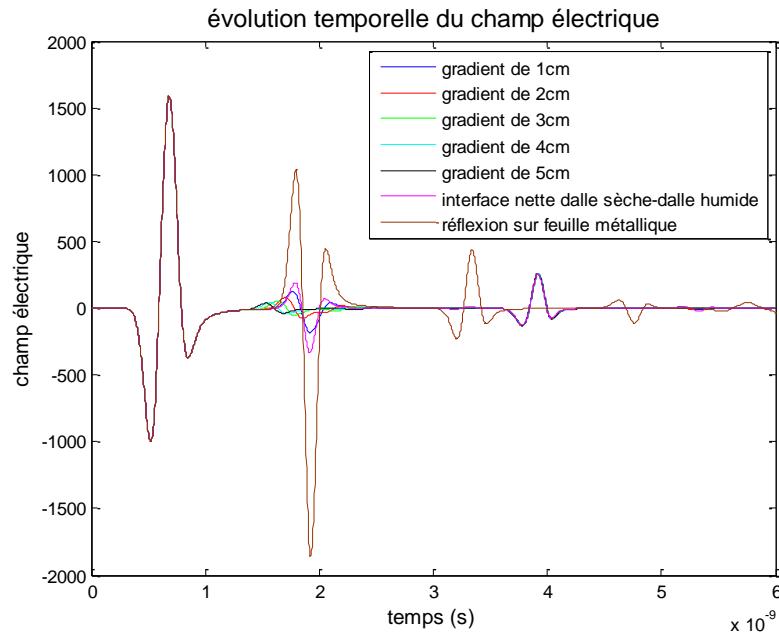


Figure 71: Comparaison des réflexions dans différentes configurations

Comme attendu, il est possible de constater que la réflexion de l'onde sur la feuille métallique est très importante puisque son amplitude est plusieurs fois supérieure à l'amplitude des réflexions dans les autres configurations. Ce qui est logique puisqu'au vu du coefficient calculé numériquement, l'ordre de grandeur devait être de  $\pm 5$ . Cependant avant de réaliser ces calculs de coefficient de réflexion, il est possible dans un souci didactique de venir regarder la position de l'onde à un pas de temps bien précis et ce dans le but de vérifier le caractère total de la réflexion de l'onde sur la feuille métallique.

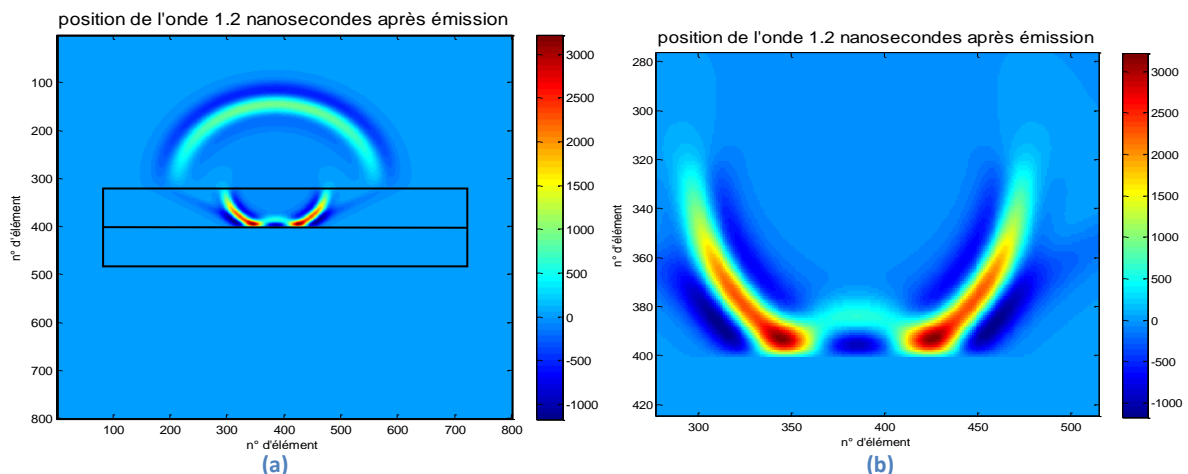


Figure 72: Visualisation du caractère total de la réflexion sur une feuille métallique

Sur ces figures 72a et 72b, on constate bien que l'onde n'a pas l'occasion de se propager dans la seconde dalle, elle est réfléchi de manière nette à l'interface. Vu que nous sommes certains du caractère total de la réflexion, il est possible d'utiliser les valeurs trouvées graphiquement pour déterminer les différents coefficients de réflexions. Pour ce faire, la formule suivante est utilisée :

$$R = \frac{\text{amplitude crête à crête du signal réfléchi}}{\text{amplitude crête à crête du signal réfléchi sur la feuille métallique}} \quad (91)$$

En relevant ces mesures pour l'ensemble des signaux nous obtenons les valeurs du tableau 11 :

**Tableau 11: Variation du coefficient de réflexion en fonction de l'épaisseur d'un gradient linéaire**

Simulation	Amplitude crête à crête	simulation	Amplitude crête à crête	Coefficient de réflexion	Pourcentage de la valeur initiale
<i>Interface nette</i>	524.3	<i>Feuille métallique</i>	2901	0.1807	100%
<i>Gradient de 1cm</i>	308.18			0.1062	58.8%
<i>Gradient de 2cm</i>	155.69			0.0537	29.7%
<i>Gradient de 3cm</i>	111.74			0.0385	21.3%
<i>Gradient de 4cm</i>	88.17			0.0304	16.8%
<i>Gradient de 5cm</i>	77.92			0.0269	14.9%

Nous pouvons directement constater que le coefficient de réflexion obtenu pour une interface nette est identique à celui obtenu par voie mathématique et ce à la troisième décimale près. Grâce à ce tableau, nous voyons que si nous approximations le gradient par une zone dans laquelle les propriétés évoluent de manière linéaires, l'amplitude de l'onde réfléchi diminue au fur et à mesure que le gradient augmente. Si le gradient est de 1 cm, nous avons encore une réflexion dont l'énergie est égale aux trois-cinquièmes de l'énergie qui serait réfléchi sur une interface nette. Par contre, si le gradient passe à 2 cm, l'amplitude devient égale à 30% de celle initiale. Nous voyons donc que la décroissance de l'amplitude en fonction de l'augmentation de l'épaisseur est assez rapide. Il faut bien faire attention au fait que ce tableau 11 ne peut être utilisé que si nous approximations le gradient par une évolution linéaire des propriétés. Si l'évolution de la teneur suit la courbe de la figure 64 présentée au chapitre 9.4 relatif à l'influence de la forme du gradient, il est vraisemblable qu'au vu de la discussion qu'on a pu avoir dans celui-ci, on trouve des valeurs de coefficients de réflexions supérieurs. En définitive, on en revient à la même conclusion, le cas de l'évolution linéaire des propriétés est le cas le plus critique du point de vue détection du gradient.

Les valeurs précédentes sont donc des sortes de bornes inférieures. Dans toutes autres configurations d'évolution des propriétés pour laquelle la rotation se fait autour d'un même point, nous trouverons des valeurs qui seront situées entre la valeur de coefficient de réflexion sur l'interface nette et la valeur située dans la colonne correspondant à la dimension du gradient.

Il peut être intéressant, pour généraliser l'étude précédente, de réaliser un graphique donnant la diminution du coefficient de réflexion en fonction de l'épaisseur du gradient, épaisseur ramenée à l'échelle de la longueur d'onde. En effet, il a été possible de voir dans le chapitre 2.4 des rappels théoriques que la détection de tout objet est fonction de la longueur d'onde utilisée par le radar. Il est donc utile de ramener la taille du gradient à un ratio de cette longueur d'onde. Nous avons pu voir dans les premiers chapitres que la longueur d'onde est fonction du milieu. En ce qui nous concerne, nous avons trouvé une longueur d'onde de 6,15 cm dans le béton sec et une onde de

4,35 cm dans le béton humide. On constate que la moyenne est donc de 5 cm. En prenant cette valeur moyenne comme référence, le graphique de la figure 73 est obtenu:

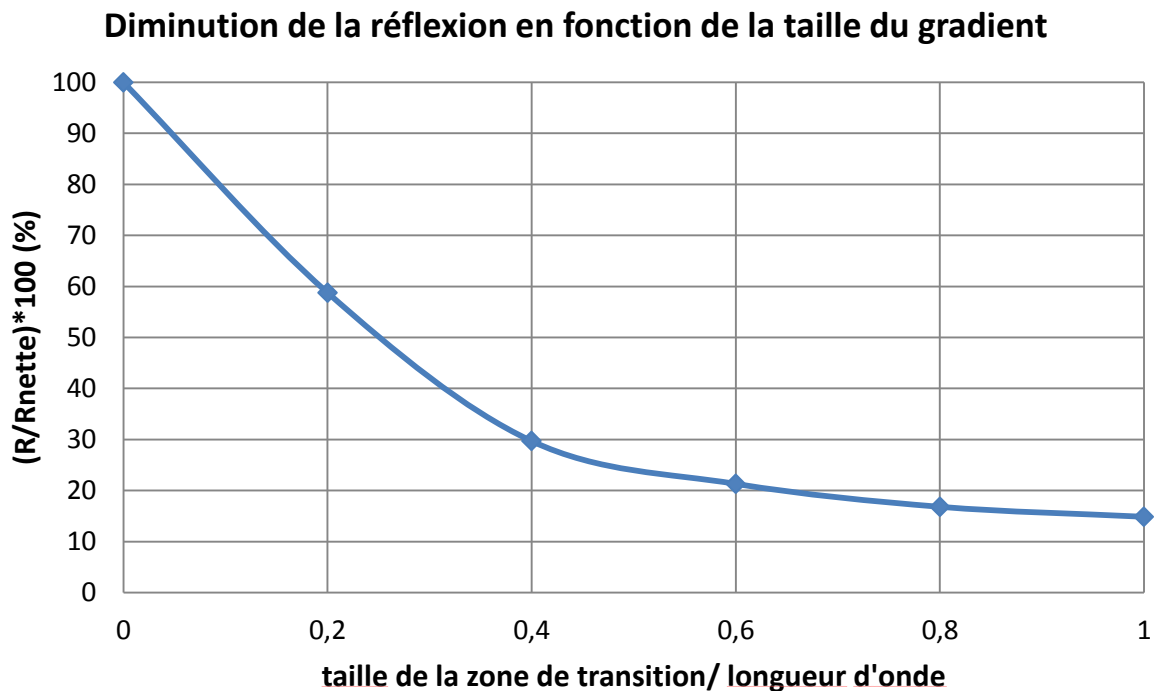


Figure 73: Diminution du coefficient de réflexion en fonction de la taille du gradient

Comme annoncé, on constate clairement une première phase de décroissance rapide de l'amplitude du signal réfléchi avec l'augmentation de l'épaisseur de la zone de transition. Ensuite, si la taille du gradient devient similaire à la longueur d'onde du signal, la zone humide devient difficilement détectable. En effet la réflexion devient dans ce cas très faible (inférieure à 20%).

Les résultats obtenus ici corroborent les résultats obtenus par Bano (Bano M., 2006). En effet, celui-ci avait étudié l'influence d'une zone de transition au-dessus d'une nappe phréatique sur la réflexion d'ondes GPR. Tout comme nous, il a prouvé que l'amplitude de la réflexion venant de la zone de transition diminue avec l'augmentation de la fréquence et/ou l'épaisseur de la zone humide (augmentation du rapport « taille du gradient/longueur d'onde »). Plus précisément, il a conclu que lorsque l'épaisseur de la zone de transition ( $h$ ) était inférieure à la moitié de la longueur d'onde ( $h < \lambda/2$ ), la présence de la couche de transition n'a pas beaucoup d'importance sur la détection de la nappe phréatique. Par contre, lorsque  $h > \lambda/2$ , le coefficient de réflexion sur la couche de transition devient négligeable et on ne voit pas ou très peu la nappe phréatique. Dans notre étude, les conclusions que l'on peut tirer sont presque identiques puisque au vu du graphique, dans le cas où  $h$  est inférieur à  $0,4 \lambda$ , nous arrivons à détecter la zone humide car l'amplitude de la réflexion reste supérieure à 30% de l'amplitude de la réflexion sur une interface nette. Par contre si  $h$  est supérieur à cette valeur, cela commence à devenir difficile. De plus, on peut signaler que si on approxime le graphique précédent par un graphique bi-linéaire, le point  $h/\lambda = 0,4$  apparaît comme le point charnière où a lieu le changement de pente.

## **10. Conclusion des modélisations**

Ces divers chapitres ont eu pour but de nous familiariser avec les résultats que l'on peut obtenir

avec le radar. Progressivement nous avons évolué en complexité pour finalement arriver à des modélisations qui sont en accord avec l'étude que nous allons poursuivre dans la partie expérimentale. Ces diverses modélisations nous ont permis de mettre en évidence les points auxquels on doit faire attention dans la pratique si on veut pouvoir détecter ces zones humides. En effet, nous avons pu mettre en évidence une certaine incohérence entre les ondes directes et les vitesses de propagation de l'onde électromagnétique dans le matériau. Si on estime la permittivité de surface d'un matériau (par CMP ou par estimation du coefficient de réflexion) et qu'on la suppose constante sur l'épaisseur, la réflexion de l'onde sur un objet dont la profondeur est connue, arrivera bien plus tard que prévu. Bien entendu, la mise en évidence de cette incohérence n'est possible que si la géométrie est connue.

A côté de ce problème d'incohérence, nous avons aussi, dans ce chapitre, étudié l'influence même du gradient sur la détection des zones humides. De cette étude, il ressort que dans le cas où l'onde directe se dissocie assez bien de l'onde réfléchie, il est possible de venir détecter la zone humide si celle-ci est précédée d'une zone assez étroite de transition des propriétés. En effet, il a été possible de voir que la réflexion sur un gradient étroit se rapproche de l'hypothèse d'une réflexion sur une interface nette. En ce qui nous concerne, il a été prouvé que cette notion d'étroit se limitait à un gradient compris entre 0 et 2 cm, puisque dans ce dernier cas, la zone humide restait clairement visible sur le graphique nous donnant l'évolution temporelle du champ électrique en fonction du temps. Par contre, si ce gradient s'agrandit, l'impact de celui-ci augmente puisqu'on ne voit presque plus la zone humide. Vu que l'amplitude de la réflexion se réduit de plus de 70% par rapport à la réflexion sur une interface nette, il devient donc certes plus difficile de détecter la zone humide. Il en est de même dans le cas où cette zone est fort proche de la surface. En effet, il y a dans ce cas une certaine interaction avec l'onde directe, ce qui rend là aussi l'analyse des résultats plus difficile.

Attention comme le fait très justement remarquer Bano (Bano M., 2006) dans son document, il ne faut pas oublier que les différents résultats observés ici sont fonction de la fréquence utilisée. En effet, lorsque la longueur d'onde est très grande par rapport à l'épaisseur de la couche de transition, la présence de celle-ci a peu d'importance et la réflexion est bien visible.

## 3<sup>ème</sup> partie : Etudes expérimentales

Cette troisième partie, est beaucoup moins théorique que ses consœurs puisqu'elle met en évidence les diverses expériences menées au cours de ces trois mois. En effet, même si les outils de modélisations sont de plus en plus performants, les résultats doivent toujours être validés grâce à des expériences pratiques. Dès lors, afin d'aboutir à un système permettant l'analyse d'une zone humide en présence d'un gradient, un certain nombre d'opérations ont été nécessaires. Le but de cette partie est de vous présenter les différents essais qui ont été réalisés, ainsi que les procédures utilisées pour mesurer le gradient avec des sondes hygrométriques et avec le GPR. A la fin du chapitre, les résultats obtenus avec les deux méthodes sont comparés.

### **11. Montage expérimental**

L'idée première de la partie expérimentale consiste à venir réaliser un gradient d'humidité dans une dalle en béton. Pour ce faire, il existe plusieurs solutions dont les plus simples sont :

- réalisation d'un gradient par séchage ;
- réalisation d'un gradient par remontée capillaire.

Plutôt que de faire un choix, il a été décidé d'expérimenter les deux solutions. En effet, cela peut être intéressant car dans un premier temps, le gradient ne se réalise pas au même endroit. Il y a donc une comparaison possible entre les résultats. Pour réaliser un gradient par remontée capillaire, il faut disposer d'une dalle dont l'humidité interne est uniforme et qui ne soit pas déjà dans un état saturé. Il est donc impossible de réaliser en trois mois une dalle et de stabiliser celle-ci à une humidité différente de celle correspondant à un état saturé. La seule solution possible consistait à en utiliser une déjà réalisée. Heureusement, de telles dalles étaient disponibles au laboratoire, puisqu'un ensemble de 4 dalles avaient été réalisées pour un travail de fin d'étude en 2009. Deux d'entre elles avaient été entreposées depuis le mois d'août 2010 dans une pièce climatisée à 21°C ( $\pm 2^\circ\text{C}$ ) et à 60% ( $\pm 10\%$ ) d'humidité relative (HR), les deux autres étant stockées depuis leur réalisation dans une chambre à 100% HR. Vu qu'elles sont dans ces chambres depuis presque un an, nous avons fait l'hypothèse qu'elles étaient stabilisées. Le gradient d'humidité par remontée capillaire s'est donc fait dans une des deux dalles stockées à 60% HR et la formation du gradient par séchage dans une des deux autres placées dans la chambre à 100% HR.

Ensuite, il faut s'assurer de l'existence d'une zone humide ; pour cela, il suffit de venir poser la dalle dans laquelle se réalise le gradient sur une autre dalle qui reste à saturation. Et pour être certain que cette dernière reste à saturation, on peut venir la déposer dans un bac rempli d'eau. Pour cette fonction, il ne restait malheureusement pas assez de dalles de 2009 entreposées dans la chambre humide, il a donc fallu en utiliser d'autres. Nous avons pris deux dalles qui ont été réalisées en mars, dans le cadre de ce travail, avec un béton de basse qualité.

Les dalles à saturation ont ensuite été solidarisées avec les dalles dans lesquelles se réalise le gradient. Comme il a été dit dans la partie modélisation, les dalles réalisées en 2009 présentent une face inférieure (correspondant à la face non coffrée) qui est loin d'être plane. Si on les superpose

simplement sur les nouvelles que nous avons réalisées, on risque de se retrouver avec des vides d'air entre les deux, vides qui risquent de venir perturber fortement le signal perçu par le radar. Pour éviter ce problème, sur une suggestion de Monsieur Dondonné, il a été décidé de venir placer une couche de mortier entre les deux dalles. Vu que les caractéristiques du mortier se rapprochent très fortement des caractéristiques du béton humide, cette interface ne devrait pas trop influencer la propagation de l'onde électromagnétique émise par le radar.

Si toutes les étapes précédentes sont bien respectées, on arrive aux deux configurations de la figure 74:

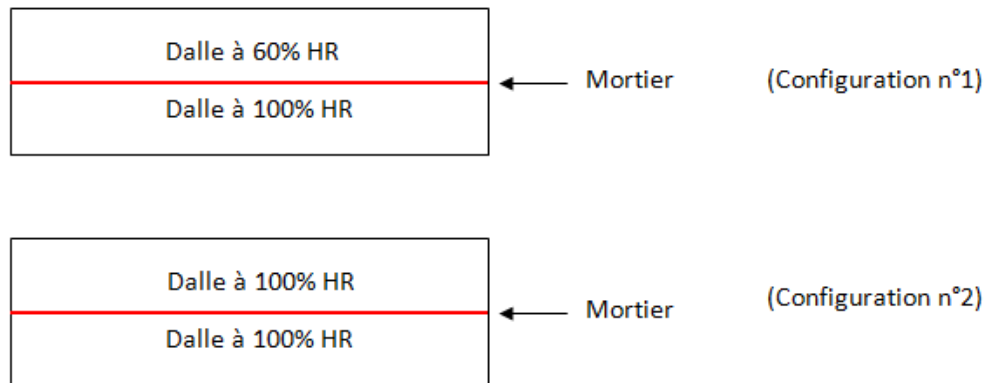


Figure 74: Dispositifs expérimentaux

Les deux systèmes ont été mis en place dans une pièce climatisée à 60% HR. Ainsi, pour la configuration n°1, un gradient est venu se former uniquement à l'interface entre la dalle saturée et la dalle plus sèche. Ce gradient se réalise bien par remontée capillaire dès la superposition des deux dalles. Ce taux d'humidité convient également à la configuration n°2, puisque le taux d'humidité inférieur à 100% HR permet le séchage de la dalle par la surface.

La dernière étape avant de pouvoir commencer les tests consistait à trouver un moyen pour connaître la position du gradient ; pour ce faire, chaque dalle a été équipée de cinq sondes hygrométriques.

Les dalles ont été choisies suffisamment grandes (60 cm par 80 cm) ce qui permet de placer les capteurs d'un côté de celle-ci tandis que les mesures radar sont prises sur l'autre moitié de la dalle, suffisamment loin des capteurs métalliques et des parois pour ne pas subir leur influence. Afin d'obtenir un gradient qui soit juste fonction de la profondeur mais pas de la localisation spatiale de la mesure, une couche de résine époxy a été appliquée sur les faces latérales des dalles afin d'éviter tout séchage par les bords. La figure 75 nous montre une image du dispositif expérimental prêt à être utilisé.



Figure 75: Illustration du montage expérimental final

## **12. Etude des dalles en béton**

### **12.1. Recherche des caractéristiques des dalles de 2009**

Il est utile de comparer les propriétés de nos dalles à celles de 2009. Pour ce faire, il est important de disposer des caractéristiques du béton utilisées par les étudiants de cette époque. Après recherche dans les travaux de fin d'études de Nathalie Migeotte (Migeotte N., 2009) et de Cécile Goffinet (Goffinet C. 2009), une trace du béton utilisé a été trouvée. Il se trouve que celui-ci avait été commandé à une firme de béton de la région de Liège. Dans les annexes de leurs travaux respectifs, le bon de commande nous renseignant sur la qualité du béton était disponible. Dans le tableau 12 ci-dessous, vous pouvez retrouver les caractéristiques principales de celui-ci:

Tableau 12: Caractéristiques théoriques des dalles de 2009

Classe de résistance	C25/30
Classe des chlorures	Béton armé (<0,4%)
Granulosité (Dmax)	8 mm Calcaire
Type de ciment	CEMIII/A 42,5N LA

On voit donc que les caractéristiques mécaniques de ce béton sont assez faibles, ce qui risque de se traduire par une porosité élevée. Un cube d'essai réalisé en 2009 avec le même béton que les dalles a été soumis à un test de compression pour vérifier sa résistance actuelle et la comparer aux caractéristiques fournies par la firme de fabrication.

Lors de ce test, une résistance de 620 KN a été atteinte. Vu que les dimensions de l'éprouvette étaient de 150 mm X 150 mm, cela donne une résistance de 27,5 MPa. Le béton est donc même une classe de résistance en dessous de celle annoncée.

Le facteur qui va influencer principalement la teneur en eau saturée et donc la permittivité de la dalle saturée est la porosité. Pour mesurer celle-ci, un ensemble d'éprouvettes carrées de 10 cm de côté et de 8 mm d'épaisseur ont été réalisées (figure 76a). Elles ont été pesées à l'état saturé (figure 76b), après immersion dans un bac rempli d'eau jusqu'à stabilisation de leur masse (différence sur 24h inférieure à 0,01%). Ensuite, elles ont été placées à l'étuve, à nouveau jusqu'à stabilisation de

leur masse (différence sur 24h inférieure à 0,01%). Le volume des éprouvettes a été déterminé grâce à une pesée sous eau à l'état saturé.



Figure 76: Éprouvettes en béton (a) et mesure de leurs masses (b)

Grâce aux différentes masses, nous avons déterminé l'absorption, la masse volumique sèche et saturée du béton ainsi que la porosité (tableau 13).

Tableau 13: Caractéristiques expérimentales des dalles de 2009

Echantillon	Masse saturée (g)	Masse sous eau (g)	Masse sèche (g)	Volume (cm <sup>3</sup> )	Masse volumique sèche (kg/m <sup>3</sup> )	Masse volumique humide (kg/m <sup>3</sup> )	Absorption (%)	Porosité (%)
N°27	193,64	107,86	175,03	85,78	2040,45	2257,40	10,63	21,7
N° 28	203,04	112,92	183,39	90,12	2034,95	2253	10,71	21,8
N°29	197,8	109,87	178,76	87,93	2032,98	2249,52	10,65	21,65

Ces différentes propriétés ont été déterminées à l'aide des formules 92 à 95 (Ployaert C., 2009).

$$volume = \frac{Masse_{saturée} - Masse_{sous\ eau}}{Masse\ volumique\ de\ l'eau} = \frac{Masse_{saturée} - Masse_{sous\ eau}}{1000} \quad (92)$$

$$Masse\ volumique\ sèche\ du\ béton = \frac{Masse_{sèche}}{volume} \quad (93)$$

$$Masse\ volumique\ humide\ du\ béton = \frac{Masse_{saturée}}{volume} \quad (94)$$

$$absorption = \frac{Masse_{saturée} - Masse_{sèche}}{Masse_{sèche}} * 100 \quad (95)$$

$$porosité = absorption * \frac{Masse\ volumique\ sèche}{Masse\ volumique\ de\ l'eau} \quad (96)$$

Dans le chapitre 1.1 des rappels bibliographiques, il avait été signalé que Ployaert (Ployaert C., 2009) considérait un béton comme étant de bonne qualité si son absorption était inférieure à 6%. Ici, le béton est largement au-dessus de cette valeur. On retrouve donc bien la relation qui existe entre la porosité et la résistance. De plus, il indiquait que la valeur standard pour une masse volumique sèche est de 2250 kg/m<sup>3</sup>, de nouveau on voit qu'ici les résultats sont en dessous de cette valeur, ce qui confirme la présence d'un béton de faible qualité.

## 12.2. Réalisation des dalles inférieures

Afin de s'approcher des caractéristiques des dalles supérieures, il était important de réaliser les dalles inférieures avec un béton de faible qualité. Dans cette optique, on peut utiliser soit un CEMII/32,5 soit un CEMIII/32,5. En effet, si on diminue la résistance du ciment, la résistance du béton devrait globalement diminuer. De plus, ici, un rapport E/C de 0,6 a été utilisé. Ce rapport E/C relativement élevé permet de diminuer la résistance mécanique du béton et d'assurer une porosité élevée. Nous n'avons pas osé augmenter la quantité d'eau au-delà de cette valeur de peur de créer de la ségrégation dans le béton frais.

Les coffrages des dalles mesurent 80 cm de long sur 60 cm de large et 10 cm de haut. Il s'agit en fait des coffrages qui ont servi à la réalisation des dalles de 2009. Si on calcule leur volume, on se rend compte qu'il faudra 0,048 m<sup>3</sup> de béton par dalle. A cela, il faut rajouter la quantité nécessaire à la fabrication de cinq cubes d'essais qui sont nécessaires pour les tests de résistance ainsi que pour d'éventuels tests dans le futur. Au final la quantité nécessaire de béton est de plus ou moins 0,065 m<sup>3</sup> soit 65 litres par coffrage. Dans le tableau 14 ci-dessous, vous pouvez retrouver la composition de notre béton :

Tableau 14: Composition du béton constituant les dalles inférieures

Volume à couler		Composition pour 1 m <sup>3</sup>	Composition pour 65l
Classe de béton		C25/30	C25/30
Gros granulats	G30 (concassés 14/20)	520,5 kg	33,8 kg
Granulats moyens	G31 (concassés 7/14)	479,8 kg	31,2 kg
Petits granulats	G32 (concassés 2/8)	369,3 kg	24 kg
sable	S18 (sable de rivière 0/4)	504,2 kg	32,8 kg
Ciment	CEM II/B-M 32,5N	324,9 kg	21,1 kg
Eau		192,5 l	12,5 l

En ce qui concerne le mode opératoire employé pour la réalisation du béton, la procédure suivante a été suivie:

- 1) humecter la bétonnière ;
- 2) placer les granulats et le sable et mélanger pendant 30 secondes ;
- 3) ajouter la moitié de la quantité d'eau totale ;
- 4) mixer pendant 120 secondes ;
- 5) laisser le mélange reposer pendant 120 secondes et ensuite ajouter le ciment ;
- 6) mélanger pendant 30 secondes ;
- 7) rajouter le restant d'eau ;
- 8) mélanger pendant 90 secondes.

Pour chaque dalle, la résistance à la compression a été évaluée sur deux cubes. Les tests de résistance ont été réalisés 49 jours après réalisation du béton. Le tableau 15 reprend les résultats obtenus :

Tableau 15: Résistance à la compression des dalles inférieures

Numéro du cube	Surface	Résistance du cube	Contrainte à la rupture
Dalle 1, cube n°6	150X146 = 21900 mm <sup>2</sup>	1015 kN	46,3 MPa
Dalle 1, cube n°5	150X140 = 21000 mm <sup>2</sup>	1000 kN	47,6 MPa
Dalle 2, cube n°3	150X142 = 21300 mm <sup>2</sup>	925 kN	43,42 MPa
Dalle 2, cube n°6	150X150 = 22500 mm <sup>2</sup>	920 kN	40,89 MPa

La moyenne de la dalle n°1 est de 46,95 MPa et la moyenne de la dalle n°2 est de 42,15 MPa. En définitive, malgré les précautions prises, il s'avère que le béton obtenu est un béton de qualité moyenne dont la résistance est nettement supérieure à celle des dalles précédentes.

La mesure de la porosité des dalles inférieures a ensuite été réalisée sur base d'une carotte de 8 cm de diamètre prélevée dans un des cubes disponibles (tableau16).

Tableau 16: Mesure de l'absorption des dalles inférieures

Echantillon	Masse saturée (g)	Masse sèche (g)	Absorption (%)	Porosité (%)
Dalle n°1	1715,3	1612,14	6,399	14,77
Dalle n°2	1776,13	1672,42	6,202	13,03

La porosité de ces dalles est nettement inférieure à la porosité des dalles de 2009 puisqu'on dénote une diminution moyenne de 7%. Cette différence de porosité risque de créer une différence dans les propriétés diélectriques entre les deux dalles, ce qui créerait alors une certaine réflexion à l'interface pouvant gêner notre analyse. Cela sera vérifié dans le chapitre 14.2 : « Propriétés électriques du béton »

### **13. Mesure du gradient**

#### **13.1. Choix et réalisation des capteurs**

Les différents capteurs d'humidité existants ont été décrits au chapitre 1.3 des rappels bibliographiques. Parmi ceux-ci, nous avons retenu les sondes hygrométriques car elles sont assez faciles à mettre en place et leur précision est suffisante pour ce qui est demandé.

Vu le nombre important de capteurs nécessaires à cette étude et vu le prix assez élevé des capteurs spécialement prévus pour le béton, nous avons préféré les fabriquer nous-mêmes, à partir de capteurs prévus pour les mesures dans l'air. Pour ce faire, nous nous sommes basés sur les indications fournies par Monsieur C. Sauvage ingénieur au Service Public de Wallonie (Direction Générale Opérationnelle "Routes et Bâtiments", Département des Expertises Techniques) ainsi que sur le document de Grasley (Grasley Z.C., 2004), qui décrit une adaptation pour béton de capteurs hygrométriques spécialement prévus pour des mesures dans l'air. Dans cette étude, réalisée au sein de l'université de l'Illinois, les capteurs étaient protégés par une membrane de Gore-Tex laissant passer la vapeur d'eau mais empêchant toute pénétration d'eau sous forme liquide. En effet, l'eau ainsi que les ions transportés peuvent induire des mesures erronées. Sur base de ce document, le SPW a lui aussi créé des capteurs hygrométriques pour l'étude de l'humidité dans quelques ouvrages. Les premiers résultats obtenus au sein de leur département laissent présager un bon fonctionnement de ces capteurs.

Etant donné la simplicité de la méthode, son faible coût, et les bons résultats qu'elle semble donner, nous avons suivi dans notre étude la même procédure et utilisé les mêmes capteurs que ceux du SPW. Les divers renseignements utiles à leurs montages m'ont été communiqués personnellement par Monsieur Sauvage.

### 13.1.1. Avantages et inconvénients des capteurs retenus

Les capteurs initiaux sont des capteurs EL-USB II de chez Lascar Electronics. Ceux-ci sont visibles sur la figure 77.



Figure 77: Illustration des capteurs EL-USB II initiaux

Le choix de ces capteurs ne s'est pas fait par hasard. En effet, une balance a été réalisée entre le prix, la précision voulue et les délais de livraison. De plus, les capteurs choisis présentaient un certain nombre d'avantages :

- ils enregistrent les données à un taux fixé par l'utilisateur, ce taux allant de 10 sec à 12 h. De plus, vu qu'ils disposent de leur propre mémoire, il n'est pas nécessaire de laisser un système d'acquisition externe du type ordinateur branché sur ceux-ci ;
- ils fonctionnent simplement sur piles, il ne faut pas disposer d'une prise de courant à proximité ;
- le programme d'extraction de données est fourni avec ceux-ci. De plus, le programme est simple d'utilisation et dispose d'une option d'extraction des résultats directement vers un fichier Excel ;
- ils disposent d'une bonne précision en terme d'humidité relative (HR) puisque celle-ci est de l'ordre de 3% HR pour un intervalle allant de 20% HR à 80% HR. Pour les valeurs extrêmes, la précision est légèrement moindre mais on ne dépasse jamais les 5% HR en terme d'erreur. Voici, en figure 78, un graphique résumant la performance des capteurs:

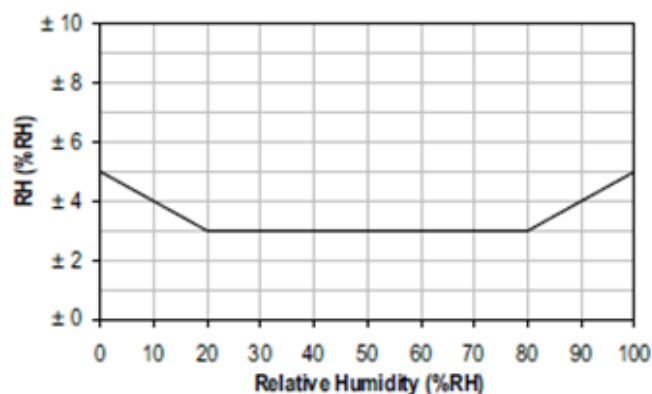


Figure 78: Précision des mesures d'humidité relative (Lascarelectronics, 2010)

- ils disposent d'une bonne précision en terme de température puisque comme nous pouvons le voir sur la figure 79, la précision dans la gamme de température qui nous concerne ( $\pm 20^{\circ}\text{C}$ ) est de  $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$  :

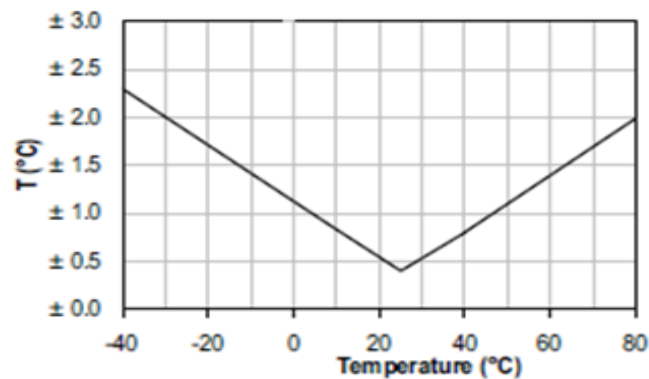


Figure 79: Précision des mesures de température (Lascarelectronics, 2010)

- ils sont peu onéreux vis-à-vis des systèmes prévus pour être directement placés dans le béton. En effet, le prix d'achat de ces capteurs s'élève à 69,10 € hors TVA (annexe 4). Nous avons réalisé des recherches sur le prix des capteurs adaptés pour le béton. Après renseignement auprès d'une firme, il s'est avéré que le système par sonde hygrométrique revenait à 5200 € hors TVA (pour 5 sondes récupérables). La firme a également fait une offre de prix pour un système du type capacitif utilisant directement le béton comme diélectrique. Ce système revenait à 8500 € hors TVA (prix comprenant 8 sondes non récupérables). Le prix des sondes s'élève dans cette deuxième technique à 300 € (cfr annexe 5).

Malheureusement comme tout système, les capteurs EL-USB II possèdent aussi un certain nombre de désavantages avec lesquels il faut travailler, ou pour lesquels il faut trouver une solution. On peut citer ces désavantages :

- ils sont initialement prévus pour mesurer l'humidité dans l'air, il faut donc s'arranger pour les adapter à une mesure dans le béton. Comme on va le voir dans le prochain paragraphe, l'adaptation comprendra non seulement une protection du capteur par une membrane Gore-Tex pour éviter les contacts avec de l'eau sous forme liquide, mais aussi un prolongement de la distance entre le système d'acquisition et le système de stockage des données ;
- ils donnent des valeurs en humidité relative.

La dernière remarque peut paraître anodine mais, comme dit précédemment dans la partie rappels bibliographiques, bon nombre de propriétés et de graphiques relatifs au béton sont exprimés en fonction de la teneur en eau. Il faut donc réaliser une courbe liant la teneur en eau de notre béton à l'humidité relative mesurée. Comme on a pu le voir, ce genre de courbe ne sera valable que pour notre seule dalle. Plus de détails sur cette problématique seront communiqués dans le point 14.2 : « Propriétés électriques du béton ».

### 13.1.2. Adaptation des capteurs

Les diverses adaptations ont pour but de faciliter l'utilisation de ces capteurs à l'étude qui nous intéresse. De plus, nous veillerons à les protéger d'une intrusion d'eau liquide et d'ions. Les étapes d'adaptation peuvent être résumées en quatre points:

- 1) séparation du système de stockage (clef USB) et du système de mesure (capteur) (figure 80a) ;
- 2) prolongement de la distance entre les deux systèmes (figure 80b) ;
- 3) protection du système de mesure par une membrane Gore-Tex ;
- 4) mise en place d'un système de fiche permettant la séparation du système d'acquisition et du système de stockage.



Figure 80 : Système de stockage des données (a) et système de mesure (b)

Les pastilles de Gore-Tex utilisées présentait une face collante, elles ont été placées en vis-à-vis afin de coincer le capteur entre elles. Le passage du câble a été étanchéifié au moyen de silicone liquide. La figure 81 présente un capteur prêt à être utilisé :

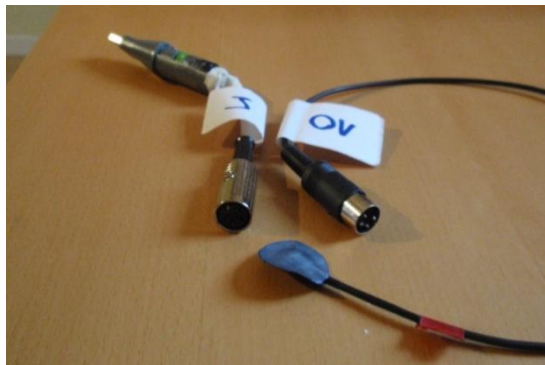


Figure 81: Capteur hygrométrique prêt à l'emploi dans le béton

### 13.2. Vérification du fonctionnement des capteurs modifiés

Les capteurs ayant été modifiés, nous avons décidé de vérifier leur fonctionnement avant la mise en place dans les dalles de béton. Pour ce faire, la totalité des capteurs ont été placés dans des pièces dont l'humidité relative de l'air est connue afin de vérifier si leurs réponses restent bien dans la plage de précision donnée par le fournisseur. Dans ce cas-ci, il a été décidé de réaliser une vérification de la précision de tous les capteurs à trois valeurs d'humidité relative différentes. Pour fixer la valeur de référence, un hygromètre présent au laboratoire des sciences appliqués (étalonné le 25/02/2011) a été utilisé. Le certificat d'étalonnage se trouve en annexe 6.

Les valeurs fournies par cet étalon ont été comparées aux valeurs de chacun de nos capteurs. Les trois enceintes choisies pour faire les tests sont : le laboratoire des mortiers de l'université de Liège, un bureau de cette même université ainsi qu'une chambre dont l'humidité relative est fixée à 90% au

moyen d'une solution de sulfate de Zinc saturée ( $ZnSO_4$ ). Dans le laboratoire, la qualité de l'air est constamment contrôlée et fixée à 21°C et 60% d'humidité relative. Dans la seconde enceinte, l'air y est plus sec et proche de 33% HR. Dans la troisième, comme on a pu le dire, l'humidité est de 90%.

### 13.2.1. Humidité relative

Lors de l'étude à 30 et à 60% HR, nous avons constaté que tous les capteurs présentaient une dérive positive de 3% HR. Cependant, l'écart maximal observé entre tous les capteurs est de l'ordre de 1 à 2% HR. Si on néglige la dérive, nous sommes donc bien dans la gamme de précision annoncée par le fournisseur puisque la différence reste inférieure à 3% HR. Par après, lorsque les tests à 90% HR ont été réalisés, nous avons constaté que cette dérive n'apparaissait plus. Effectivement, si on regarde la figure 82, on constate que les capteurs suivent clairement la tendance de l'étalon. Dans la zone finale (plus ou moins stabilisée), l'écart maximal entre ceux-ci est de maximum 3,5% HR. Nous sommes donc bien de nouveau dans l'intervalle annoncé par le fournisseur. On peut noter que deux capteurs étaient absents durant cette étude à 90% HR. Effectivement, ceux-ci étaient utilisés ailleurs. Cependant, vu qu'ils ont fait leurs preuves entre 30 et 60% HR comme tous les autres capteurs, on peut supposer que leur réponse aurait été correcte ici aussi.

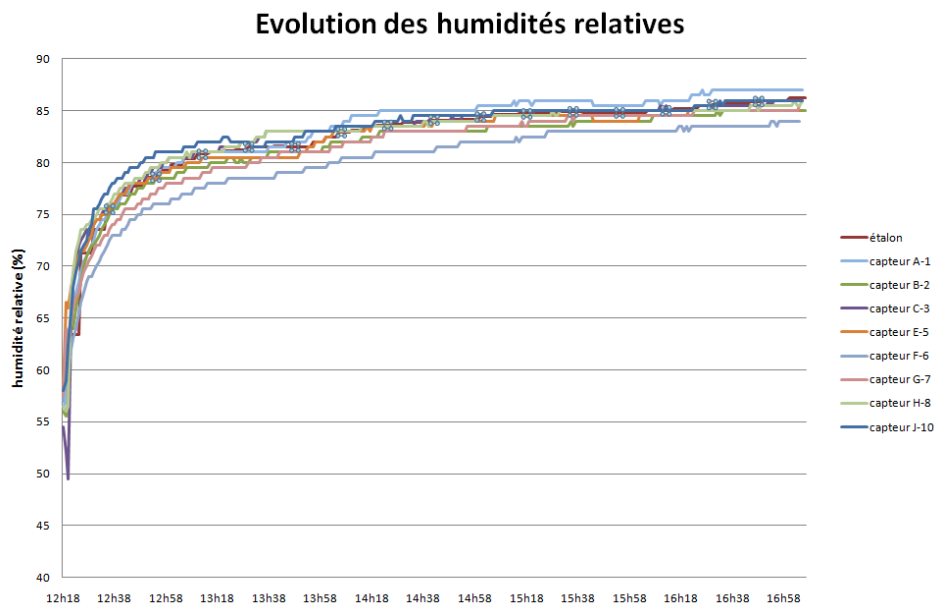


Figure 82: Evolution des humidités relatives dans la pièce à 90%HR

L'hypothèse retenue pour expliquer la dérive est la suivante : elle est due au séchage du silicone placé sur les soudures des capteurs. En fait, ce n'est pas le silicone en tant que tel qui pose problème mais plutôt le dégagement du solvant accompagnant cette réaction. Son effet sur le capteur n'est pas négligeable puisqu'en plaçant une sonde dans un pot hermétique contenant du silicone, il est possible de prouver que l'acide acétique dégagé lors de la réaction de celui-ci vient perturber la réponse du capteur en augmentant virtuellement l'humidité relative (annexe 8). Dans les deux premiers tests, les capteurs ont été testés directement après leur réalisation, c'est-à-dire quelques heures après la mise en place de la pastille de Gore-Tex et du silicone entourant la sortie du câble. Le silicone apparaît donc comme étant la source de cette dérive. Selon cette hypothèse, tous les capteurs fonctionnent en fait correctement et donnent des valeurs de température et d'humidité qui restent en terme de précision proches des grandeurs fournies par la firme Lascar. On peut noter que nous n'avons pas recommencé les tests d'étalonnages à 60% HR et à 30% HR puisque la courbe à

90% HR a été réalisée juste avant la mise en place des capteurs dans la dalle. Dès lors, lorsque nous avons analysé les résultats et vu que cette dérive avait disparu, il était trop tard pour recommencer les tests.

### 13.2.2. Température

En même temps que la mesure de l'humidité relative, les capteurs prenaient une mesure de la température de l'air. Ceux-ci nous ont fourni à  $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$  une réponse identique à celle donnée par l'étalon. Cette différence de  $0,5^{\circ}\text{C}$  correspond à leur précision d'affichage.

## 13.3. Mise en place dans les dalles

Comme vu dans la partie montage expérimental, il a été décidé de placer 5 capteurs par dalle. Bien entendu, la disposition n'est pas la même pour les deux configurations. Nous allons donc les reprendre individuellement.

### 13.3.1. Configuration n°1 (remontée capillaire)

Pour cette première configuration, nous avons décidé de placer les capteurs selon la configuration mise en évidence par la figure 83.

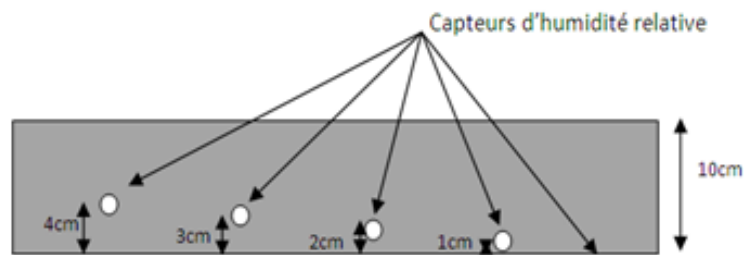


Figure 83: Disposition verticale des capteurs dans la configuration n°1

Il est peu vraisemblable que la remontée capillaire se fasse sur 10 cm. Dès lors pour cette configuration, nous avons concentré les mesures sur la première moitié inférieure de la dalle. Pour les différents forages, nous aurions bien voulu les réaliser par une des faces latérales de notre dalle. Cependant, en procédant de la sorte, il aurait été difficile d'assurer une précision en terme de profondeur car la moindre inclinaison aurait introduit une grande erreur. Nous avons donc opté pour un carottage par la face inférieure. Ensuite, en ce qui concerne la dimension, vu la taille des capteurs, il fallait au minimum un trou de 25 mm de diamètre. En ce qui concerne la géométrie latérale des forages, la configuration présentée par la figure 84 a été respectée.

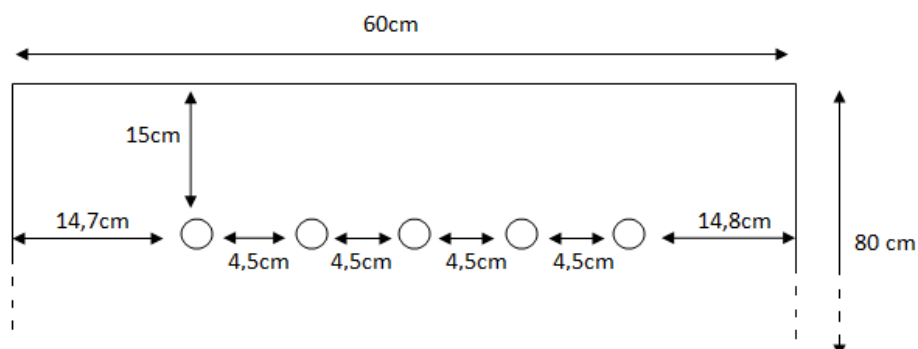


Figure 84: Disposition latérale des capteurs

Au final les capteurs ont été placés dans la dalle à l'aide d'un forage par voie sèche et les cavités ont quant à elles été rebouchées par silicone. Cependant, il faut savoir qu'initialement, nous avons réalisé les forages par voie humide au moyen d'une carotteuse et les cavités quant à elles avaient été remplies par un mortier de réparation du type « emaco nanocrete R4 » dont le retrait est très faible. Il s'est avéré que cette technique ne donnait pas de bons résultats puisque 15 jours après leur mise en place, tous les capteurs indiquaient 100% HR alors que nous nous étions attendus à avoir 60% HR.

Il est apparu à nos yeux trois explications possibles à cette valeur élevée d'humidité :

- 1) Nous avons introduit trop d'eau en rebouchant par de l'emaco.
- 2) Vu que les carottages ont été réalisés par voie humide, nous avons introduit de l'eau qui n'a pas eu l'occasion de sortir puisque les capteurs ont été placés directement après carottage.
- 3) L'humidité relative interne au béton est différente de l'humidité relative extérieure.

De nouveaux forages ont donc été réalisés sur le côté opposé de la dalle en essayant de ne pas refaire les erreurs précédentes. Pour l'anecdote, lors de l'opération de remplacement, deux capteurs à savoir le capteur G-7 et le capteur J-10 ont été abîmés. Pour ceux-ci il a fallu retirer l'élément sensible du capteur et en ressouder un nouveau. Il faudra donc dans la suite regarder les résultats fournis par ces deux capteurs d'un œil critique vu qu'ils n'ont pas été testés et comparés à un étalon.

Si on en revient aux nouveaux forages, comme annoncé, l'ensemble de ceux-ci ont été réalisés par voie sèche puisque dans l'annexe 9, nous renseignant sur l'apport d'eau due au forage, on constate que celle-ci n'est pas insignifiante. Ensuite, une fois ces forages réalisés, les capteurs ont été placés dans ces forages et une fine couche de silicone a été disposée au-dessus d'eux. Nous avons fait attention au fait que l'épaisseur de cette couche ne devait pas dépasser quelques millimètres puisqu'on peut voir en annexe 8 que l'influence du silicone sur la réponse du capteur n'est pas négligeable. Cependant, nous avons quand même préféré cette solution à celle de l'emaco puisque ce dernier reste un liant hydraulique apportant de l'eau. 24h après la pose de cette première couche servant de barrière étanche protégeant le capteur de l'acide acétique dégagé par la suite, on est venu remplir le reste de la cavité au moyen de silicone. Nous avons laissé sécher ce remplissage durant tout le week-end. Après 2 jours, nous avons vérifié l'humidité donnée par les sondes hygrométriques. Toutes les valeurs étaient aux alentours de 87% HR (+/- 2% HR). Cela peut paraître a priori trop élevé mais, comme nous pouvons le constater grâce au test placé en annexe 10, il semble que l'humidité relative au sein de ce béton ne soit pas de 60% HR mais bien de 94% HR. Ici, nous sommes donc sous ce niveau d'humidité et il faudrait, pour bien faire, attendre un retour à l'équilibre avant de faire les tests ; malheureusement, nous n'avons pas le temps d'attendre que les capteurs remontent. Cependant, la situation est déjà plus favorable que précédemment puisque ceux-ci ne sont plus à 100% HR. Cela laisse donc entrevoir la possibilité de pouvoir détecter la position de la zone humide. En effet, s'il y a une remontée capillaire d'eau, nous pouvons penser que les capteurs passeront à 100% HR si cette zone atteint ceux-ci. Il est bon de noter que dans la suite de ce travail, pour des raisons de compréhension, on garde la dénomination dalle à 60% HR pour caractériser celle-ci même s'il s'avère que l'humidité en son sein soit différente de cette valeur.

Finalement, une fois les capteurs installés, les faces latérales de la dalle supérieure ont été recouvertes par de la résine époxy afin de s'assurer qu'aucun échange d'humidité ne puisse avoir lieu pendant l'essai.

### 13.3.2. Configuration n°2 (séchage)

La configuration choisie pour le placement des capteurs est quelque peu différente de celle du cas précédent. En effet, ici, nous avons respecté le schéma de la figure 85 :

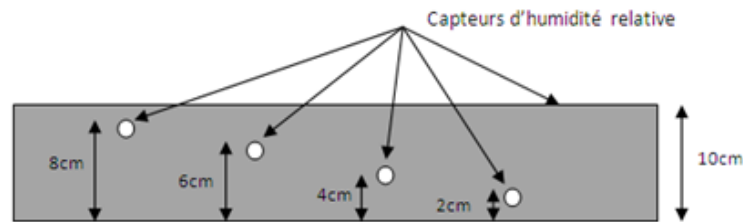


Figure 85: Disposition verticale des capteurs dans la configuration n°2

Il y a donc 4 capteurs placés dans la dalle et un capteur placé sur la surface supérieure de celle-ci. En ce qui concerne la répartition latérale, nous avons également utilisé le schéma présenté précédemment (figure 84). Ici, comme pour les premiers essais de la configuration précédente, les forages ont été réalisés par voie humide au moyen d'une carotteuse (figure 86a). De nouveau pour des raisons de précision, ils ont été réalisés sur la face inférieure de la dalle. Ensuite, les cavités ont été remplies par un mortier de réparation du type « emaco nanocrete R4 ». Finalement, une fois les capteurs mis en place, une résine époxy a également été appliquée sur les diverses surfaces latérales (figure 86b).



Figure 86: Réalisation des forages (a) et pose de la résine époxy sur les faces latérales des dalles (b)

Avant de placer les dalles tests sur les dalles saturées, les résultats donnés par les capteurs ont également été contrôlés. En terme de température, tous les capteurs ont indiqué une valeur allant de 20 à 20,5°C. Cela est logique puisque la chambre humide est réglée pour fournir une température constante de 20°C. Ce n'est pas les quelques heures pendant lesquelles la dalle est sortie qui ont changé les choses. Voyons ce qui se passe en termes d'humidité relative (figure 87) :

## Evolution des humidités relatives

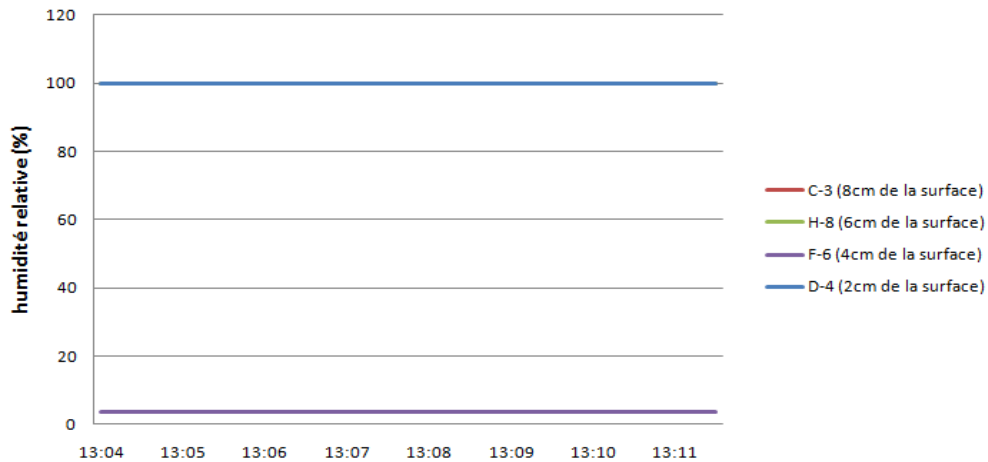


Figure 87 : Evolution des humidités relatives (dalle à 100%HR avant début des tests)

Trois des capteurs indiquaient logiquement que la dalle était à 100% HR. Cependant, le quatrième, situé à 4 cm de la surface, indiquait une humidité relative de 3,5% HR. Cette humidité est peu vraisemblable vu qu'il est très difficile d'atteindre de telles conditions d'humidité. On peut donc supposer que le capteur a eu un problème, et toutes les données mesurées ensuite par ce capteur risquent d'être corrompues.

### 14. Etude radar

Après avoir mis en évidence les divers problèmes dus au placement des sondes, et corrigé ceux-ci au maximum de nos possibilités, nous avons solidarisé les dalles aux dalles saturées et commencé les tests radar.

#### 14.1. Matériel utilisé

Pour les diverses expériences, le radar présent au laboratoire a été utilisé. Ce radar est composé d'une antenne de 2,3 GHz (figure 88a) et d'une unité de contrôle ProEx (figure 88b) achetées auprès de l'entreprise Malâ Geoscience.

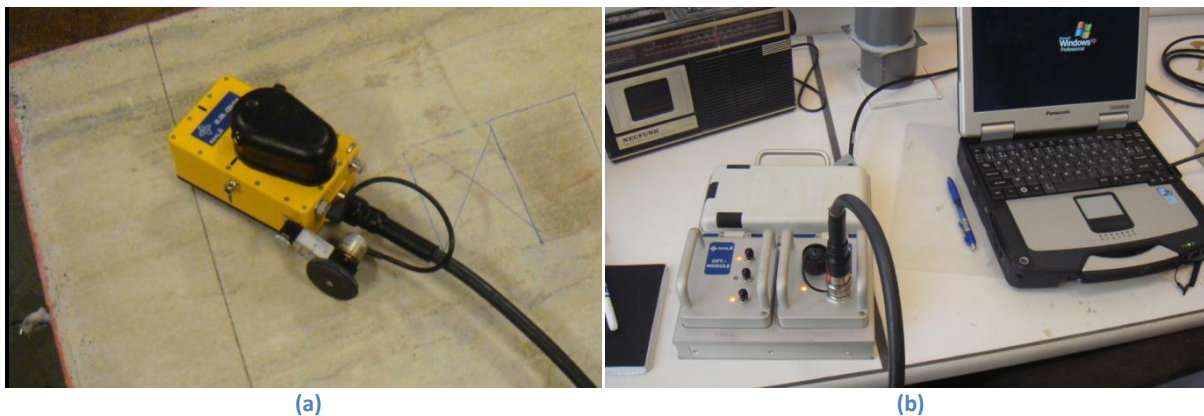


Figure 88: Antenne de 2,3 GHz (a) et unité de contrôle (b)

La haute fréquence de cette antenne permet d'obtenir une bonne résolution. Cette antenne est raccordée au moyen d'un câble à une unité de contrôle elle-même raccordée à un ordinateur portable équipé d'un programme d'acquisition (Ground Vision 2). L'antenne est composée d'un

émetteur et d'un récepteur tous deux placés dans une boîte blindée de 16 cm de long et de 11 cm de large. Le rôle de cette boîte consiste à limiter les interactions entre les signaux et d'éventuelles réflexions dans l'air. L'émetteur et le récepteur sont tous deux situés le long de l'axe longitudinal et séparés d'une distance de 4 cm.

## 14.2. Propriétés électriques du béton

Comme il a été vu dans le paragraphe 2.2 des rappels bibliographiques, deux grandes propriétés gouvernent la réponse du béton à un champ électromagnétique : la permittivité diélectrique et la conductivité électrique. Les courbes de Soustos (Soustos M.N., 2001) déjà rencontrées deux fois dans ce rapport (figures 27 et 39) nous donnaient les variations de ces propriétés en fonction de la teneur en eau. Or, ici, les capteurs donnent des renseignements en termes d'humidité relative ; il faut donc étudier le lien entre ces deux grandeurs. Cela fera l'objet de ce premier paragraphe. Le second quant à lui, étudiera la permittivité diélectrique de notre béton en fonction de l'humidité relative. A l'aide de ces deux paragraphes, il sera possible de comparer les résultats obtenus aux résultats de Soustos (Soustos M.N., 2001).

### 14.2.1. Étude du lien entre la teneur en eau et l'humidité relative

Pour réaliser cette étude, des petites chambres dans lesquelles règnent des conditions atmosphériques contrôlées ont été utilisées. Des échantillons de notre béton y ont été placés et nous les avons laissés se mettre en équilibre avec l'ambiance régnant dans la chambre. Une fois leurs masses stabilisées, ils ont été placés à l'étuve et à l'aide de leurs masses équilibrées et de leurs masses sèches, il a été possible de déterminer une teneur en eau associée à l'ambiance en question. La technique traditionnelle, la plus couramment utilisée pour contrôler l'humidité relative dans une large gamme de valeur, consiste à utiliser des solutions salines. En effet, leur utilisation s'avère simple et peu onéreuse. Young (Young J.F., 1967) explique que toute solution saline à une concentration définie et à une température fixée est en équilibre avec une pression partielle de vapeur d'eau. De par cet équilibre, nous avons donc une valeur d'humidité relative fixée. Il indique aussi qu'il est avantageux d'utiliser des solutions salines saturées (figure 89b) vu que celles-ci sont capables de libérer et d'absorber de grandes quantités d'eau, sans qu'il y ait un changement d'humidité. Les chambres dans lesquelles ont été placés nos capteurs, fonctionnaient selon ce principe de solution saline.

Les éprouvettes utilisées pour ce test sont identiques à celles du point 12.1, elles font 10 cm de côté et 8 mm d'épaisseur. Nous avons réalisé des fines plaquettes car, plus cette épaisseur est faible, plus vite l'équilibre est atteint. Cependant, il a quand même été décidé de ne pas descendre en dessous de la dimension du plus gros granulats qui est de 8mm. Vu le caractère non linéaire des courbes liant la teneur en eau à l'humidité relative (cf. figure 11 des rappels théoriques), il faut un certain nombre de points de mesure. Nous avons opté pour 6 points : le point 100% HR est obtenu grâce à la chambre humide et les cinq autres points répartis entre 0 et 100% sont obtenus par solution saline. Voici les solutions salines saturées utilisées et l'humidité relative qui leur est associée à 25°C:





Les solutions ont été choisies afin d'avoir des points de mesure correctement répartis entre 0 et 100% HR. Cela permettra d'obtenir une courbe assez précise de la teneur en eau en fonction de l'humidité relative. Une fois ces diverses solutions réalisées, nous les avons placées dans des petits caissons étanches illustrés par la figure 89a ci-dessous.



Figure 89: Caissons étanches (a) et solution saline saturée (b)

Avant de commencer les tests, nous avons vérifié que l'humidité au sein des caissons était proche de l'humidité espérée. Voici la valeur de l'humidité relative fournie par les capteurs :

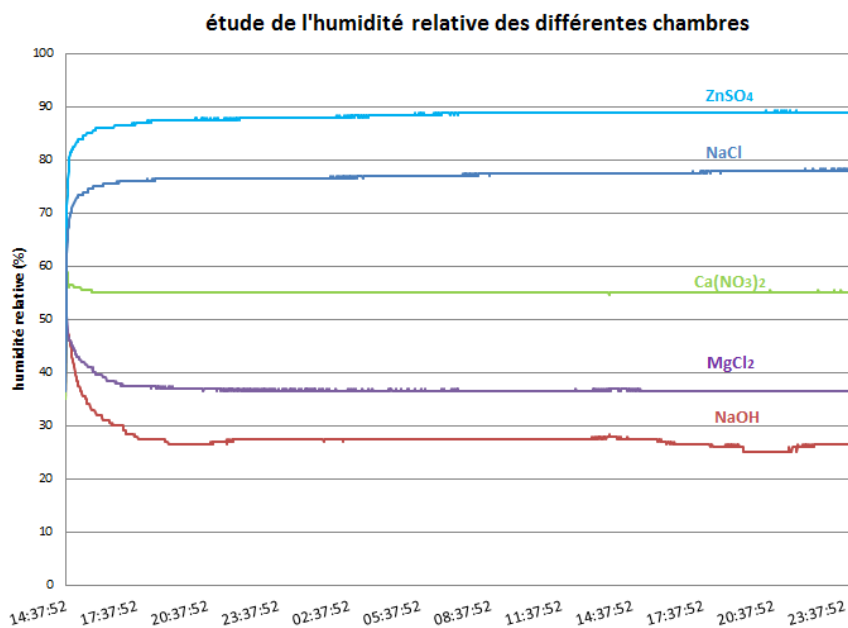


Figure 90: Evolution de l'humidité relative au sein des chambres

Sur la figure 90, il est possible de constater que les solutions de sulfate de zinc ( $\text{ZnSO}_4$ ), de chlorure de sodium ( $\text{NaCl}$ ), de nitrate de calcium ( $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ ) et de chlorure de magnésium ( $\text{MgCl}_2$ ) donnent des résultats très proches des valeurs théoriques escomptées. Les légères différences proviennent de la température puisque les valeurs fournies par Young (Young J.F., 1967) supposaient une température de 25°C. Or, dans le laboratoire, la température est plutôt aux alentours de 22°C. La solution d'hydroxyde de sodium ( $\text{NaOH}$ ) tourne quant à elle aux alentours de 25% HR. Premièrement, pour améliorer la situation, une nouvelle solution avec le moins d'eau possible a été

réalisée. Dans celle-ci, il y a donc énormément de *NaOH* en excès, qui captera l'eau de l'ambiance pour se mettre en solution, faisant ainsi chuter l'humidité relative. Deuxièmement, nous avons déplacé le caisson relatif au *NaOH* dans une pièce où l'ambiance extérieure est la plus sèche possible afin de limiter les éventuels défauts d'étanchéité des caissons. Après quelques essais, nous sommes arrivés à une solution stable à 6,5% HR.

Vu que toutes les solutions sont stables, nous pouvons venir placer l'ensemble des éprouvettes dans ces chambres pour commencer les tests. Afin d'obtenir quelque chose de représentatif, nous avons décidé de venir placer chaque fois trois éprouvettes par chambre pour pouvoir réaliser une moyenne sur ces trois valeurs. Le tableau 17 récapitule les différentes valeurs trouvées.

Tableau 17: Teneur en eau des divers échantillons en fonction de l'humidité relative

N° de l'éprouvette	RH (théorique)	RH mesurée (%)	Masse stabilisée (g)	Masse sèche(g)	Teneur en eau (%)
1	NaOH (7%)	6	177,97	175,88	1,188
2	NaOH (7%)	6	175,31	173,24	1,195
3	NaOH (7%)	6	176,36	174,26	1,205
4	MgCl <sub>2</sub> (33%)	37	181,93	179,05	1,608
5	MgCl <sub>2</sub> (33%)	37	185,71	182,77	1,609
6	MgCl <sub>2</sub> (33%)	37	166,98	164,32	1,619
7	Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> (56%)	55	177,38	171,72	3,296
8	Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> (56%)	55	180,83	175,05	3,302
9	Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> (56%)	55	182,65	176,85	3,280
10	NaCl (75%)	79	185,95	176,1	5,593
11	NaCl (75%)	79	181,38	171,7	5,637
12	NaCl (75%)	79	186,79	176,61	5,764
13	ZnSo <sub>4</sub> (90%)	90	198,66	184,58	7,628
14	ZnSo <sub>4</sub> (90%)	90	187,85	174,39	7,718
15	ZnSo <sub>4</sub> (90%)	90	191,49	177,45	7,912

Si, pour chaque chambre, nous prenons la moyenne de la teneur en eau mesurée sur base des trois échantillons, nous pouvons tracer le graphique recherché (figure 91).

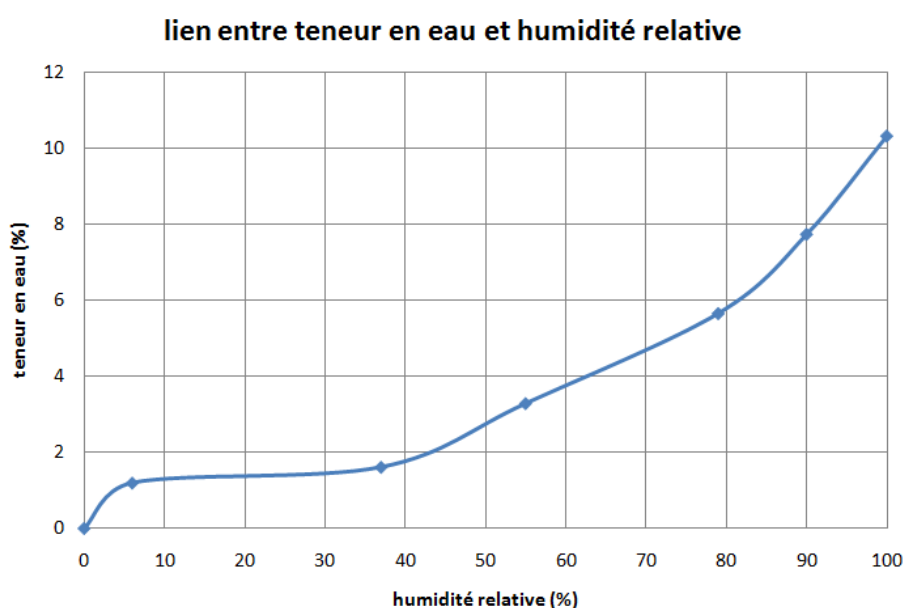


Figure 91: Teneur en eau en fonction de l'humidité relative

La courbe de la figure 91 ne vaut bien entendu que pour le béton composant les dalles de 2009. Si la composition avait différé quelque peu, il est vraisemblable que cette courbe aurait été différente.

#### 14.2.2. Étude de la permittivité diélectrique fonction de la teneur en eau

Pour déterminer la permittivité diélectrique à l'aide de mesures statiques, il existe deux solutions : soit on se base sur la vitesse de propagation de l'onde, soit sur le coefficient de réflexion. Ci-dessous je ne développerai que la méthode basée sur la vitesse de propagation de l'onde. En effet, par la méthode par coefficient de réflexion, il est difficile d'obtenir de bons résultats sur une dalle humide puisque l'humidité de surface change rapidement en fonction du contexte extérieur. J'ai donc laissé un exemple de la procédure en annexe 7, mais elle ne sera pas reprise dans le corps du texte.

##### Méthode basée sur la vitesse

Pour cette méthode, nous avons réalisé une mesure radar en plaçant celui-ci en contact avec la dalle dont nous voulions déterminer les propriétés. Ensuite, nous avons directement réalisé une mesure de l'onde se propageant dans l'air. Il suffit de superposer ces deux courbes et de mesurer le temps séparant le pic de réflexion du pic de l'onde directe. Connaissant ce temps de propagation et connaissant l'épaisseur de la dalle, nous en déduisons une vitesse et donc une permittivité moyenne. Pour réaliser une réflexion la plus visible possible, nous avons placé une feuille métallique sous la dalle afin de s'assurer que toute l'énergie de l'onde soit réfléchi. Pour plus de précision, nous pouvons aussi essayer de déterminer l'onde qui se propagerait dans une dalle infinie. En effet, si on connaît cette onde, il suffit de venir la soustraire à l'onde mesurée par contact sur le béton, pour mettre en évidence le pic correspondant à la réflexion de l'onde sur la base de la dalle puisque, théoriquement, le reste du signal devrait être identique. Cependant, on voit apparaître ici la difficulté de l'approche expérimentale car il est impossible de réaliser une dalle infinie. Pour essayer de simuler celle-ci, nous pouvons placer deux dalles dont les propriétés et les caractéristiques sont similaires l'une sur l'autre. Dans le cas où les dalles sont à saturation, nous pouvons placer une fine couche de mortier entre celles-ci afin d'éviter l'apparition d'une réflexion qui serait la conséquence de la couche d'air due aux irrégularités. Pour la dalle à 60% HR, il est malheureusement impossible d'obtenir une onde directe sans réflexion sur cette couche d'air. Il reste donc à espérer que la réflexion apparaisse de manière claire sans réaliser cette opération.

Nous allons étudier le cas de la dalle de 2009 à 100% HR. Vu que le radar que l'on a utilisé voit son onde directe changer au cours du temps, il était nécessaire de réaliser avant analyse une certaine correction des signaux (figure 92a). Premièrement, nous devons enlever la dérive de ceux-ci ; pour cela il suffisait de venir soustraire à l'ensemble des points la valeur moyenne des signaux. Ensuite, nous devons nous assurer que les graphiques se superposaient correctement. Si ce n'était pas le cas, nous venions réaliser un décalage pour assurer une superposition parfaite de ceux-ci (figure 92b).

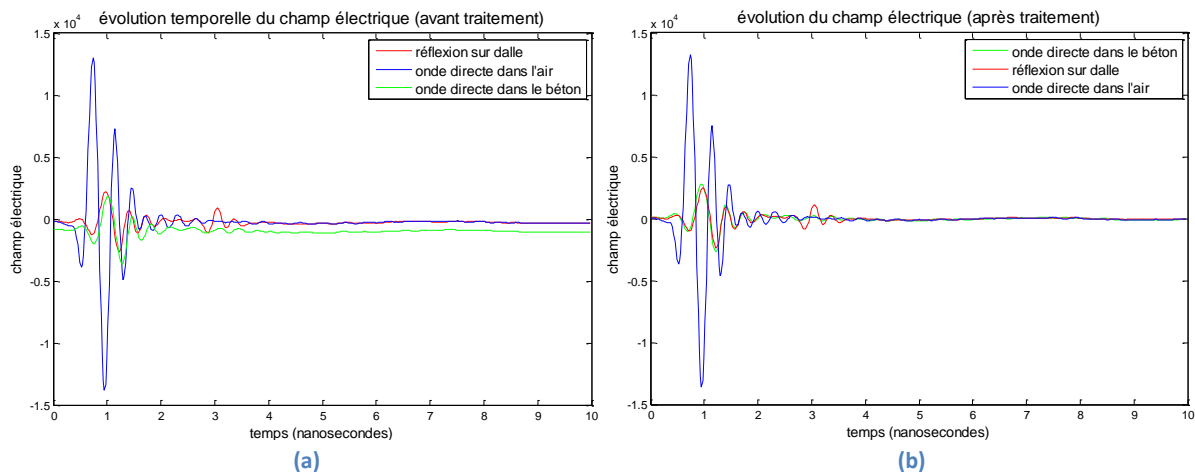


Figure 92: Détermination de la vitesse de propagation de l'onde avant (a) et après (b) traitement des signaux

Si on réalise un agrandissement de la zone qui nous intéresse, voici ce que nous obtenons :

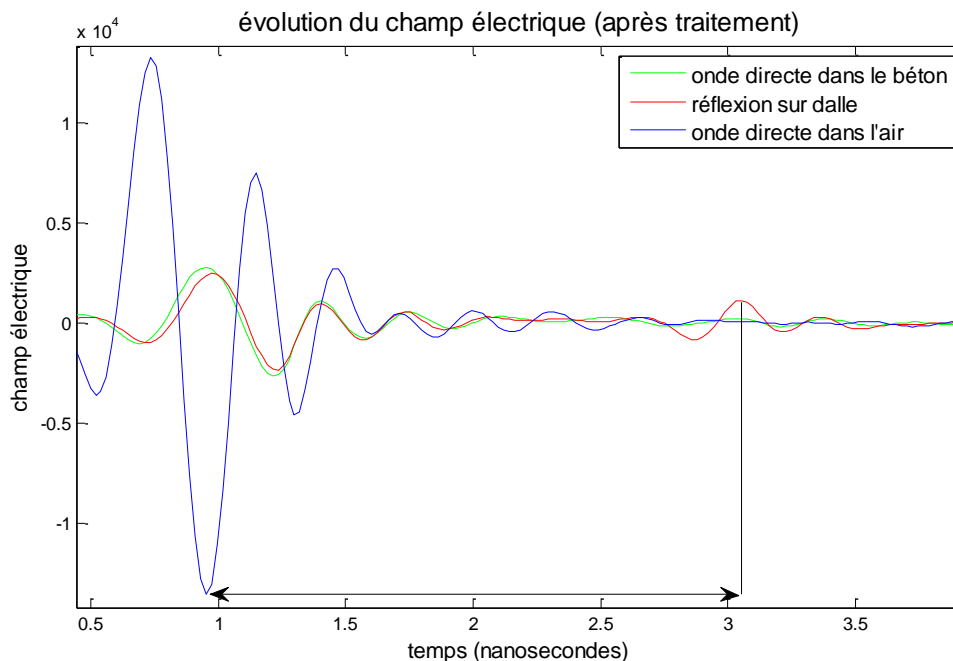


Figure 93: Temps de propagation de l'onde dans la dalle humide de 2009

On voit clairement apparaitre sur la figure 93 le pic de réflexion en comparant la courbe rouge (réflexion sur dalle) et la courbe verte (onde directe dans le béton). On peut signaler que nous n'arrivons pas à totalement superposer ces deux graphiques car ils ont été pris à des temps différents et donc, la forme du signal est quelque peu différente. Cependant, dans le cas qui nous concerne, ce n'est pas grave puisque l'intérêt de cette onde directe consiste uniquement à mettre en évidence la zone de réflexion.

Si nous mesurons graphiquement le délai temporel entre l'onde directe et la réflexion sur la base de la dalle, nous obtenons  $t = 2,1 \text{ ns}$ . A ce délai on ajoute le délai nécessaire à la propagation de l'onde entre les deux antennes, soit  $4/30 = 0,133 \text{ ns}$  puisque les deux antennes sont distantes de 4 cm. On obtient ainsi le délai total qui est de :

$$\Delta t = 2,1 + \frac{4}{30} = 2,233 \text{ ns} \quad (102)$$

Nous connaissons l'épaisseur de la dalle puisque nous l'avons mesurée à l'aide d'un pied à coulisse. Son épaisseur moyenne ( $h$ ) était de 10,14 mm. Le chemin parcouru par l'onde est donc égal à :

$$\Delta x = 2 * \sqrt{\left(h^2 + \left(\frac{4}{2}\right)^2\right)} = 20,674 \text{ mm} \quad (103)$$

De là, nous pouvons tirer la valeur de la vitesse :

$$v = \frac{20,674}{\Delta t} = 9,257 \text{ cm/ns} \quad (104)$$

Et enfin, sur base de la vitesse, on détermine la permittivité diélectrique :

$$\varepsilon'_r = \frac{c^2}{v^2} = 10,5 \quad (105)$$

Si nous faisons de même pour les deux autres dalles, nous trouvons les valeurs reprises dans le tableau 18 ci-dessous :

**Tableau 18: Détermination de la permittivité diélectrique des divers bétons**

	Dalle 2009 (60% HR)	Dalle 2009 (100% HR)	Dalle 2011 (100% HR)
$\Delta x$ (mm)	20,585	20,674	18,117
$\Delta t$ (ns)	1,9643	2,2333	1,8
vitesse (cm/ns)	10,48	9,257	10,061
$\varepsilon'_r$	8,195	10,50	8,89

Les valeurs que nous avons obtenues ici sont des valeurs moyennes sur l'épaisseur de la dalle. Malheureusement, on observe que la permittivité de la dalle de 2011 est proche de la permittivité de la dalle à 60% HR. Cela n'est bien évidemment pas une bonne chose en soi, puisque nous voulions avoir au départ une interface nette entre les deux matériaux. Or, au vu des résultats obtenus ici, il pourrait s'avérer que l'interface ne soit pas aussi claire qu'escompté puisque les propriétés de ces deux dalles sont relativement proches. Il faudra regarder dans la partie 4.4 : « résultats », si nous arrivons quand même à voir quelque chose. En ce qui concerne l'autre configuration, nous pourrions voir apparaître une interface due à la superposition de la dalle de 2009 à 100% HR et de la dalle de 2011. Initialement, cette interface ne devrait pas être présente mais il y a de grandes chances pour que celle-ci soit visible dans la partie expérimentale. Il faudra donc faire attention à l'interprétation des résultats dans ce chapitre.

#### 14.2.3. Comparaison avec les courbes de Soustos (2001)

En ce qui concerne la dalle de 2009, nous avons déjà les propriétés de celle-ci à 60% HR et à 100% HR. Si nous réalisons une étude de la permittivité d'un morceau de dalle placé à l'étuve, nous aurons un troisième point de mesure, à savoir le point correspondant à une humidité relative nulle. A l'aide de ces trois mesures et à l'aide de la courbe liant la teneur en eau à l'humidité relative, nous pouvons réaliser une courbe similaire à celle de Soustos (Soustos M.N., 2001) qui lie la variation de la permittivité en fonction de la teneur en eau. Nous obtenons la figure 94b :

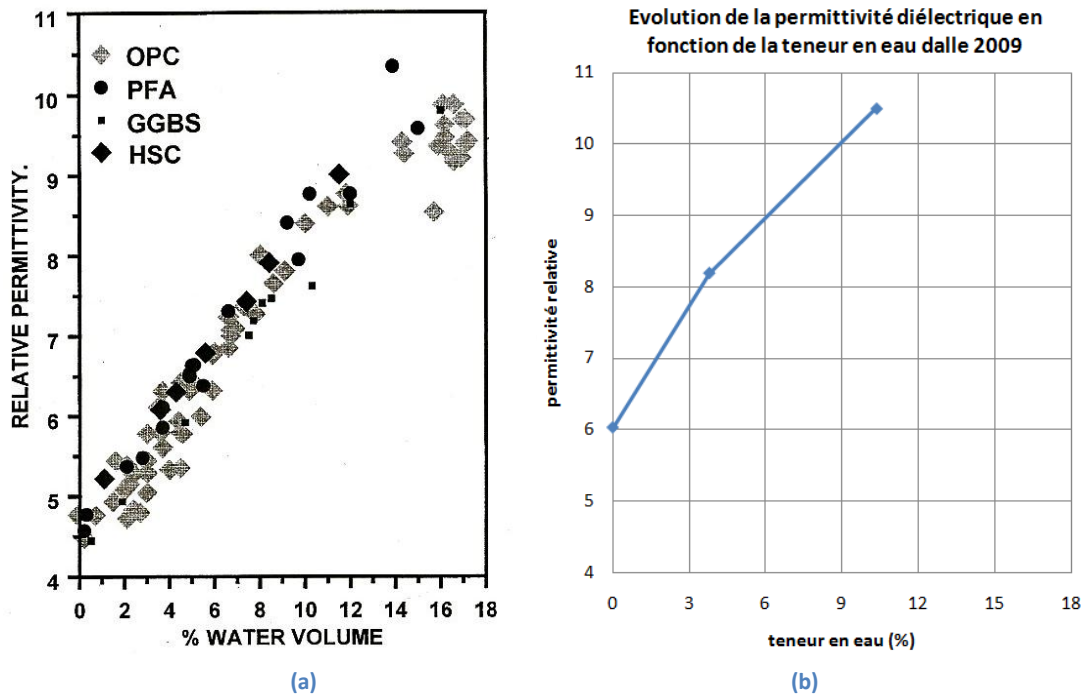


Figure 94 : Comparaison des courbes liant la teneur en eau à la permittivité diélectrique (modifié d'après Soustos M.N., 2001)

Les trois points s'alignent relativement bien et on retrouve donc bien la tendance mise en avant par Soustos (Soustos M.N., 2001). Cependant, en moyenne les valeurs que nous obtenons sont plus importantes que celles obtenues par ce dernier. On peut noter qu'il avait pu mettre en évidence une augmentation progressive des valeurs avec l'âge du béton. Il faut donc peut-être chercher l'origine de cette dérive de ce côté. Malheureusement, son document ne détaille pas plus cette augmentation, et de plus, il ne nous renseigne pas sur l'âge des éprouvettes lors des tests ayant conduit à la formation des courbes précédentes. Je ne peux donc laisser cette affirmation qu'à l'état d'hypothèse.

### 14.3. Protocole des essais sur dalle

Pour bien suivre la dynamique du problème, nous avons pris dans un premier temps des mesures statiques rapprochées et progressivement, nous avons éloigné temporellement nos mesures. Entre deux mesures nous rechargeons la batterie et nous rallumons le radar cinq minutes avant la prise de mesure. En effet, le signal émis par le radar n'est pas constant dans le temps. Afin de simplifier l'analyse, nous avons essayé de garder un intervalle temporel constant entre l'allumage et la prise de mesure.

Lors de l'analyse de cette configuration, nous nous sommes rendus compte que le signal émis par le radar variait aussi en fonction du niveau de la batterie. Pour la seconde dalle, nous avons espacé un peu plus les mesures et ce afin de s'assurer que la batterie soit toujours rechargée au maximum avant de faire une mesure. De la sorte, nous diminuons le plus possible les variations du signal qui ne sont pas intéressantes pour nous. En ce qui concerne le décalage temporel entre l'allumage et la prise de mesure pour cette configuration, nous avons réalisé les tests après un temps de « chauffage » de 6 min, afin de pouvoir réaliser alternativement une mesure sur la configuration n°2 et ensuite une mesure sur la configuration n°1.

On peut aussi noter que nous avons réalisé tous les jours, un profil le long d'une droite passant au-dessus des capteurs et ce pour les deux configurations. Même si initialement ce test n'était pas prévu dans le protocole, il pourrait être intéressant d'analyser l'évolution des tels résultats et de les comparer aux résultats des mesures statiques.

## 15. Résultats

Pour respecter le schéma suivi dans la partie modélisation, nous allons analyser de manière séparée les résultats obtenus pour la première configuration (formation d'un gradient par remontée capillaire) et pour la seconde configuration (formation d'un gradient par séchage).

### 15.1. Configuration n°1 (remontée capillaire)

Pour rappel, dans cette configuration, nous sommes venus placer une dalle supposée être à 60%HR sur une dalle saturée ; de cette manière, nous espérons qu'un gradient se forme, gradient dont il faut chercher l'origine dans la remontée capillaire de l'eau présent dans la dalle saturée. Voici la réponse des capteurs sur les deux semaines de tests:

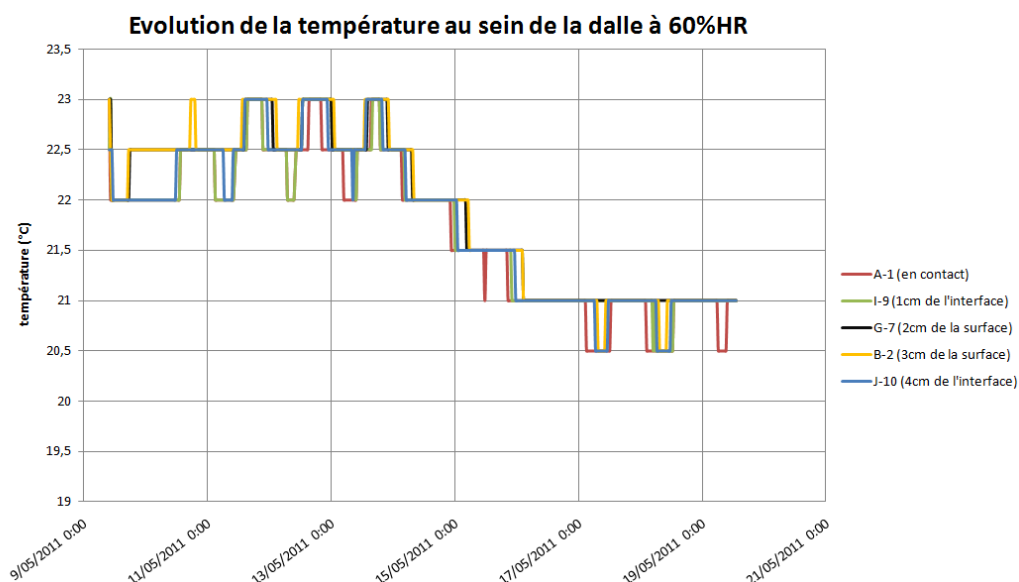
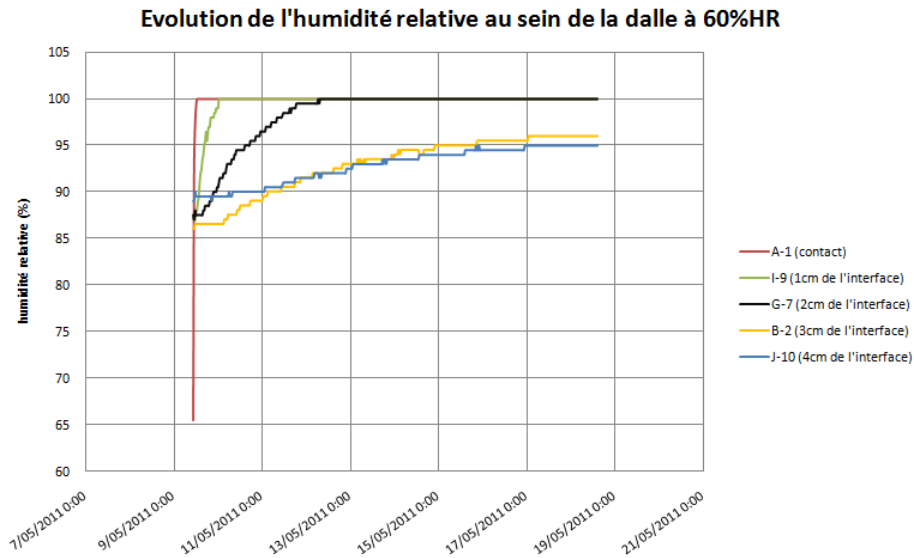


Figure 95: Evolution de la température au sein de la dalle à 60% HR

Sur le graphique de la température (figure 95), on voit apparaître des cycles de variation de celle-ci en fonction du temps. Nous pouvons simplement corréler ces variations à l'apport solaire. En effet, le laboratoire est muni de deux grandes fenêtres. Il est donc logique de constater que durant la journée, à cause du gain solaire apporté par les fenêtres, la température augmente, et progressivement durant la nuit celle-ci redescend. La première semaine de test a été particulièrement ensoleillée par rapport à la deuxième semaine, c'est ce qui explique pourquoi nous observons cette descente de température à partir du 15 mai. Vérifions maintenant la réponse des capteurs en termes d'humidité :



**Figure 96: Evolution de l'humidité au sein de la dalle à 60% HR**

Sur ce dernier graphique (figure 96), on constate une évolution logique des trois premiers capteurs en fonction du temps puisque le capteur situé le plus loin de l'interface est celui qui présente l'évolution la plus lente, tandis que celui de surface est de loin le plus rapide. Vu que ces trois capteurs montent rapidement jusqu'à 100% HR, nous sommes certains que leur montée est essentiellement due à la remontée capillaire. En ce qui concerne le capteur B-2 et J-10 c'est-à-dire ceux qui sont les plus éloignés de l'interface cela n'est plus aussi sûr. En effet, on constate qu'ils se stabilisent aux alentours de 95% HR ce qui correspondrait au vu des analyses de l'annexe 10 : « étude de l'humidité au sein d'un forage par voie sèche », à l'humidité donnée par un capteur placé au cœur de la dalle. Il est donc possible que leur évolution soit due en fait à une remise à l'équilibre de cette humidité.

Cette difficulté d'analyse existe car nous avons dû commencer les tests avec des capteurs qui n'étaient pas encore stabilisés. Pour nous aider, nous avons réalisé en annexe de l'expérience principale un test de remontée capillaire sur une carotte de ce même béton. Nous avons donc placé dans un récipient de l'eau colorée au bleu de méthylène. Ensuite, nous sommes venus placer la carotte dans ce même récipient. Le fond de la carotte, c'est-à-dire 1 à 2 mm du pied de celle-ci était plongé dans l'eau et tous les jours nous venions nous assurer de la présence d'une fine lame d'eau le recouvrant. Dès le lendemain des tests, la remontée capillaire en certains endroits atteignait presque les 2 cm. Quelques jours plus tard, nous arrivions à certains endroits à 2,5 cm. Cela nous encourage à penser que le capteur situé à 4 cm de l'interface n'est pas influencé par la remontée capillaire. Son évolution correspondrait donc simplement à une remise à l'équilibre du milieu. Par contre, en ce qui concerne le capteur situé à 3 cm, il est impossible d'affirmer que la remontée capillaire ne l'affecte pas, surtout dans les derniers jours. Cela expliquerait pourquoi celui-ci arrive un peu plus haut que les 95% HR du capteur J-10.

Ces remarques en tête, nous allons dans un premier temps, regarder l'évolution de l'onde radar perçue la première journée. A côté de ce premier graphique (figure 97a), nous allons venir placer l'évolution de l'humidité donnée par les capteurs en fonction de la profondeur (figure 97b). Pour tracer des profils facilement lisibles, il est nécessaire de venir remettre chaque capteur sur une même base. En effet, sur la figure 96, nous avons vu par exemple que le capteur J-10 nous donnait initialement une humidité relative de 89% HR alors que le capteur B-2 situé juste en dessous de ce

dernier nous donnait la valeur la plus faible c'est-à-dire 86% HR. Pour pouvoir comparer les profils entre eux, nous allons considérer qu'initialement la dalle supérieure était équilibrée à 86,5% HR. Si un capteur donne une valeur différente, nous viendrons rajouter à chacune de ses valeurs, la différence entre la première valeur de celui-ci et la valeur de référence.

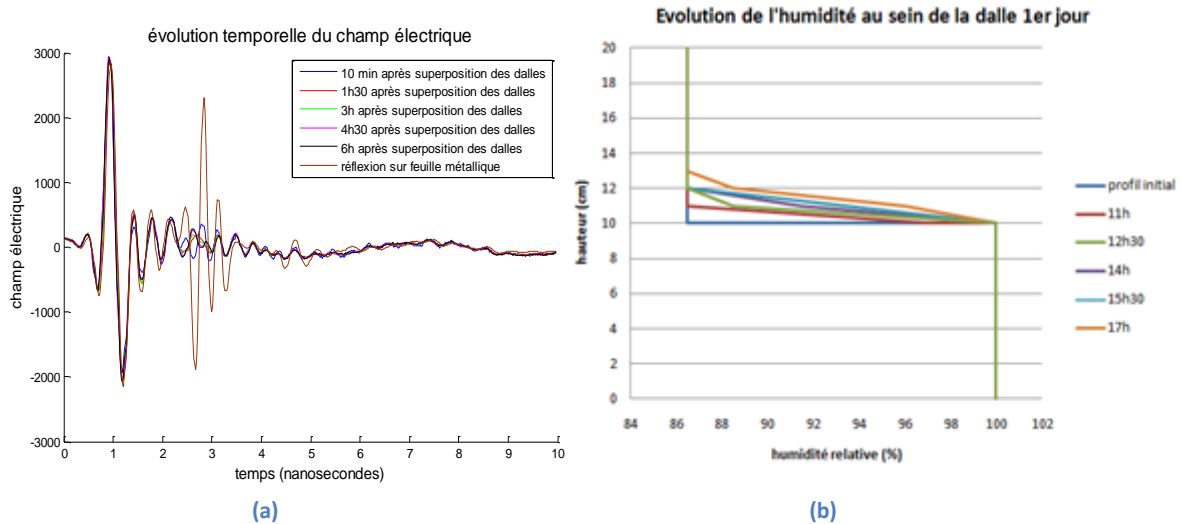


Figure 97: Comparaison entre le signal radar (a) et le profil d'humidité (b) (configuration n°1, premier jour)

Si on regarde la figure 97a, la première chose à noter concerne la forme de l'évolution du champ électrique. En pratique, le signal reçu est beaucoup plus complexe que les beaux signaux théoriques obtenus par modélisation. Cependant, malgré leur complexité, on peut quand même voir sur le graphique de gauche que les différents signaux se superposent assez bien. Comme on a pu l'expliquer précédemment, il a fallu pour cela réaliser une certaine correction des signaux bruts. En effet, on a dû corriger notamment leur dérive moyenne. Ici, nous n'avons affiché que les résultats post-traitement.

De plus sur cette figure 97a, on constate qu'il y a juste une zone aux alentours de la 3<sup>ème</sup> nanoseconde pour laquelle on constate une évolution du signal en fonction de l'heure puisque le reste du signal se superpose presque parfaitement peu importe l'heure de la journée. Il est possible de vérifier que cette zone de variation correspond au signal réfléchi à l'interface. Pour cela, il suffit de regarder le graphique obtenu en venant placer une feuille métallique sous la première dalle. Bien entendu, ce test a été réalisé avant le début de l'expérience principale. Voici le graphique que nous avons obtenu :

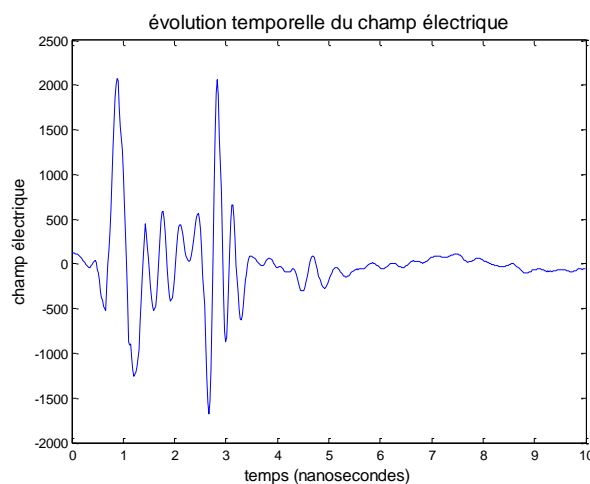


Figure 98: Mise en évidence de la position du pic de réflexion (dalle à 60% HR)

Ce dernier graphique (figure 98) confirme bien les précédentes affirmations. Si on en revient à la figure 97b, représentant l'évolution de l'humidité au sein de la dalle, nous voyons qu'initialement, nous partons d'une interface franche. Progressivement, nous voyons une zone de transition se créer. Vers 11h, la variation de l'humidité est encore assez franche. 1h30 plus tard, la zone de transition s'est légèrement épaissie puisque le capteur situé à 1 cm voit son humidité relative augmenter. Vers 17h, on constate que l'humidité augmente au capteur situé à 2 cm. Globalement, on voit donc que durant cette première journée, on a eu une remontée capillaire assez rapide puisqu'en fin de journée, nous avons déjà une zone de transition supérieure à deux centimètres. Si on réalise un agrandissement sur la figure 97a nous donnant l'évolution du champ électrique en fonction du temps, pour la zone qui nous intéresse, voici ce que nous obtenons :

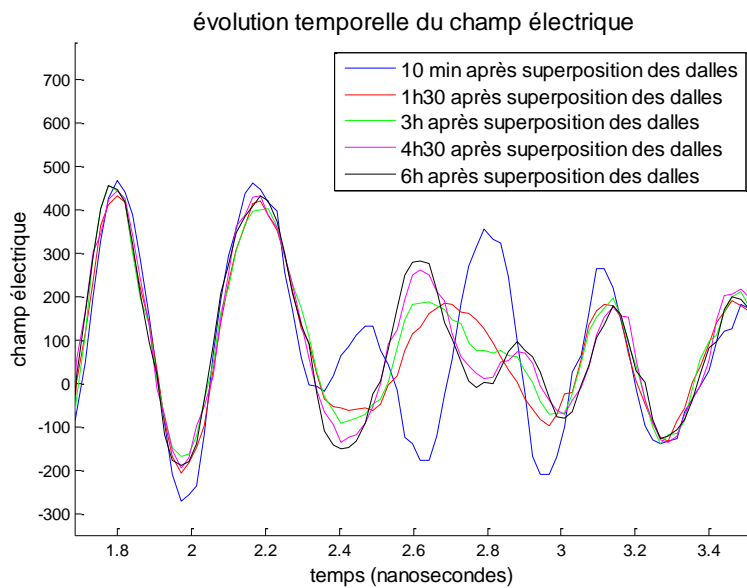


Figure 99: Agrandissement sur le pic dû à l'interface entre les deux dalles (configuration n°1, premier jour)

Sur cet agrandissement (figure 99), on constate que le signal en bleu correspondant à la mesure réalisée 10 minute après pose de la dalle, s'éloigne assez clairement des autres signaux. Contrairement à ce que l'on aurait pensé en lisant le chapitre 14.2 relatif à l'étude de la permittivité diélectrique des dalles, il apparaît ici une interface assez claire entre les deux dalles. Maintenant, il est difficile de dire si cette interface est l'œuvre du mortier ou bien si elle est due à la légère différence des propriétés entre les deux dalles. En effet, nous ne connaissons pas vraiment les propriétés diélectriques du mortier frais et il est possible que c'est cette fine couche qui crée cette réflexion.

Si on en revient à l'étude du signal bleu, il est donc possible sur base de celui-ci de distinguer une interface. En effet, a priori la forme de l'onde émise par le radar devrait se rapprocher d'une sinusoïde dont l'amplitude décroît en fonction du temps. Ici, le signal bleu présente un comportement allant dans ce sens jusqu'à la 2,4<sup>ème</sup> nanosecondes où on constate une modification claire de la tendance. Théoriquement, vu les profils obtenus par les capteurs, plus le temps va passer, plus la zone de transition s'accroît. Au vu de la discussion du chapitre modélisation, l'influence de cette interface devrait donc diminuer et on devrait se rapprocher progressivement d'une onde se propageant dans un milieu isotrope. Cela se traduirait ici par une onde qui devrait se rapprocher de plus en plus d'une sinusoïde. Si on regarde les résultats obtenus, c'est bien ce que l'on observe,

l'influence de la zone de transition se fait de moins en moins ressentir au cours de la journée. Regardons maintenant l'évolution du signal sur plusieurs jours :

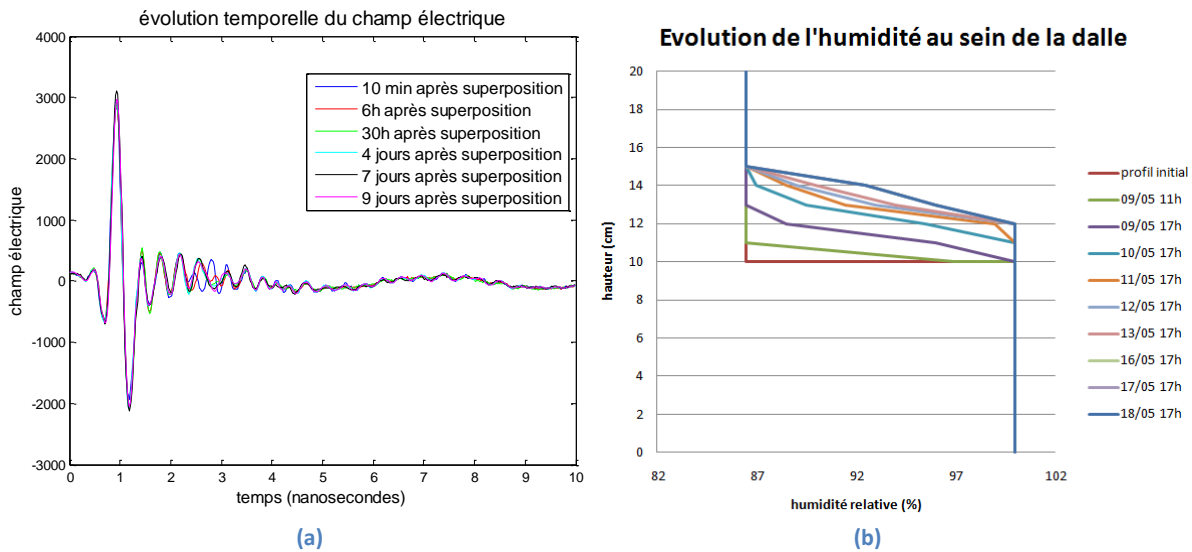


Figure 100: Comparaison entre le signal radar (a) et le profil d'humidité (b) (configuration n°1, 9 jours)

Sur la figure 100b, on observe que dès le lendemain du jour correspondant au début du test, la zone de transition a presque atteint les 3 cm. Dès le lendemain du début des tests, le premier centimètre est complètement saturé en eau, tandis que les capteurs placés à 3 et à 4 cm commencent à voir leur humidité varier. A partir de cet instant, il devient difficile d'analyser les courbes obtenues puisque on n'est pas certain que l'évolution du capteur placé à 3 cm soit déjà l'œuvre de la remontée capillaire. Il faut garder à l'esprit la possible interaction due au séchage du silicone ainsi que l'interaction due à la remise à l'équilibre de l'humidité au sein du béton. Malheureusement il est difficile de dissocier leurs impacts respectifs à long terme. Ici, nous sommes juste capables de tracer les profils dus à la somme de ces interactions. Sur ceux-ci, on constate qu'après le 10 mai, il n'y a plus de grandes variations dans la pente des droites mais on observe que la zone de transition remonte progressivement. Au final, on constate donc qu'au cours du temps, l'épaisseur de la zone de transition augmente rapidement au cours de la première journée. Ensuite, on observe une stabilisation progressive de l'épaisseur de cette zone accompagnée d'une remontée de celle-ci dans la dalle. Au risque de se répéter, il faut rester prudent puisqu'à l'heure actuelle, on ne sait pas affirmer de manière certaine que cette évolution de l'humidité au sein des capteurs soit due à la remontée capillaire. Pour être certain des résultats, il aurait fallu disposer d'un autre système de mesure de l'humidité insensible au silicone. De plus il aurait fallu attendre la stabilisation des diverses mesures avant le début de l'expérience. Malheureusement il était impossible de changer de capteurs ni d'attendre plus longtemps avant le début des tests.

Si on en vient à l'analyse de l'évolution du champ électrique (figure 100a), comme précédemment, il peut être intéressant de venir réaliser un agrandissement de la zone de réflexion :

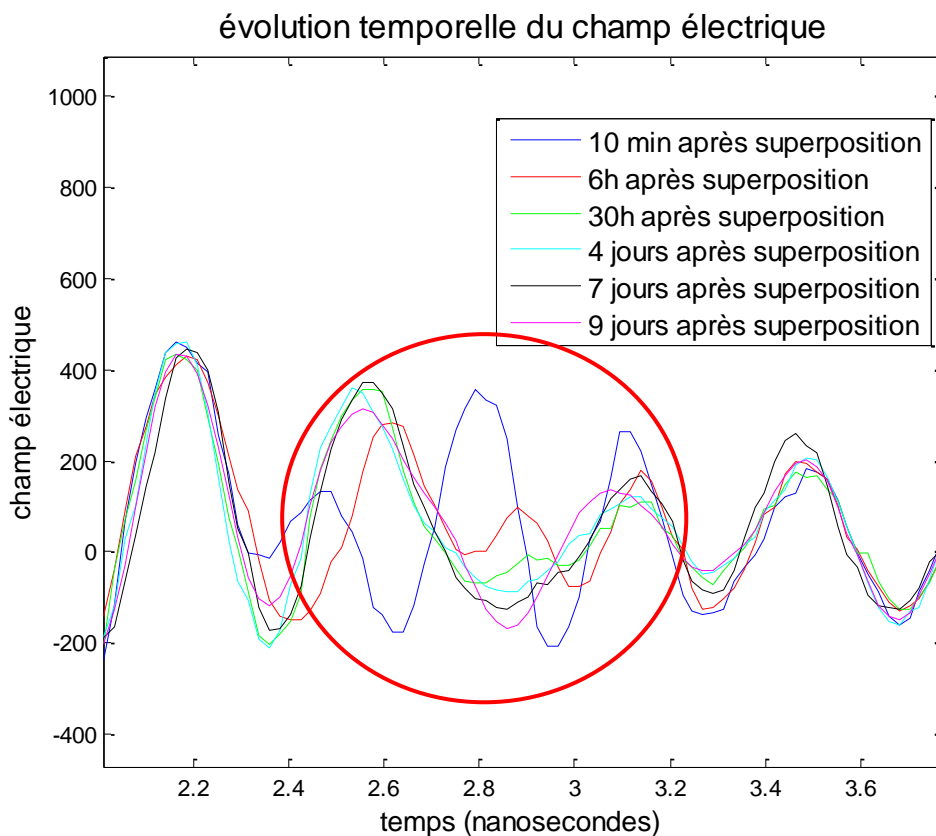


Figure 101: Agrandissement sur le pic dû à l'interface entre les deux dalles (configuration n°1, 9 jours)

Sur la figure 101, on constate que les résultats, comme on pouvait s'y attendre, évoluent beaucoup plus lentement après les deux premiers jours. Cela confirme donc quand même les résultats obtenus par les capteurs, puisqu'on notait une faible évolution de l'épaisseur de la zone de transition après le 10 mai. Cependant, on observe que le phénomène n'est pas statique puisque la zone entourée en rouge évolue progressivement et plus le temps passe, plus on se rapproche de la forme d'une sinusoïde. On peut donc penser que même si cela n'apparaît pas clairement sur les profils obtenus par les capteurs, l'épaisseur de la zone de transition augmente encore légèrement entre le 10 et le 18 mai puisqu'on constate encore une certaine évolution du signal qui tend à faire disparaître de plus en plus la zone de réflexion.

En conclusion, nous avons pu réaliser ici une analyse visuelle confirmant la modélisation. En effet, de manière expérimentale, nous avons pu mettre en évidence le fait que l'apparition d'un gradient diminue la visibilité de la zone humide, et plus ce gradient grandit, plus il devient difficile de détecter cette dernière puisqu'on se rapproche d'un signal assez continu. Malheureusement, nous ne saurons pas ici comparer de manière précise comme pour la modélisation la variation du coefficient de réflexion en fonction de l'épaisseur de la zone de transition et ce pour plusieurs raisons :

- nous ne disposons de capteurs hygrométriques en nombre suffisant pour pouvoir situer avec précision la zone de transition ;
- nous ne sommes pas certains de la bonne réponse de ceux-ci. Il aurait fallu leur laisser une période d'adaptation ne fût-ce que pour laisser sécher le solvant venant du silicone et laisser s'équilibrer la zone du forage. Ensuite et seulement ensuite, nous aurions pu venir mesurer

l'influence de la remontée capillaire seule ;

- nous ne disposons pas d'une onde directe dans le béton sec. En effet, nous avons bien deux dalles mais malheureusement celles-ci étaient loin d'être planes. Pour obtenir une onde directe, il aurait fallu venir les superposer parfaitement. Nous avons quand même essayé mais comme on peut le voir sur la figure 102 ci-dessous, nous constatons une réflexion importante venant de l'interface entre les deux dalles. Il nous est donc impossible d'utiliser cette onde.

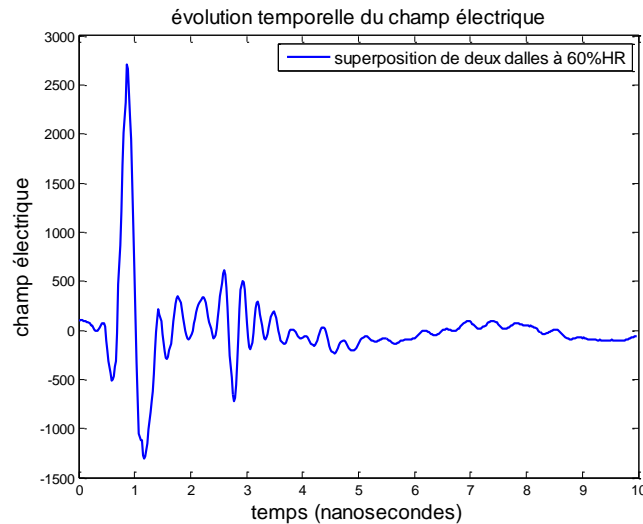


Figure 102: Superposition de deux dalles à 60% HR

Malgré ces différentes difficultés, nous allons quand même essayer de réaliser une étude similaire ne fût-ce que pour visualiser une tendance générale. Cependant, nous sommes conscients que celle-ci ne sera pas aussi précise que l'étude obtenue par modélisation.

Ici, nous allons observer les gradients sur les deux premiers jours puisqu'il s'agit des gradients situés en base de la dalle et nous pouvons clairement supposer que la variation rapide de la réponse des capteurs durant les premiers jours est principalement due à la remontée capillaire. Plus on avance dans le temps, plus la dynamique de la remontée se calme et plus les autres phénomènes se font sentir. Il devient donc plus délicat d'associer un de ces gradients à une réponse radar puisque les capteurs sont influencés par un certain nombre de paramètres (le silicone, la remise à l'équilibre du forage et la remontée capillaire) tandis que la zone sur laquelle est prise la mesure radar est uniquement influencée par la remontée capillaire. Voilà pourquoi on va se concentrer sur la réponse des sondes obtenue durant les deux premiers jours.

Ensuite, il reste encore le problème de l'onde directe. Pour déterminer cette onde, une astuce va être utilisée. Il se trouve que nous disposons non seulement de mesures radar réalisées en venant placer une feuille métallique sous la dalle mais nous disposons aussi d'une mesure par contact réalisée après avoir disposé la dalle sur sa tranche. De la sorte, nous disposons d'une mesure de l'onde parcourant la dalle et se réfléchissant sur une interface nette béton-air. En venant simplement soustraire ces deux ondes, nous sommes capables de mettre en évidence le signal dû à la réflexion puisque en dehors de celle-ci, le reste du signal est identique. Si ce raisonnement est suivi nous trouvons les courbes verte présentée par la figure 103a.

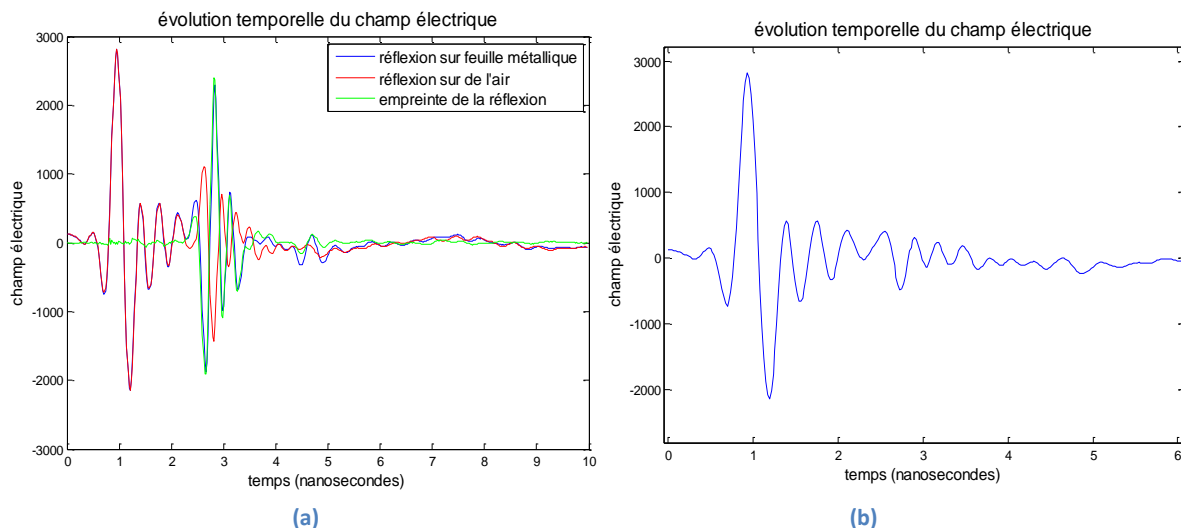


Figure 103: Détermination de la variation du signal dû à la réflexion (a) et onde directe déduite (b)

Sur la figure 103a, on constate que la courbe verte « empreinte de la réflexion » obtenue après soustraction des deux ondes montre une variation uniquement dans la zone de réflexion (3<sup>ème</sup> nanoseconde). On constate donc qu'il a été possible de mettre en évidence l'empreinte de la réflexion et d'isoler celle-ci. Cependant, avant de l'utiliser, il faut réappliquer une correction d'amplitude à cette onde « empreinte de la réflexion » puisque celle-ci est la combinaison de deux signaux. Vu que l'onde réfléchi sur la feuille métallique est en opposition de phase avec l'onde réfléchi sur l'air, il faut corriger l'amplitude de cette onde par un coefficient égal à la somme des coefficients de réflexion de l'interface béton-air et béton-feuille métallique. Le coefficient de réflexion sur la dalle métallique est égal à 1, pour le second coefficient, nous connaissons la valeur de permittivité de la dalle qui est de 8,195. Dès lors, par la formule (89) du chapitre 9.6 de la partie modélisation, nous trouvons que ce coefficient de réflexion est égal à 0,4822. Si on divise donc le signal « empreinte de la réflexion » visible sur la figure 103a par 1,4822 et que l'on soustrait cette onde à l'onde obtenue par réflexion sur la feuille métallique, nous disposons d'un signal se rapprochant très fort de l'onde directe recherchée (figure 103b).

Pour déterminer l'épaisseur du gradient, nous avons utilisé les profils obtenus mais nous avons réalisé un changement d'échelle. La valeur 86,5% HR qui correspondait à la valeur de base a été ramenée à 0% et 100% HR est restée 100%. Nous avons tracé nos différents profils en supposant une variation linéaire entre les points. L'épaisseur de la zone de transition a été prise égale à la distance séparant la valeur 5% et la valeur 95%. Bien entendu, il s'agit ici d'une manière de faire parmi un grand nombre. Mais quoique nous faisons, la précision sur l'épaisseur de la zone de transition serait restée de l'ordre du centimètre.

Comme annoncé, nous avons donc superposé les graphiques du premier jour et les graphiques du second jour auxquels nous avons soustrait l'onde directe (figure 104a). Ci-dessous nous ne mettrons en évidence sur le graphique final que la zone qui nous intéresse. Pour des raisons de clarté, seules six courbes sont représentées. Bien entendu dans l'analyse, nous avons utilisé toutes les données disponibles. Le graphique de la figure 104b montre les profils de ces deux jours après changement d'échelle :

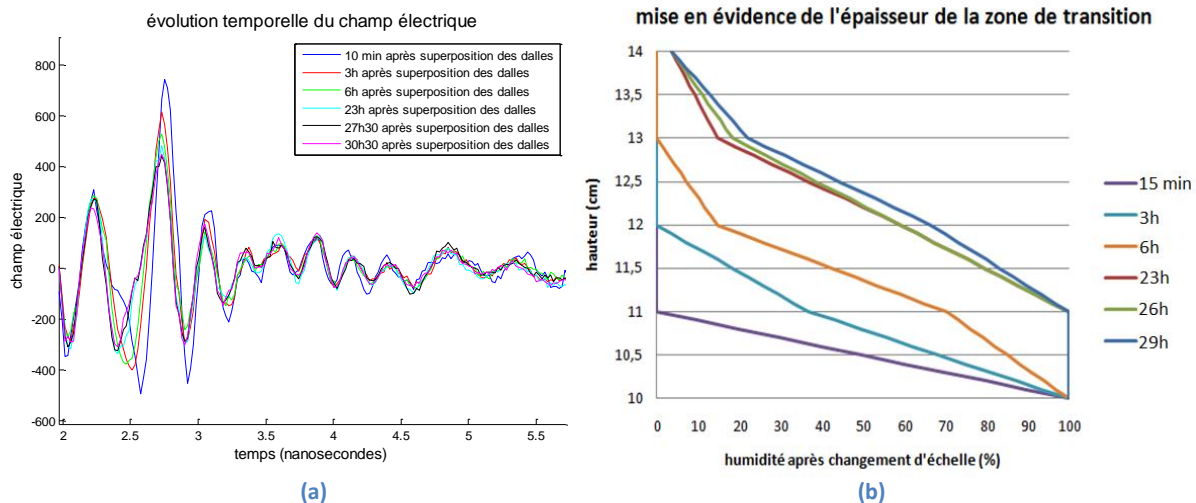


Figure 104: Comparaison entre la réflexion du signal radar (a) et le profil d'humidité (b)

Pour réaliser un graphique similaire à celui de la partie modélisation, il faut que l'on détermine la longueur d'onde du signal parcourant notre béton. Si on réutilise l'expression d'Annan (Annan A.P., 2005), on trouve :

$$\lambda_{dalle\ 60\%HR} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r} f} = \frac{300 \cdot 10^6}{\sqrt{8,195} \cdot 2,3 \cdot 10^9} = 4,55\ cm \quad (106)$$

Ne connaissant pas la réflexion qui serait obtenue directement après pose de la dalle à 60% HR sur la dalle saturée, nous considérons comme référence l'amplitude de la réflexion obtenue sur base du premier essai, puisque celui-ci a été réalisé quelques minutes après la pose de la dalle. Nous comparons donc l'amplitude de la réflexion de tous les autres graphiques par rapport à cette amplitude de référence. Voici le tableau des données que nous avons obtenu (tableau 19) :

Tableau 19: Variation du coefficient de réflexion en fonction de l'épaisseur du gradient

Date	Épaisseur (cm)	Ratio $h/\lambda$	Amplitude pic à pic	Ratio des amplitudes (%)
10 min après pose	0,95	0,20849933	1237,14	100
1h30 après pose	1,55	0,34018312	1054,18	85,2110513
3h après pose	1,75	0,38407771	1017,18	82,2202823
4h30 après pose	1,8	0,39505136	933,1947	75,4316165
6h après pose	2,4	0,52673515	909,164	73,4891766
23h après pose	2,8	0,61452434	772,59	62,4496823
24h30 après pose	2,8	0,61452434	820,59	66,3295989
26h après pose	2,81	0,61671907	767,59	62,0455244
27h30 après pose	2,81	0,61671907	766,5854	61,9643209
29h après pose	2,81	0,61671907	759,589	61,3987908
30h30 après pose	2,82	0,6189138	780,586	63,0960118
Réflexion sur feuille métallique			3736,9	

Et voici le graphique associé à ce tableau 19:

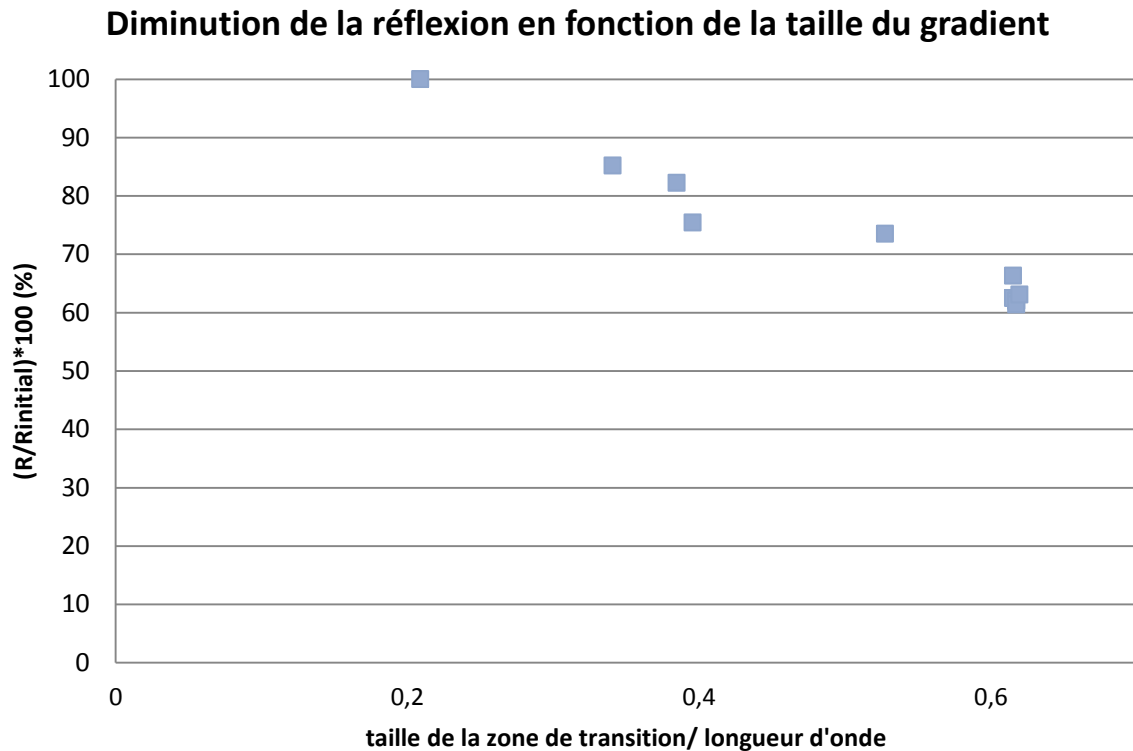
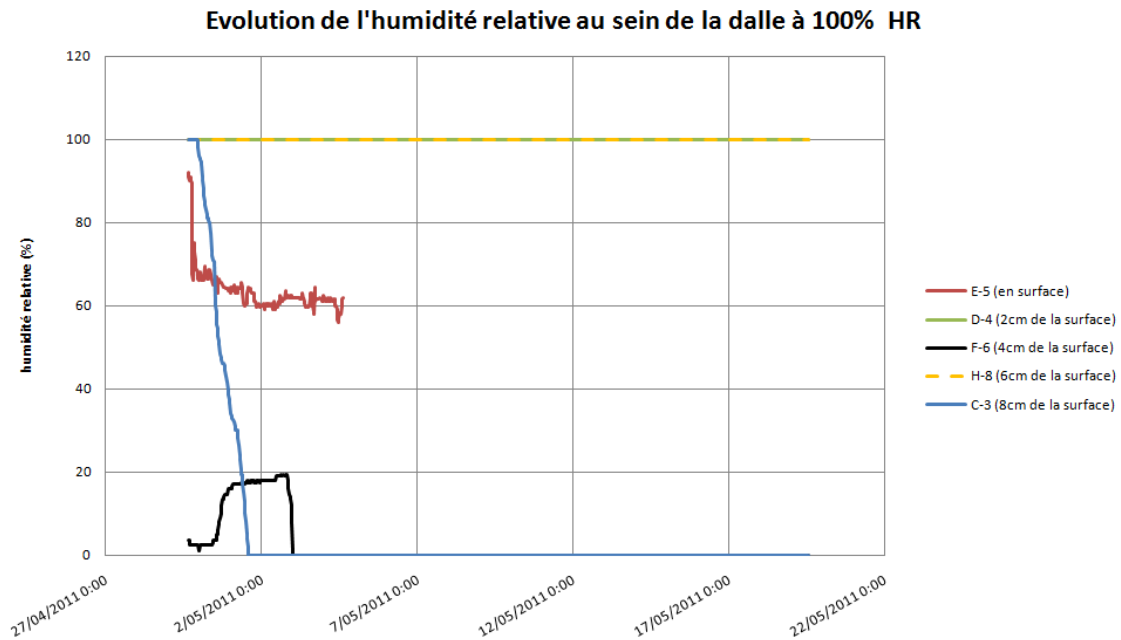


Figure 105: Diminution de réflexion en fonction de la taille du gradient obtenu de manière expérimentale

Sur cette figure 105, nous constatons que plus le gradient augmente plus la visibilité de la zone de réflexion diminue puisque l'amplitude associée à celle-ci diminue aussi. En effet, on constate que deux jours après le début des tests, l'amplitude a diminué de 40% par rapport à l'amplitude de la réflexion initiale. Si on se réfère à la figure 73 obtenue dans le chapitre modélisation, nous constatons que la tendance relevée ici est similaire à celle précédemment obtenue par voie numérique. En effet sur cette figure 73, nous constatons aussi une diminution de l'amplitude de la réflexion avec l'augmentation de l'épaisseur de la zone de transition. Dans un premier temps, cette diminution est très rapide et progressivement elle tendait à se stabiliser. Ici nous ne retrouvons pas cette évolution non linéaire de l'amplitude mais la diminution des valeurs elle est bien visible. On peut donc conclure que malgré les différentes difficultés d'analyse, nous avons quand même réussi de manière expérimentale à confirmer globalement les résultats théoriques obtenus par modélisation puisque nous arrivons à des tendances similaires. Analysons maintenant les résultats de la seconde configuration.

## 15.2. Configuration n°2 (séchage)

Pour rappel, dans cette configuration, nous avons placé une dalle de 2009 se trouvant depuis deux ans dans une chambre humide à 100% HR sur une dalle saturée. Nous avons placé l'ensemble de ces deux dalles dans une pièce climatisée à 60% HR. De cette manière, nous espérons qu'un gradient se forme par séchage via la surface supérieure de la dalle. En termes de température, nous avons retrouvé les mêmes tendances et les mêmes valeurs que celles mises en évidence sur la figure 95. Il est donc inutile de remettre ici un graphique de l'évolution de la température. Voici la réponse des capteurs en ce qui concerne l'humidité relative (figure106) :



**Figure 106: Evolution de l'humidité au sein de la dalle à 100% HR**

Sur ce graphique la courbe rouge correspond à l'humidité donnée par un capteur que l'on a placé sur la surface supérieure de la dalle. Sur base de cette courbe, on constate qu'initialement, la surface du béton était très humide. Durant la première journée, il y a eu de grands échanges d'eau avec l'air extérieur. Progressivement la dynamique de ces échanges a chuté puisque dans la couche d'air directement en contact avec la dalle, nous sommes arrivés à 60% HR.

En ce qui concerne le capteur F-6 placé à 4 cm de la surface, on constate que celui-ci a toujours un problème puisqu'il est resté durant presque tous les tests à 0% HR. On peut juste noter une remontée de ce capteur à 17% HR aux alentours du 2 mai, remontée inexplicable. On peut aussi constater que le capteur C-3 a lui aussi souffert d'un problème technique puisqu'à partir du 30 avril on dénote une chute des valeurs fournies par le capteur, chute qui se poursuit jusqu'à l'atteinte de 0% HR. Au vu des résultats de ces capteurs, il est vraisemblable qu'ils aient été en contact avec de l'eau sous forme liquide suite à un défaut des membranes en Gore-Tex. Il est bon de noter que cela est fortement possible puisque nous jouons ici avec des dalles proches de la saturation. Dès lors, nous retrouvons énormément d'eau dans les capillaires.

En conclusion, sur les quatre capteurs placés dans la dalle, deux s'avèrent défectueux mais heureusement pour nous, le capteur placé en surface fonctionne toujours. Cependant, on constate que même trois semaines après le début des tests, le front de séchage n'a pas encore atteint les 2 cm. Nous sommes donc en présence d'un phénomène très lent et nous ne pourrions pas dans les temps impartis analyser et comparer les résultats radar obtenus avec des profils en eau comme nous avons pu le faire dans le cas précédent. Nous sommes donc ici limités à une analyse visuelle des graphiques représentant l'évolution des signaux radar en fonction du temps (figure 107a).

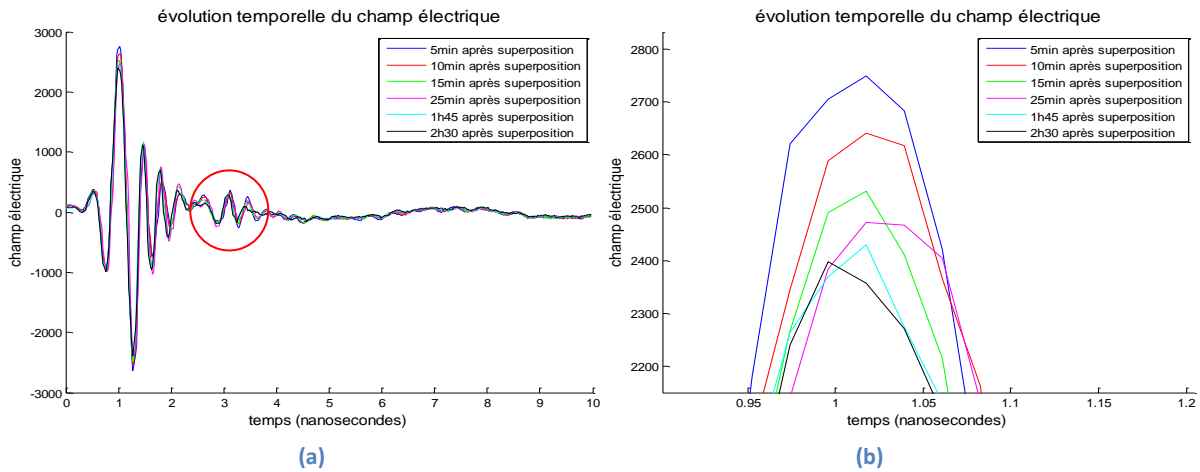


Figure 107: Evolution temporelle du champ électrique (a) et agrandissement sur le pic principal de l'onde directe (b) (configuration n°2, premier jour)

Sur ces graphiques plusieurs choses intéressantes sont à noter. Premièrement on constate (entouré en rouge sur le premier graphique) l'apparition d'une zone de réflexion à l'interface entre les dalles. Cela est logique puisque nous avons mis en évidence une différence dans les propriétés diélectriques entre la dalle de 2009 et la dalle de base réalisée ce semestre. Ensuite, on constate que les graphiques se superposent assez bien, on dénote juste une grande différence entre ceux-ci au niveau de l'amplitude de l'onde directe. En effet, pour s'en rendre compte, nous avons réalisé un agrandissement de cette partie (figure 107b). On constate une diminution progressive au cours du temps de l'amplitude de l'onde directe. Cette onde est une combinaison de l'onde directe dans l'air, de l'onde directe dans le béton et d'une onde se réfléchissant à la surface du béton. De plus, contrairement à la modélisation, dans la réalité il faut aussi rajouter l'interaction du boîtier métallique entourant les antennes. Ainsi que l'influence du radar lui-même. En effet, le signal émis change avec le temps et avec le niveau de la batterie. Il se peut donc qu'ici, nous trouvions aussi un impact de ce phénomène.

Regardons maintenant comment va évoluer le signal sur la période de 20 jours durant laquelle l'essai a été mené (figure 108a). On ne représentera ici que la zone correspondant à l'amplitude maximale de l'onde directe puisque c'est cette zone qui est la plus intéressante pour nous :

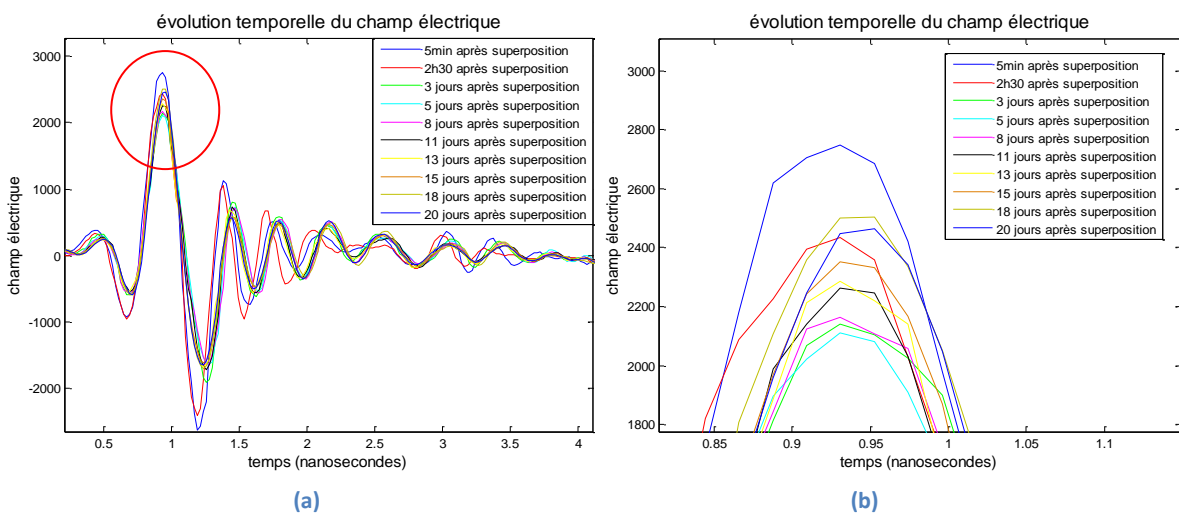


Figure 108 : Evolution temporelle du champ électrique (a) et agrandissement sur le pic principal de l'onde directe (b) (configuration n°2, 20 jours)

Sur la figure 108a, on constate que le premier jour, la longueur d'onde de l'onde directe semble plus faible que la longueur d'onde de l'onde directe des jours suivants. Sur le graphique de droite (figure 108b) correspondant à un agrandissement de la zone entourée en rouge, nous pouvons constater que jusqu'au 5ème jour après le début des tests, l'amplitude de l'onde n'a fait que diminuer. A partir de ce moment, nous observons une inversion de la tendance puisque, progressivement, l'amplitude de l'onde directe va croître. Il est difficile d'analyser et d'expliquer l'origine de cette inversion puisque, comme on l'a dit, l'onde directe est la combinaison de divers signaux qui interagissent les uns avec les autres. Nous pouvons juste constater que, dans un premier temps, le séchage se traduit par une diminution rapide de l'amplitude le premier jour et ensuite cette diminution va se stabiliser pour s'inverser puisque l'on observe une augmentation de l'amplitude après 5 jours. Pour la variation rapide des résultats du premier jour, il ne faut pas oublier qu'il peut exister une influence du niveau de charge de la batterie dans ces résultats. En effet, durant ce premier jour de test, nous n'avons pas gardé un niveau de charge constant.

Après 5 jours, nous constatons une augmentation de l'amplitude avec le séchage, cela confirme ce que l'on avait obtenu dans la partie modélisation. En effet, dans cette seconde partie, nous avons pu mettre en évidence que l'amplitude de l'onde directe dans le béton sec était supérieure à l'amplitude de l'onde directe dans le béton humide. Nous retombons donc bien sur la même constatation après un certain temps de séchage. Ici nous n'avons parlé que de la zone de l'onde directe pour laquelle l'amplitude est maximale mais, d'une manière générale, on peut noter que c'est toute l'onde directe qui se modifie de manière complexe.

En ce qui concerne cette configuration, vu que l'impact de l'humidité se retrouve sur la zone correspondant à l'onde directe, qui est elle-même la combinaison de plusieurs ondes, il devient difficile de détecter la présence d'une zone humide. Nous pouvons juste repérer l'impact de l'évolution de la zone de transition mais, dans la réalité, il est difficile de mettre en avant la détection de la zone humide à proprement parler, puisque celle-ci se rapproche trop de la surface supérieure. Nous étions déjà arrivés aux mêmes conclusions lors de la partie modélisation.

### 15.3. Comparaison entre les deux configurations

Initialement la configuration n°1 et la configuration n°2 sont totalement différentes. Cependant, au cours du temps, ces deux configurations devraient se rapprocher l'une de l'autre puisque dans la configuration n°1, on devrait progressivement voir remonter une zone humide tandis que dans la seconde configuration, nous devrions voir descendre progressivement une frange de béton qui serait en équilibre avec l'air extérieur à 60% HR. Dès lors, si nous traçons les graphiques obtenus pour les deux configurations, les premiers graphiques nous donnant l'évolution temporelle du champ électrique devraient être totalement différents tandis que les derniers graphiques obtenus devraient se rapprocher les uns des autres.

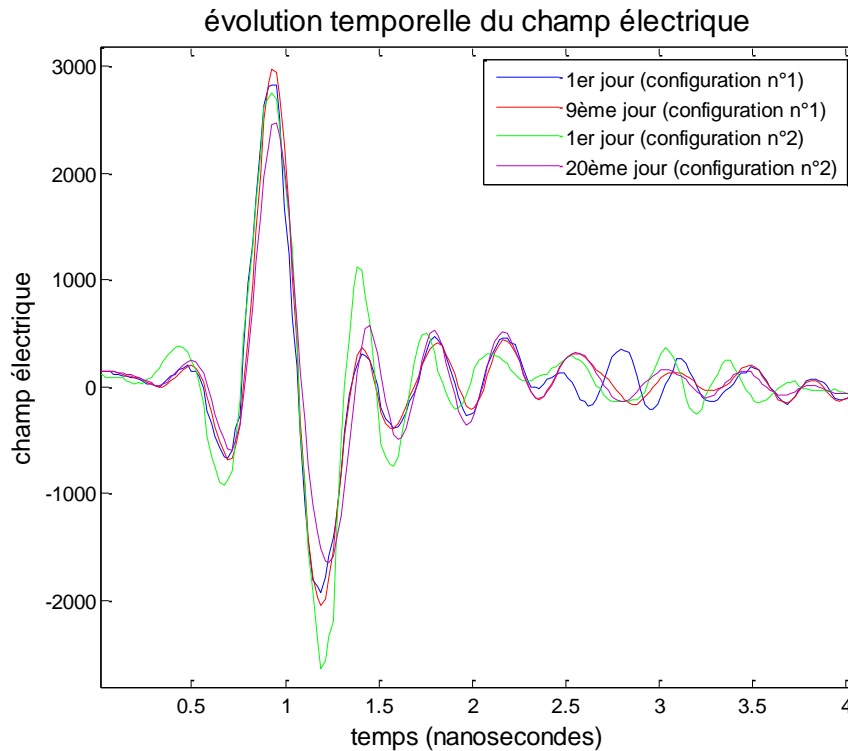


Figure 109: Comparaison de l'évolution temporelle du champ électrique entre les deux configurations

Sur la figure 109, lorsque l'on regarde la courbe bleue et la courbe verte, qui correspondent respectivement aux situations initiales des configurations n°1 et n°2, on constate clairement une différence entre ces deux signaux. En ce qui concerne la courbe verte, l'amplitude pic à pic de l'onde directe est clairement supérieure à toutes les autres amplitudes. Pour ce qui est de la courbe bleue, on voit que la zone de réflexion qui apparaît aux alentours de la 3<sup>ème</sup> nanoseconde s'écarte elle aussi à cet endroit des trois autres courbes. Bref, chacune de ces deux courbes présente une caractéristique bien particulière et il est facile de les dissocier. Par contre, si l'on compare maintenant les courbes rouge et mauve, on constate que celles-ci sont relativement proches l'une de l'autre. En effet, il persiste certes une petite différence sur l'onde directe mais dès la 2<sup>ème</sup> nanoseconde, on constate que les deux courbes se comportent sensiblement de manière identique. On constate donc que les signaux correspondant aux deux configurations se rapprochent progressivement. Il est aussi normal de constater que la principale différence apparaît dans l'onde directe puisqu'on a vu dans les résultats du point précédent que la dynamique de séchage était quelque chose de beaucoup plus lent que la remontée capillaire. En effet, en ce qui concerne la formation d'un gradient par séchage, au bout de trois semaines de test, le capteur placé à 2 cm de la surface n'indiquait aucune chute de l'humidité relative interne. Dans l'autre configuration, le capteur placé à 2 cm de l'interface voyait sa valeur bouger dès la fin de la première journée.

#### 15.4. Analyse des profils

En plus des mesures statiques, des mesures de profil le long d'une droite passant au-dessus des capteurs ont été réalisées pour les deux configurations. Pour l'étude des résultats, le programme Rad Explorer a été utilisé. Les diverses hyperboles de réflexion ont pu être mises en évidence grâce à l'utilisation d'un certain nombre de filtres. Plus particulièrement, le profil initial a subi une soustraction de la valeur moyenne (DC Removal) suivi d'une soustraction de la trace moyenne (Background Removal). Ensuite, une correction d'amplitude (Amplitude Correction) et un filtre passe

bande (Band Pass Filtering) ont été employés. Toutes les informations à propos de ces filtres peuvent être trouvées dans le document de DECO Geophysical Co (DECO Geophysical Co., 2005).

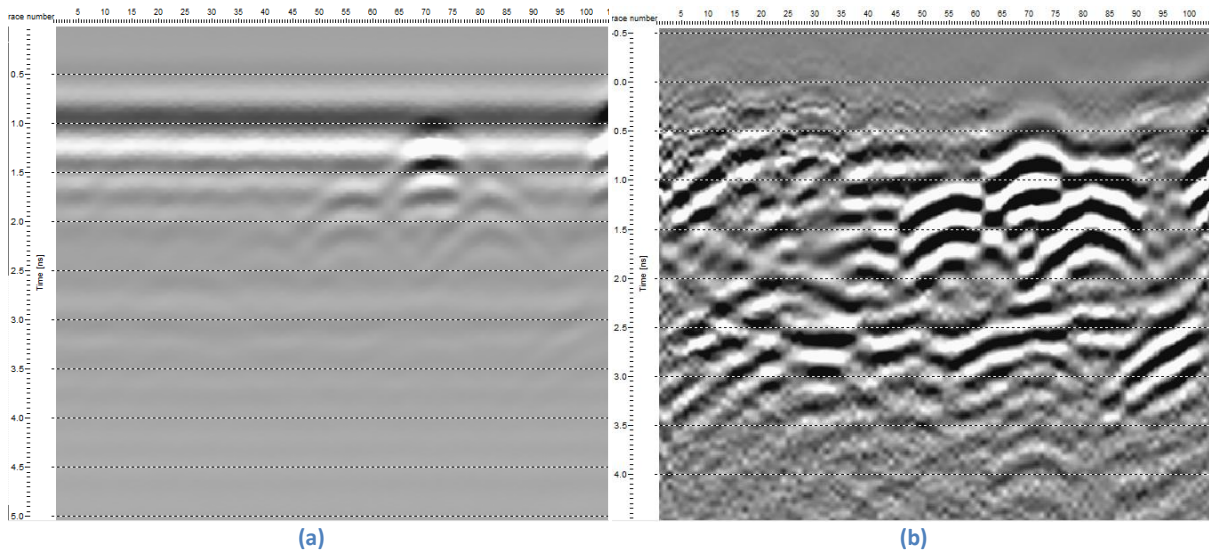


Figure 110: Profil avant (a) et après traitement (b) par les différents filtres (configuration n°2, premier jour de test)

Les figures 110a et 110b, montrent clairement l'intérêt de disposer de tels programmes de traitement. En effet, sur la figure 110a, il est certes possible de distinguer l'hyperbole correspondant au capteur situé le plus en surface mais il est difficile de visualiser les autres capteurs. Après l'utilisation des filtres cela se simplifie puisque les réflexions correspondant aux quatre capteurs apparaissent plus clairement (figure 110b). Celles-ci sont mises en évidence sur la figure 111.

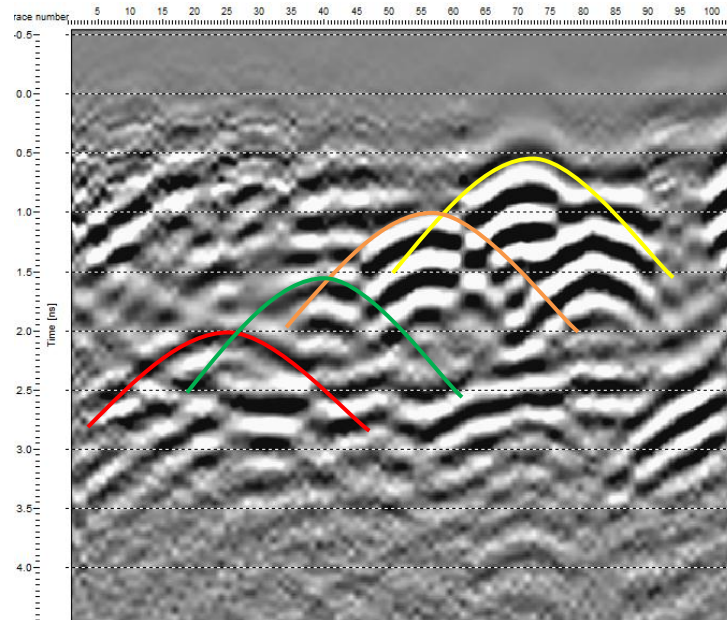


Figure 111: Mise en évidence des hyperboles correspondant à la réflexion de l'onde sur les capteurs (configuration n°2, premier jour de test)

Sur l'ensemble des profils, une mise en évidence des hyperboles a donc pu être réalisée. Après avoir choisi une définition du temps zéro qui sera commune à tous les graphiques, il est possible de venir repérer le temps mis par l'onde pour atteindre les capteurs. De plus, à l'aide de la forme de l'hyperbole, il est envisageable de déterminer la vitesse de propagation de l'onde. L'ensemble de ce

travail a été réalisé pour les deux configurations.

En ce qui concerne la configuration n°2, sur les trois semaines de test aucune tendance n'a pu être mise en évidence. En effet, aucune évolution nette dans les temps d'arrivée des hyperboles n'a pu être trouvée. Cela pourrait confirmer le fait que le séchage d'une dalle est quelque chose de lent et que sur trois semaines le front de séchage n'a pas bougé de manière suffisante pour repérer une modification nette dans les signaux. Cela confirme donc dans un sens la réponse fournie par les capteurs hygrométriques dans la section 15.2 relatifs aux résultats des tests pour la configuration n°2. En ce qui concerne la forme de la parabole, celle-ci n'apparaissait pas de manière assez claire pour pouvoir venir caler avec certitude une courbe sur ce que l'on observait. Or il se trouve qu'une légère variation dans la forme de celle-ci peut avoir un impact assez conséquent sur la détermination de la vitesse de propagation de l'onde. Donc de ce point de vue là aussi, les résultats ne sont pas concluants.

Pour la configuration n°1, les capteurs étaient situés plus profondément dans la dalle et la correction apportée par les filtres rendait floue la zone de réflexion. Dès lors ici aussi les résultats ne sont pas intéressants puisque l'épaisseur des bandes formant la réflexion est trop importante pour pouvoir faire une analyse précise. Il en est de même pour la détermination des vitesses, aucune tendance franche n'a pu être trouvée.

# Conclusion et perspectives

Le béton n'est pas un matériau invulnérable : il présente des faiblesses et est soumis à un ensemble de sollicitations qui peuvent le dégrader. L'eau joue un rôle important dans bon nombre de ces mécanismes. Dès lors, les zones humides présentes dans un ouvrage d'art sont potentiellement indicatrices de zones dégradées ou de zones qui risquent, à court terme, de se détériorer. L'utilisation du radar pour la détection de ces zones humides est rendue possible grâce à la variation des propriétés diélectriques du béton en fonction de sa teneur en eau.

Le radar est une technique qui fonctionne très bien dans la détection d'une interface franche entre deux matériaux présentant des propriétés électriques différentes. Malheureusement, les zones humides présentent la particularité d'être délimitées par des interfaces qui sont loin d'être nettes. Ce travail présentait et étudiait l'impact de la présence du gradient entourant la zone humide, sur la détection par GPR de cette zone.

La première partie de ce travail était consacrée à une revue bibliographique présentant les diverses notions utiles à la bonne compréhension de l'ensemble du contenu de ce document. Ainsi, la méthode GPR, les comportements des gradients dans les bétons et les capteurs permettant leur détection ont été abordés.

La seconde partie était consacrée à une étude numérique du problème, grâce à des simulations sur un logiciel de propagation en différences finies. Dans un premier temps, des cas simples nous permettant de comprendre et d'appréhender l'analyse des signaux ont été considérés. Progressivement, les modélisations ont évolué en complexité, pour finalement aboutir à la détermination de l'influence de l'épaisseur du gradient se trouvant au-dessus d'une zone humide. De cette dernière étude, il est ressorti que, dans le cas où l'onde directe se dissocie assez clairement de l'onde réfléchie, il sera possible de venir détecter la zone humide lorsqu'elle est précédée d'une zone assez étroite de transition des propriétés. En effet, dans le cas où les propriétés électriques (à savoir la permittivité diélectrique et la conductivité électrique) évoluent de manière linéaire, si l'épaisseur du gradient devient supérieure aux  $2/5$  de la longueur d'onde du signal, nous avons prouvé que l'amplitude de la réflexion se réduit de plus de 70% par rapport à la réflexion sur une interface nette. A partir de ce moment, il deviendra donc difficile de détecter cette zone humide.

Pour confirmer les résultats numériques, deux dispositifs expérimentaux ont été mis au point afin de créer artificiellement un gradient d'humidité dans le béton. Dans le premier dispositif, le gradient était basé sur la remontée capillaire tandis que, dans le second, nous réalisons un gradient par séchage. A l'aide de capteurs hygrométriques placés dans les dalles, l'évolution de la zone de transition se trouvant au-dessus de la zone humide a été contrôlée. Initialement, ces capteurs étaient prévus pour une utilisation dans l'air ; une modification de ceux-ci a donc été nécessaire afin de les rendre aptes à réaliser des mesures dans le béton.

Avant montage du dispositif expérimental, une batterie de tests préliminaires visant à déterminer les propriétés diélectriques des dalles et la réponse propre des capteurs ont été réalisés. Nous avons pu mettre ainsi en avant l'influence du silicone sur la réponse du capteur, l'influence de

l'eau apportée par le forage et enfin la différence d'humidité relative existant entre l'air extérieur et l'intérieur du forage. Ces diverses analyses nous ont permis d'améliorer le protocole de mise en place des capteurs.

Après ces divers essais, nous avons pu commencer l'expérience principale. Pour le dispositif basé sur la formation d'un gradient par remontée capillaire, une corrélation entre l'évolution du gradient fourni par les capteurs et les résultats fournis par un Ground Penetrating Radar de 2,3 GHz a été possible. Comme pour la modélisation, nous avons étudié l'influence de la taille du gradient sur l'évolution temporelle du champ électromagnétique. La mise en évidence d'une tendance décroissante de la réflexion sur la zone humide, avec l'augmentation de l'épaisseur du gradient, a également été possible. Pour le second dispositif, la dynamique de séchage était trop lente et aucun capteur n'a montré d'évolution intéressante. Dans ce cas, nous avons uniquement pu observer l'évolution de l'onde avec la modification du gradient, sans pouvoir corrélérer cette modification à l'épaisseur de la zone de transition.

La détection de zone humide dans le béton est quelque chose de complexe : dans le cadre de ce travail, nous avons juste posé une petite pierre dans l'étude globale de ce phénomène. Cependant, de nombreux tests sont encore à réaliser. Effectivement, dans ce projet, ce sont principalement des mesures statiques qui ont été réalisées : il pourrait être intéressant de venir exécuter des mesures dynamiques telles des CMP afin de pouvoir mettre en évidence d'autres paramètres liés à l'évolution de la taille du gradient.

De plus, pour se rapprocher un peu plus de la réalité, il serait intéressant d'étudier l'influence de la variation transversale d'humidité au sein d'une dalle. Pour ce faire, il faudrait réaliser un bac étanche sur la moitié de la face supérieure de la dalle, y laisser un certain temps de l'eau en contact avec le béton, puis retirer le dispositif et réaliser les mesures le long d'un profil. Ces mesures pourraient s'envisager directement sur la dalle ou sur une couche de quelques centimètres, placée à la surface du béton, couche qui matérialiserait les couches de revêtement rencontrées sur les tabliers de pont.

Finalement, il est important de signaler que cette technique de détection de la zone humide est prometteuse mais il ne faut pas voir en elle une méthode miracle. Comme toute méthode, elle a des limites. On se rend bien compte que, plus la géométrie se complexifie, plus il est difficile de percevoir la zone humide. Par exemple, si la dalle est pourvue d'un grand nombre d'armatures métalliques, la réflexion sur ces armatures pourra être tellement importante qu'il deviendra impossible de percevoir la zone humide. La possibilité de mettre en évidence une zone humide doit être analysée au cas par cas ; cela sera surtout fonction du contexte, des données du problème ainsi que de la qualité d'interprète du technicien.

# Bibliographie

- Annan A.P. 2001. *Ground penetrating radar Workshop Notes*. Mississauga, Ontario, Canada, sensor and software Inc. 197p. <http://geo.polymtl.ca/>. Consulté le 30 septembre 2010.
- Annan A.P. 2005. Ground-Penetrating Radar. In: Butler D.K. *Near-Surface Geophysics Part 1: Concept and Fundamentals*. Society of Exploration Geophysicists, 357-438.
- Bano M. 2006. Effects of the transition zone above a water table on the reflection of GPR waves. *Geophysical research letters* (33), 5p.
- Cailleux E., Coppens E., Noirfalisse E., et al. 2010. La teneur en humidité des chapes. *CSTC-Contact* 27. p15. <http://www.cstc.be/homepage/index.cfm?cat=publications&sub=bbri-contact&pag=Contact27>. Consulté le 15 février 2011
- Clermont G., Ballivy G., 2005. Mesure de la teneur en eau et de l'humidité dans le béton : note technique. Sherbrooke, Université de Sherbrooke, Groupe de recherche sur l'auscultation et l'instrumentation, 15p.
- Cnrtl 2009. *Lexicographie*. Centre national de ressources textuelles et Lexicales, Nancy, France, <http://www.cnrtl.fr/definition/humidité>. Consulté le 15 février 2011.
- Courard L. 2008. Compositions, fabrication, nomenclature, essais, emplois. In : *Cours de matériaux de construction 2008*[slides]. Liège, Université de Liège, 116p, inédit.
- Courard L. 2009. Composition des bétons. In : *Cours de matériaux de construction 2010*[slides]. Liège, Université de Liège, 59p, inédit.
- Courard L. 2010. Pathologie des bétons. In : *Cours d'auscultation et réparation des ouvrages en béton 2011*[slides]. Liège, Université de Liège, 130p, inédit.
- Courard L., Leanaers J-F., Michel F., et al. 2011b. Saturation level of the superficial zone of concrete and adhesion of repair systems. *Construction and Buildings Materials* 25 (5), 2488-2494.
- DECO Geophysical Co. 2005. RadExplorer1.4, the software for GPR data processing and interpretation, user manual. DECO Geophysical Co. Leninskie Gory, Moscou, Russie. 92p.
- Demars Ph., Gilles P., Dondonné E., et al. 2001. Dégradation de dalles de tablier de ponts en Belgique: étude d'une pathologie complexe. *Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées* 232, 73-83. <http://www.gramme.be/Revue%20ISILF/Revue18/Degrada.pdf>. Consulté le 12 août 2010.
- De Smet D. 2005. *La gestion des ouvrages d'art*. Autoroutes et routes de Wallonie, direction générale opérationnelle Routes et Bâtiments (DGO1). <http://routes.wallonie.be/struct.jsp?chap=5&page=4>. Consulté le 03 février 2011.
- Gagné R. 2010. La durabilité du bétons. In : *Durabilité et réparations du béton*[slides]. Sherbrooke, Université de Sherbrooke, Canada, 35p, inédit. [http://www.civil.usherbrooke.ca/cours/gci714/PDF/Chap2\\_1.pdf](http://www.civil.usherbrooke.ca/cours/gci714/PDF/Chap2_1.pdf). Consulté le 12 août 2010.
- Giannopoulos A., 2005. GprMax2D/3D User's Manual, version 2. Edinburgh, Ecosse, 78p.
- Giroux B. 2005. Radar géologique. In : *Techniques géophysiques de haute résolution* [slides]. Montreal, école polytechnique de Montréal, Canada, 48p, inédit.

<http://geo.polymtl.ca/~giroux/cours/gml6201a/documents/radar.pdf>. Consulté le 30 septembre 2010.

Godin J., Pithon M., Baroghel-Bouny V., *et al.* 2002a. Méthodes d'essai n°58.11 Détermination des profils de teneur en eau dans les bétons durcis par gammadensimétrie. *In* : Baroghel-Bouny V., Chaussadent T., Croquette G., *et all.* *Méthode d'essais n°58 : caractéristiques microstructurales et propriétés relatives à la durabilité des bétons. Techniques et méthodes des laboratoires des ponts et chaussées.* Paris, France, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, 70-74.

Godin J., Pithon M. 2002b. Méthodes d'essai n°58.12 Détermination des profils de teneur en eau dans les bétons par sondes capacitatives. *In* : Baroghel-Bouny V., Chaussadent T., Croquette G., *et all.* *Méthode d'essais n°58 : caractéristiques microstructurales et propriétés relatives à la durabilité des bétons. Techniques et méthodes des laboratoires des ponts et chaussées.* Paris, France, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, 75-80.

Goffinet C. 2009. Influence de la réutilisation des coffrages en bois OSB et contreplaqué marin sur la texture des parements en béton. Travail de fin d'étude, Liège, Université de Liège, inédit

Grasley Z.C., Lange D.A., 2004. A new system for measuring the Internal Relative Humidity in Concrete. Urbana-Champaign, Université d'Illinois, 6p.  
<https://netfiles.uiuc.edu/dlange/www/research/journal/Grasley-A%20New%20System%20for%20Measuring%20the%20Internal%20RH.pdf>. Consulté le 09 mars 2011.

Harrison P.J., Engleman A.E., Holland J.A., *et al.* 2006. Concrete moisture basics. *In: Guide for concrete slabs that receive moisture-sensitive flooring materials.* Farmington Hills, USA, American Concrete Institute, 5-12.

Hernández M.G., Izquierdo M.A.G., Ibáñez A., *et al.* 2000. Porosity estimation of concrete by ultrasonic NDE. *Ultrasonics* 38 (1-8). 531-533. <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6TW2-3YWX3V2-3N/2/3f9687fc99a7c39eab03f746be3e7f24>. Consulté le 11 août 2010

Howard M.K., 2005. Measuring moisture in concrete. *In: Concrete Floors and Moisture.* Skokie, Illinois USA, Portland Cement Association and National Ready Mixed Concrete association, Silver Spring, Maryland, USA, 43-52.

Irving J., Knight R. 2006. Numerical modeling of ground-penetrating radar in 2-D using MATLAB. *Computers & Geosciences* 32. 1247-1258.

Khelidj A., Baroghel-Bouny, V. Bastian G., *et al.* 2001. Séchage d'une dalle en béton : Etude expérimentale des gradients induits. *Revue française de génie civil* 5 (2-3), 287-308

Khelidj A., Baroghel-Bouny, V. Bastian G., *et al.* 2002. Transferts dans les bétons et durabilité des ouvrages : détermination expérimentale des gradients résultant d'une interaction hydratation-séchage dans une dalle en béton. *Etude et recherches des laboratoires des ponts et chaussées.* p.79

Lardière C., 2010. L'humidité est une grandeur délicate à mesurer. *Mesures* 825. 58-67

Lascarelectronics, 2010. Applies to EL-USB-2. p4.  
<http://www.lascarelectronics.com/temperaturedatalogger.php?datalogger=102>. Consulté le 09 mars 2011.

- Laurens S., Balayssac J-P., Rhazi J., *et al.* 2002. Influence de l'humidité de surface du béton sur l'onde directe du radar. *Bulletin du laboratoires des Ponts et Chaussées, Numéro spécial Evaluations non destructives pour le génie civil (239)*.71-78
- Migeotte N. 2009. Influence de la réutilisation des coffrages en bois OSB et contreplaqué marin sur la texture des parements en béton. Travail de fin d'étude, Liège, Université de Liège, inédit
- Mommer P., Dondonné E., Demars Ph. 2004. Dégradation de dalles de tabliers de ponts en région wallonne. Etude d'une pathologie complexe. *Revue Scientifique des Instituts supérieurs Industriels Libres Francophones* 18.146-169. <http://www.gramme.be/Revue%20ISILF/Revue18/Degrada.pdf>. Consulté le 12 août 2010.
- Ployaert C. 2009. T2 : Durabilité des bétons par la maîtrise de l'absorption d'eau. *tecHnoLogie (novembre 2009)*,p15.[http://www.febelcem.be/index.php?id=286&L=1%22&febelcemdata\\_pi1\[tx\\_febelcemdata\\_dossier\]=1232&cHash=9fd6141132](http://www.febelcem.be/index.php?id=286&L=1%22&febelcemdata_pi1[tx_febelcemdata_dossier]=1232&cHash=9fd6141132). Consulté le 11 août 2010.
- Rial F.I., PereiraM., Lorenzo E., *et al.* 2009. Resolution of GPR bowtie antennas: An experimental approach.*Journal of Applied Geophysics (67)*. 367-373
- Schmidt S. 2010. *Le Géoradar- Principe et applications*.Schmidt Géoradar Services,Courgenay, Switzerland. <http://www.solscan.ch/Technique%20georadar.htm>. Consulté le 30 septembre 2010.
- Soustos M.N., Bungey J.H., Millard S.G., *et al.* 2001. Dielectric properties of concrete and their influence on radar testing. *NDT&E International 34 (2001)*, 419-425.
- Taflove A., Hagness S.C. 2005. *Computational electrodynamics the finite-difference time-domain method third Edition*. Artech House, Norwood, Massachusetts, USA. 51-105.
- Van der Wielen A., Courard L., Nguyen F. 2011. GPR Limits for Thin Layers in Concrete Detection: Numerical and Experimental Evaluation. *Piers Online volume 7 (n°4)*, 339-342. <http://www.piers.org/piersonline/piers.php?volume=7&number=4&page=339>. Consulté le 26 avril 2011.
- Viriyametantont K. 2008. Reconnaissance physique et géométrique d'éléments en béton armé par radar et réseaux de neurones artificiels.Thèse de doctorat, Toulouse, Université de Toulouse, France, 248p, inédit. <http://eprint.insa-toulouse.fr/archive/00000202/>. Consulté le 12 février 2010.
- Young J.F. 1967. Humidity control in the laboratory using salt solution –a review . *Journal of appliedchemistry, vol 17*. 241-245

## Annexe 1 : Forme discrétisée des équations (59 à 63)

Les expressions discrétisées des formules (59) à (63) du chapitre 3 de la partie recherche bibliographique se présentent sous la forme suivante (Taflove A., 2005):

$$\begin{aligned}
 & E_y \Big|_{i-1/2, j+1, k+1/2}^{n+1/2} \\
 &= \left( \frac{\left( 1 - \frac{\sigma_{i-1/2, j+1, k+1/2} \cdot \Delta t}{2 \cdot \varepsilon_{i-1/2, j+1, k+1/2}} \right)}{\left( 1 + \frac{\sigma_{i-1/2, j+1, k+1/2} \cdot \Delta t}{2 \cdot \varepsilon_{i-1/2, j+1, k+1/2}} \right)} \right) E_y \Big|_{i-1/2, j+1, k+1/2}^{n-1/2} \\
 &+ \frac{\left( \frac{\Delta t}{\varepsilon_{i-1/2, j+1, k+1/2}} \right)}{\left( 1 + \frac{\sigma_{i-1/2, j+1, k+1/2} \cdot \Delta t}{2 \cdot \varepsilon_{i-1/2, j+1, k+1/2}} \right)} \left( \frac{H_x \Big|_{i-1/2, j+1, k+1}^n - H_x \Big|_{i-1/2, j+1, k}^n}{\Delta z} \right. \\
 &\left. - \frac{H_z \Big|_{i, j+1, k+1/2}^n - H_z \Big|_{i-1, j+1, k+1/2}^n}{\Delta x} - J_{source_y} \Big|_{i-1/2, j+1, k+1/2}^n \right) \quad (107)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & E_z \Big|_{i-1/2, j+1/2, k+1}^{n+1/2} \\
 &= \left( \frac{\left( 1 - \frac{\sigma_{i-1/2, j+1/2, k+1} \cdot \Delta t}{2 \cdot \varepsilon_{i-1/2, j+1/2, k+1}} \right)}{\left( 1 + \frac{\sigma_{i-1/2, j+1/2, k+1} \cdot \Delta t}{2 \cdot \varepsilon_{i-1/2, j+1/2, k+1}} \right)} \right) E_z \Big|_{i-1/2, j+1/2, k+1}^{n-1/2} \\
 &+ \frac{\left( \frac{\Delta t}{\varepsilon_{i-1/2, j+1/2, k+1}} \right)}{\left( 1 + \frac{\sigma_{i-1/2, j+1/2, k+1} \cdot \Delta t}{2 \cdot \varepsilon_{i-1/2, j+1/2, k+1}} \right)} \left( \frac{H_y \Big|_{i, j+1/2, k+1}^n - H_y \Big|_{i-1, j+1/2, k+1}^n}{\Delta x} \right. \\
 &\left. - \frac{H_x \Big|_{i-1/2, j+1, k+1}^n - H_x \Big|_{i-1/2, j, k+1}^n}{\Delta y} - J_{source_z} \Big|_{i-1/2, j+1/2, k+1}^n \right) \quad (108)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & H_x \Big|_{i-1/2, j+1, k+1}^{n+1} \\
 &= \left( \frac{\left( 1 - \frac{\sigma_{i-1/2, j+1, k+1}^* \cdot \Delta t}{2 \cdot \mu_{i-1/2, j+1, k+1}} \right)}{\left( 1 + \frac{\sigma_{i-1/2, j+1, k+1}^* \cdot \Delta t}{2 \cdot \mu_{i-1/2, j+1, k+1}} \right)} \right) H_x \Big|_{i-1/2, j+1, k+1}^n \\
 &+ \frac{\left( \frac{\Delta t}{\mu_{i-1/2, j+1, k+1}} \right)}{\left( 1 + \frac{\sigma_{i-1/2, j+1, k+1}^* \cdot \Delta t}{2 \cdot \mu_{i-1/2, j+1, k+1}} \right)} \left( \frac{E_y \Big|_{i-1/2, j+1, k+3/2}^{n+1/2} - E_y \Big|_{i-1/2, j+1, k+1/2}^{n+1/2}}{\Delta z} \right. \\
 &\left. - \frac{E_z \Big|_{i-1/2, j+3/2, k+1}^{n+1/2} - E_z \Big|_{i-1/2, j+1/2, k+1}^{n+1/2}}{\Delta y} - M_{source_x} \Big|_{i-1/2, j+1, k+1}^{n+1/2} \right) \quad (109)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
H_y|_{i,j+1/2,k+1}^{n+1} &= \left( \frac{\left(1 - \frac{\sigma^*_{i,j+1/2,k+1} \cdot \Delta t}{2 \cdot \mu_{i,j+1/2,k+1}}\right)}{\left(1 + \frac{\sigma^*_{i,j+1/2,k+1} \cdot \Delta t}{2 \cdot \mu_{i,j+1/2,k+1}}\right)} \right) H_y|_{i,j+1/2,k+1}^n \\
&+ \frac{\left(\frac{\Delta t}{\mu_{i,j+1/2,k+1}}\right)}{\left(1 + \frac{\sigma^*_{i,j+1/2,k+1} \cdot \Delta t}{2 \cdot \mu_{i,j+1/2,k+1}}\right)} \left( \frac{E_z|_{i+1/2,j+1/2,k+1}^{n+1/2} - E_z|_{i-1/2,j+1/2,k+1}^{n+1/2}}{\Delta x} \right. \\
&\left. - \frac{E_x|_{i,j+1/2,k+3/2}^{n+1/2} - E_x|_{i,j+1/2,k+1/2}^{n+1/2}}{\Delta z} - M_{source_y}|_{i,j+1/2,k+1}^{n+1/2} \right) \quad (110)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
H_z|_{i,j+1,k+1/2}^{n+1} &= \left( \frac{\left(1 - \frac{\sigma^*_{i,j+1,k+1/2} \cdot \Delta t}{2 \cdot \mu_{i,j+1,k+1/2}}\right)}{\left(1 + \frac{\sigma^*_{i,j+1,k+1/2} \cdot \Delta t}{2 \cdot \mu_{i,j+1,k+1/2}}\right)} \right) H_z|_{i,j+1,k+1/2}^n \\
&+ \frac{\left(\frac{\Delta t}{\mu_{i,j+1,k+1/2}}\right)}{\left(1 + \frac{\sigma^*_{i,j+1/2,k+1} \cdot \Delta t}{2 \cdot \mu_{i,j+1/2,k+1}}\right)} \left( \frac{E_x|_{i,j+3/2,k+1/2}^{n+1/2} - E_x|_{i,j+1/2,k+1/2}^{n+1/2}}{\Delta y} \right. \\
&\left. - \frac{E_y|_{i+1/2,j+1,k+1/2}^{n+1/2} - E_y|_{i-1/2,j+1,k+1/2}^{n+1/2}}{\Delta x} - M_{source_z}|_{i,j+1,k+1/2}^{n+1/2} \right) \quad (111)
\end{aligned}$$

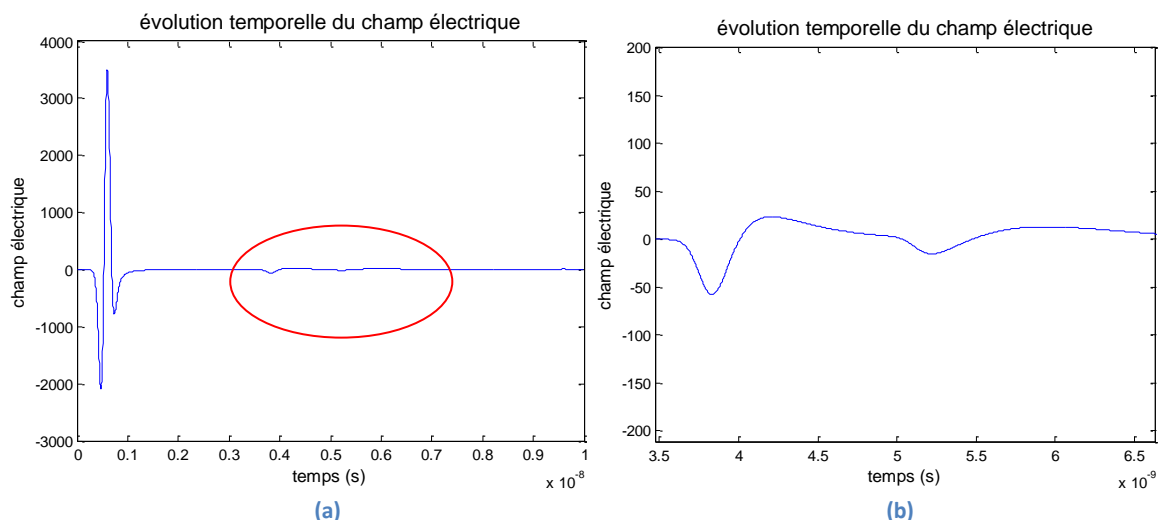
## Annexe 2 : Influence des conditions limites et de la discrétisation sur la modélisation

### I. Influence du type de condition limite

Initialement, dans le programme GprMax, nous avons le choix entre deux types de conditions absorbantes. Soit nous optons pour une condition limite locale d'absorption du type Higdon (3<sup>ème</sup> ordre), soit nous optons pour une condition du type PML (Perfectly Matched Layer). Par défaut, le programme considère l'ABC (Absorbing Boundary Condition) de Higdon. Toutefois, la performance de la PML est meilleure surtout si elle est définie avec plus de six couches. En fait, si nous optons pour une condition limite du type PML, le programme entoure le domaine de simulation de matériaux (physiquement non réalistes) qui absorbent fortement toutes les ondes électromagnétiques. Ce type de condition limite marche très bien quel que soit l'angle d'incidence ou la fréquence de l'impulsion incidente. La condition de Higdon quant à elle implique juste la construction d'une série d'opérateurs différentiels linéaires servant à annihiler l'onde numérique. On peut retrouver plus de renseignements à ce sujet dans le document de Taflove (Taflove A., 2005) et de Giannopoulos (Giannopoulos A., 2005).

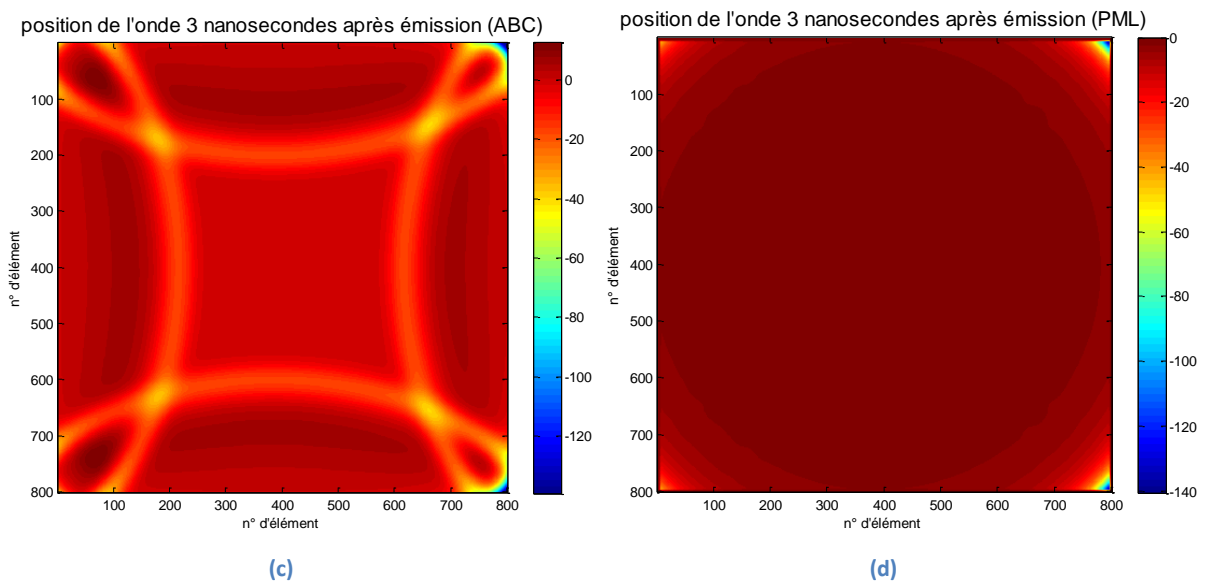
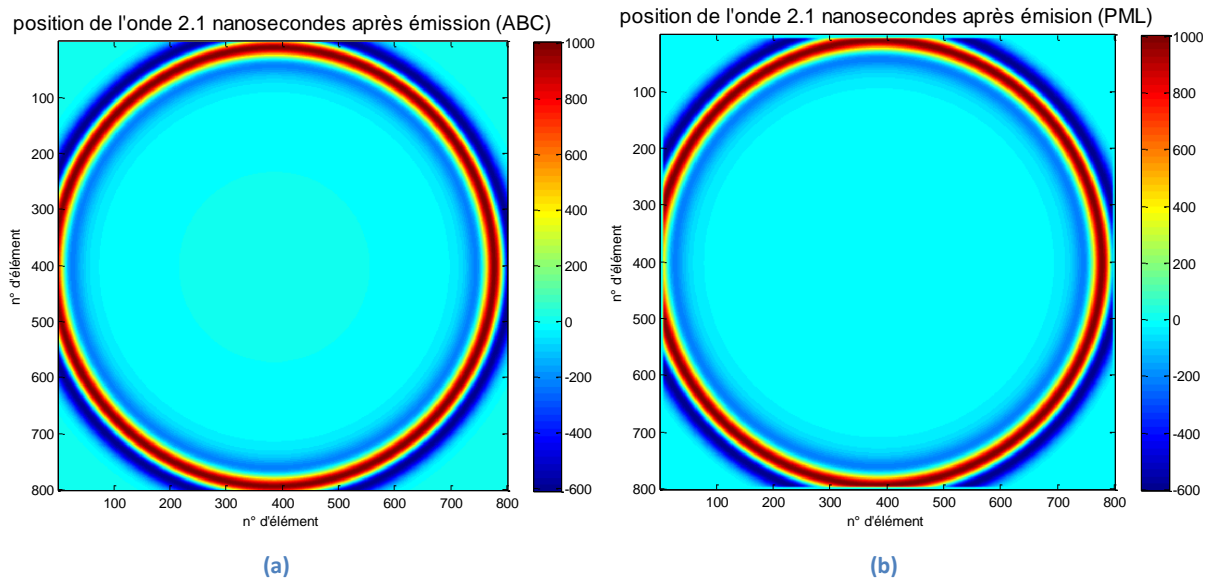
D'un côté pratique, dans cette version de GprMax, l'utilisateur ne peut pas agir sur les paramètres de la PML. En effet, ceux-ci sont déterminés automatiquement pour une performance optimale. La seule liberté laissée à l'utilisateur concerne le choix de l'épaisseur de cette couche. En effet, la valeur par défaut est de 8 cellules mais l'utilisateur peut facilement modifier ce nombre. Il faudra faire attention au fait que les couches PML font partie de la géométrie du modèle. La partie du domaine située à l'intérieur de la couche n'est d'aucun intérêt et il est faux de les utiliser dans les calculs. Par conséquent, il faut faire attention à ne pas placer des sources ou des récepteurs dans les zones du modèle occupées par une PML. Voilà pourquoi par défaut, le programme préfère utiliser une condition du type Higdon.

Analysons maintenant la différence entre les deux types de conditions. Pour ce faire, comparons la figure (32a), dans laquelle des conditions limites du type PML 8 cellules avaient été appliquées, avec une nouvelle simulation en considérant des ABC du type Higdon (figures 112a).



Ici, sur la figure 112a on peut voir apparaître des fluctuations étranges aux alentours de la 4<sup>ème</sup> nanoseconde, fluctuations mises en évidence par l'ellipse rouge. Ces fluctuations n'apparaissent pas lorsque une condition limite du type PML était utilisée (cf. figure n°32a). Elles ne correspondent à aucune réalité physique, puisque nous avons fait l'hypothèse d'un domaine infini. Dès lors, s'il n'y a aucun objet pour réfléchir l'onde, celle-ci va se propager dans toutes les directions jusqu'à l'infini. Une fois l'onde directe passée, il ne devrait rester aucune trace de celle-ci.

Pour mieux comprendre l'origine du problème, étudions la propagation des ondes dans les deux cas de figure. Ci-dessous, l'ABC de Higdon se trouve à gauche et la PML à droite.



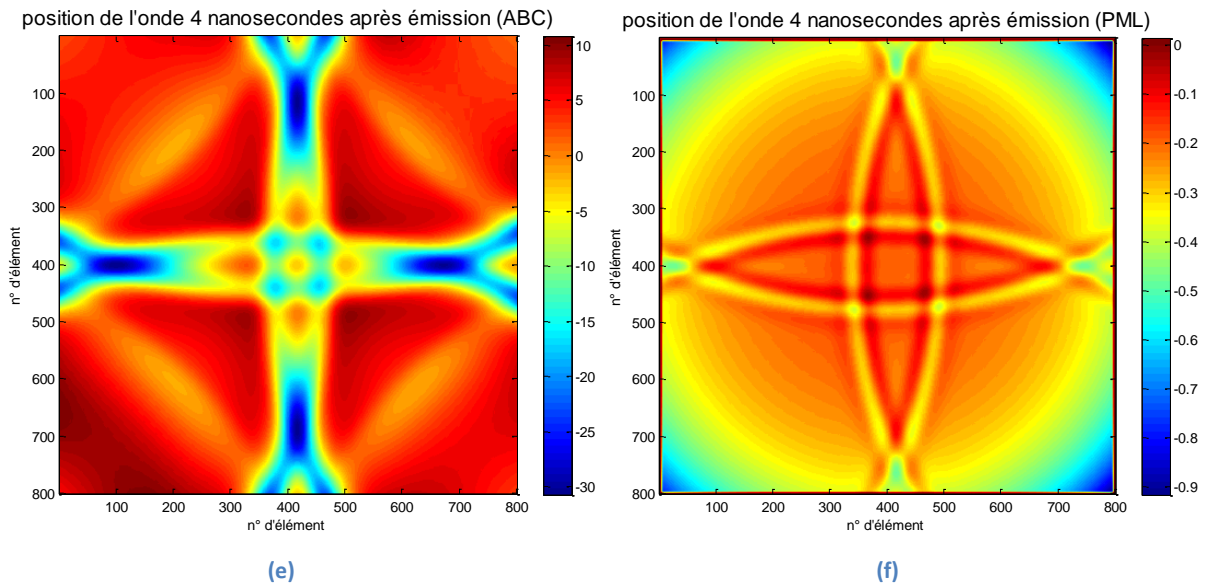


Figure 113: Comparaison PML-ABC de Higdon

Grâce aux figures 113a à 113f, nous pouvons mieux comprendre ce qui s'est passé. En effet, on constate bien que la condition limite PML est beaucoup plus efficace que l'ABC de Higdon. Nous pouvons clairement observer cela sur les figures 113c et 113d puisqu'on voit apparaître dans le cas de l'ABC une onde réfléchi dont l'amplitude n'est pas négligeable. Cela ne se voit pas sur la modélisation utilisant des conditions limites PML. Cependant, si on regarde plus attentivement les deux dernières figures (figures 113e et 113f), on constate quand même qu'aucune des deux conditions limites n'est parfaite puisque toutes les deux créent une certaine réflexion. Mais on peut signaler que l'amplitude du champ électrique réfléchi est 30 fois moins élevée en utilisant une PML. Dans les modélisations, nous avons donc opté pour des conditions limites du type perfectly matched layer (PML) puisqu'elles sont beaucoup plus efficaces que leurs homologues.

## II. Influence de la proximité d'une condition limite PML

Dans les autres modélisations, nous avons placé l'émetteur et le récepteur au centre de notre domaine, c'est-à-dire à une distance assez importante des bords de celui-ci puisque nous ne comptons pas moins de 384 cellules entre eux-ci et le bord le plus proche. Voyons ce qui se passe si nous plaçons l'émetteur à juste une cellule de la fin de la zone définissant une limite PML.

Le tableau 20 reprend les caractéristiques retenues pour la modélisation.

Tableau 20: Caractéristiques de la modélisation montrant l'influence de la proximité d'une condition limite(en dehors de la couche limite)

$\Delta x = \Delta y = \Delta l$	1,25mm
$\Delta t$	$2,95 \cdot 10^{-12}$ secondes
Durée de l'étude	$10 \cdot 10^{-9}$ secondes
Nombre d'itérations	3392 itérations
Position de l'émetteur $(x, y)$ en m	(0,01125 ; 0,5)
Position du récepteur $(x, y)$ en m	(0,05125 ; 0,5)

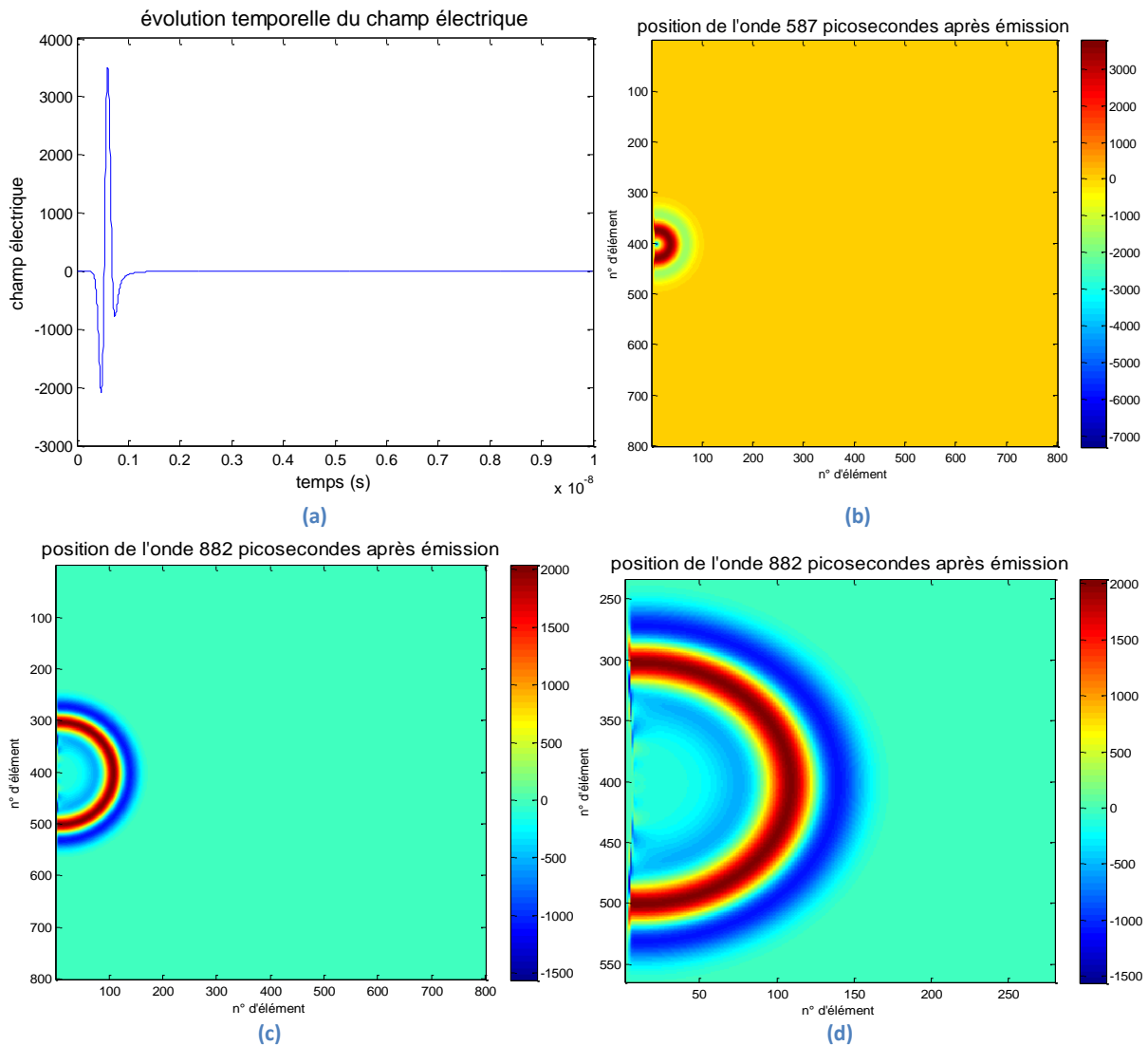


Figure 114: Propagation de l'onde si l'émetteur est à une cellule de la condition limite

En regardant de près les résultats présentés par les figures 114a à 114d, nous constatons que venir placer la source à proximité de la limite du domaine (tout en restant en dehors de la couche constituant la PML) n'influence pas les résultats. En effet, sur le premier graphique (figure 114a), nous pouvons constater que nous obtenons la même forme d'évolution du champ électrique que dans le cas initial (figure 32a). La seule différence réside dans la forme de la propagation de l'onde. En effet, seul un demi-cercle subsiste puisque le reste a directement été absorbé par la couche limite. Maintenant simulons ce qui se passe si par mégarde, nous plaçons l'émetteur dans cette couche PML. Plaçons-le par exemple à 4 cellules du bord. Cela signifie donc qu'il se trouvera juste au centre de la couche PML puisque par défaut celle-ci fait 8 cellules.

Le tableau 21 reprend les caractéristiques retenues pour la modélisation.

Tableau 21: Caractéristiques de la modélisation montrant l'influence de la proximité d'une condition limite (dans la couche limite)

$\Delta x = \Delta y = \Delta l$	1,25mm
$\Delta t$	$2,95 \cdot 10^{-12}$ secondes
Durée de l'étude	$10 \cdot 10^{-9}$ secondes
Nombre d'itérations	3392 itérations

Position de l'émetteur $(x, y)$ en m	(0,005 ; 0,5)
Position du récepteur $(x, y)$ en m	(0,045 ; 0,5)

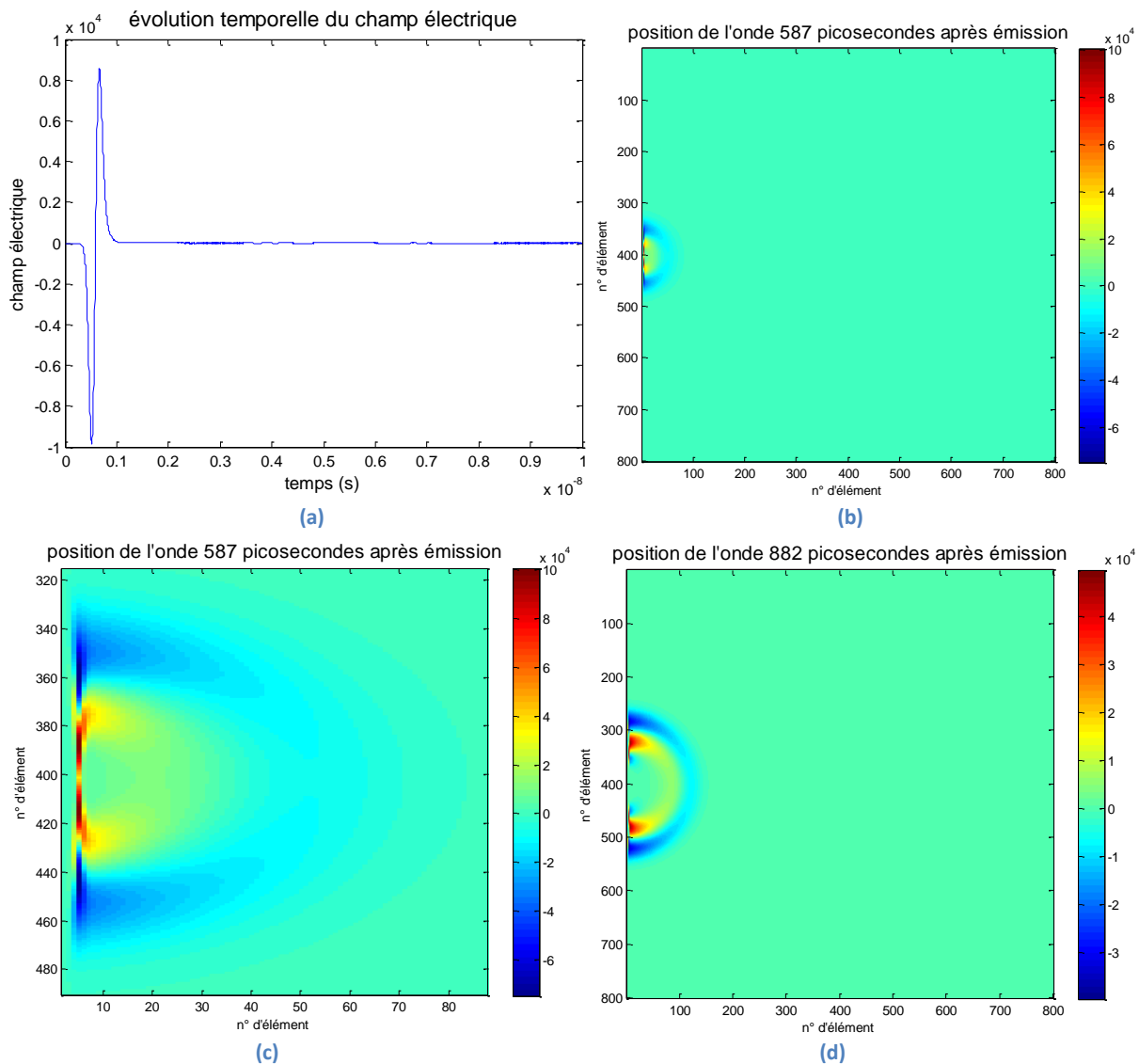


Figure 115: Propagation de l'onde si l'émetteur est dans la condition limite

Ici, sur les figures 115a à 115d, on peut clairement observer la perturbation apportée par cette mégarde. Les résultats obtenus sont totalement différents des cas précédents et clairement faussés par cette couche. Le gros problème, c'est que le programme ne nous renseigne à aucun moment que l'émetteur est dans la zone constituant la PML. Dès lors, c'est à nous de faire attention à placer dans la suite des modélisations l'émetteur en dehors de cette zone sinon les résultats obtenus ne pourront pas être analysés correctement.

### III. Influence du pas spatial

Dans ce 4<sup>ème</sup> point, nous allons tenter de mettre en évidence la perte de précision lorsque nous utilisons un pas spatial trop grossier. Nous avons vu dans le point 4 : « onde directe dans l'air » que la règle de bonne pratique demande de choisir un pas d'au moins 13 mm. Reprenons la modélisation de ce point 4 mais considérons ici un pas de 20 mm (tableau 21). Grâce à ce choix, nous ne respectons plus cette règle et nous pourrions voir ce qui se passe sur la figure 116.

Tableau 22: Caractéristiques de la modélisation montrant l'influence du pas spatial

$\Delta x = \Delta y = \Delta l$	20mm
$\Delta t$	$47 \cdot 10^{-12}$ secondes
Durée de l'étude	$10 \cdot 10^{-9}$ secondes
Nombre d'itérations	212 itérations
Position de l'émetteur (x, y) en m	(0,48; 0,5)
Position du récepteur (x, y) en m	(0,52 ; 0,5)

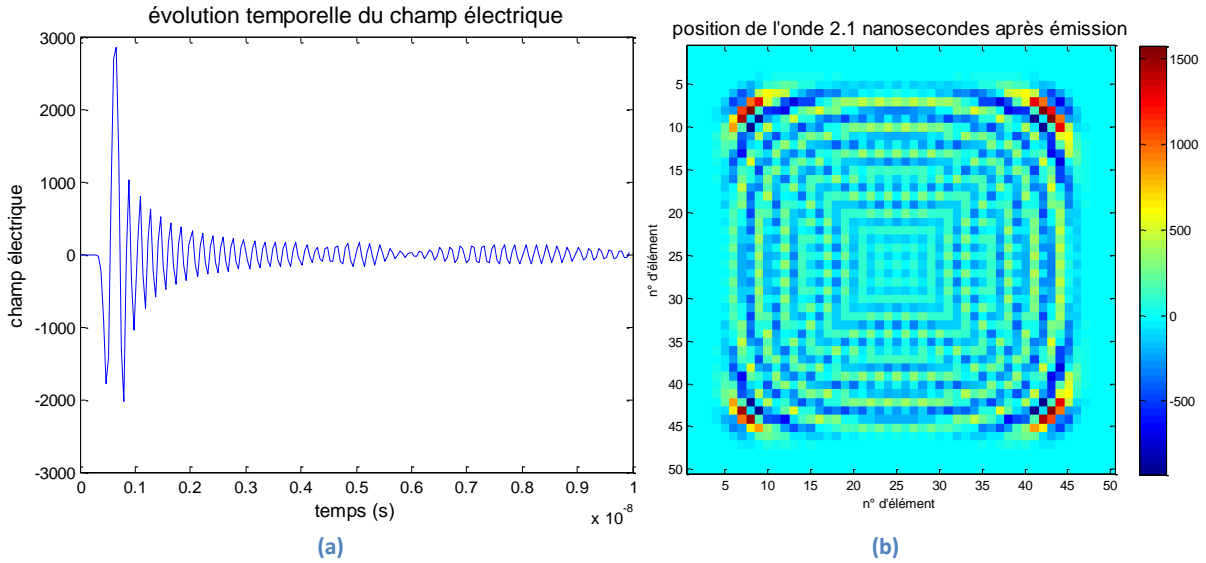


Figure 116: Etude de l'influence du pas spatial sur la propagation de l'onde

On peut clairement remarquer ici l'influence d'une discrétisation spatiale insuffisante. Plutôt que d'observer une propagation bien claire de l'onde et puis plus rien après son passage, on constate toute une série d'ondulations qui perdurent dans le temps. De plus, si on compare la position de front d'onde à 2,1 nanosecondes entre la discrétisation à 1,25mm (figure n°32b) et la discrétisation actuelle (figure 116b), on constate que celle-ci a pris du retard avec cette dernière discrétisation. Donc au final, si on ne respecte pas la règle précédente, on retrouve non seulement une erreur sur la forme du signal mais aussi une erreur sur la vitesse de propagation de l'onde.

## Annexe 3 : Code informatique

### Onde directe dans l'air:

```
-----  
#domain: 1 1  
#dx_dy: 0.00125 0.00125  
#time_window: 10e-9  
#abc_type: pml  
-----  
  
-----  
#line_source: 1.0 2300e6 ricker MyLineSource  
-----  
  
#analysis: 1 vide.out b  
#tx: 0.48 0.5 MyLineSource 0.0 6e-9  
#rx: 0.52 0.5  
#snapshot: 1 0 0 1 1 0.00125 0.00125 2.1e-9 snapvide1.out b  
#snapshot: 1 0 0 1 1 0.00125 0.00125 2.2e-9 snapvide2.out b  
#snapshot: 1 0 0 1 1 0.00125 0.00125 3e-9 snapvide3.out b  
#snapshot: 1 0 0 1 1 0.00125 0.00125 4e-9 snapvide4.out b  
#end_analysis:  
-----  
  
#geometry_file: vide.geo  
#title: vide  
#messages: y
```

### Influence du type de condition limite

```
-----  
#domain: 1 1  
#dx_dy: 0.00125 0.00125  
#time_window: 10e-9  
time_step_stability_factor: 1  
-----  
  
-----  
#line_source: 1.0 2300e6 ricker MyLineSource  
-----  
  
#analysis: 1 CL.out b  
#tx: 0.48 0.5 MyLineSource 0.0 6e-9  
#rx: 0.52 0.5  
#snapshot: 1 0 0 1 1 0.00125 0.00125 2.1e-9 snapCL1.out b  
#snapshot: 1 0 0 1 1 0.00125 0.00125 2.2e-9 snapCL2.out b  
#snapshot: 1 0 0 1 1 0.00125 0.00125 3e-9 snapCL3.out b  
#snapshot: 1 0 0 1 1 0.00125 0.00125 4e-9 snapCL4.out b  
#end_analysis:  
-----  
  
#geometry_file: CL.geo  
#title: CL  
#messages: y
```

## **Influence de la proximité d'une condition limite PML (à une cellule de distance)**

```
-----  
#domain: 1 1  
#dx_dy: 0.00125 0.00125  
#time_window: 10e-9  
time_step_stability_factor: 1  
#abc_type: pml  
-----  
  
-----  
#line_source: 1.0 2300e6 ricker MyLineSource  
-----  
  
#analysis: 1 proxi.out b  
#tx: 0.01125 0.5 MyLineSource 0.0 6e-9  
#rx: 0.05125 0.5  
#snapshot: 1 0 0 1 1 0.00125 0.00125 20 snapproxi1.out b  
#snapshot: 1 0 0 1 1 0.00125 0.00125 100 snapproxi2.out b  
#snapshot: 1 0 0 1 1 0.00125 0.00125 200 snapproxi3.out b  
#snapshot: 1 0 0 1 1 0.00125 0.00125 300 snapproxi4.out b  
#end_analysis:  
-----  
  
#geometry_file: proxi.geo  
#title: proxi  
#messages: y
```

## **Influence de la proximité d'une condition limite PML (dans celle-ci)**

```
-----  
#domain: 1 1  
#dx_dy: 0.00125 0.00125  
#time_window: 10e-9  
time_step_stability_factor: 1  
#abc_type: pml  
-----  
  
-----  
#line_source: 1.0 2300e6 ricker MyLineSource  
-----  
  
#analysis: 1 inside.out b  
#tx: 0.005 0.5 MyLineSource 0.0 6e-9  
#rx: 0.045 0.5  
#snapshot: 1 0 0 1 1 0.00125 0.00125 20 snapinside1.out b  
#snapshot: 1 0 0 1 1 0.00125 0.00125 100 snapinside2.out b  
#snapshot: 1 0 0 1 1 0.00125 0.00125 200 snapinside3.out b  
#snapshot: 1 0 0 1 1 0.00125 0.00125 300 snapinside4.out b  
#end_analysis:
```

```
-----  
#geometry_file: inside.geo  
#title: inside  
#messages: y
```

## **Influence du pas spatial**

```
-----  
#domain: 1 1  
#dx_dy: 0.02 0.02  
#time_window: 10e-9  
time_step_stability_factor: 1  
#abc_type: pml  
-----
```

```
-----  
#line_source: 1.0 2300e6 ricker MyLineSource  
-----
```

```
#analysis: 1 passpatial.out b  
#tx: 0.48 0.5 MyLineSource 0.0 6e-9  
#rx: 0.52 0.5  
#snapshot: 1 0 0 1 1 0.02 0.02 2.1e-9 snappasspatial1.out b  
#snapshot: 1 0 0 1 1 0.02 0.02 2.2e-9 snappasspatial2.out b  
#snapshot: 1 0 0 1 1 0.02 0.02 3e-9 snappasspatial3.out b  
#snapshot: 1 0 0 1 1 0.02 0.02 4e-9 snappasspatial4.out b  
#end_analysis:
```

```
-----  
#geometry_file: passpatial.geo  
#title: passpatial  
#messages: y
```

## **Etude de l'onde directe sur une dalle en béton infinie**

```
#medium: 4.5 0.0 0.0 0.005 1.0 0.0 concrete0  
-----
```

```
#domain: 1 1  
#dx_dy: 0.00125 0.00125  
#time_window: 10e-9  
#abc_type: pml  
-----
```

```
#box: 0.0 0.5 1 1 concrete0  
-----
```

```
#line_source: 1.0 2300e6 ricker MyLineSource  
-----
```

```
#analysis: 1 binfini.out b  
#tx: 0.48 0.49875 MyLineSource 0.0 6e-9  
#rx: 0.52 0.49875  
#snapshot: 1 0 0 1 1 0.00125 0.00125 2.1e-9 snapbinfini1.out b
```

```
#snapshot: 1 0 0 1 1 0.00125 0.00125 4.5e-9 snapbinfini2.out b
#snapshot: 1 0 0 1 1 0.00125 0.00125 0.1e-9 snapbinfini3.out b
#snapshot: 1 0 0 1 1 0.00125 0.00125 0.2e-9 snapbinfini4.out b
#end_analysis:
-----
#geometry_file: binfini.geo
#title: binfini
#messages: y
```

## **Etude sur une dalle finie (béton sec)**

```
#medium: 4.5 0.0 0.0 0.005 1.0 0.0 concrete0
-----
#domain: 1 1
#dx_dy: 0.00125 0.00125
#time_window: 10e-9
time_step_stability_factor: 1
#abc_type: pml
-----
#box: 0.1 0.45 0.9 0.55 concrete0
-----
#line_source: 1.0 2300e6 ricker MyLineSource
-----
#analysis: 1 dallefinie.out b
#tx: 0.48 0.44875 MyLineSource 0.0 6e-9
#rx: 0.52 0.44875
#snapshot: 1 0.0 0.0 1.0 1.0 0.00125 0.00125 1e-9 snapdallefinie1.out b
#snapshot: 1 0.0 0.0 1.0 1.0 0.00125 0.00125 1.1e-9 snapdallefinie2.out b
#snapshot: 1 0.0 0.0 1.0 1.0 0.00125 0.00125 1.2e-9 snapdallefinie3.out b
#snapshot: 1 0.0 0.0 1.0 1.0 0.00125 0.00125 1.3e-9 snapdallefinie4.out b
#snapshot: 1 0.0 0.0 1.0 1.0 0.00125 0.00125 1.5e-9 snapdallefinie5.out b
#snapshot: 1 0.0 0.0 1.0 1.0 0.00125 0.00125 2.1e-9 snapdallefinie6.out b
#snapshot: 1 0.0 0.0 1.0 1.0 0.00125 0.00125 4.5e-9 snapdallefinie7.out b
#snapshot: 1 0.0 0.0 1.0 1.0 0.00125 0.00125 8.5e-9 snapdallefinie8.out b
#end_analysis:
-----
#geometry_file: dallefinie.geo
#title: vide
#messages: y
```

## **Influence de la teneur en eau sur la réponse du signal (béton humide)**

```
#medium: 9 0.0 0.0 0.08 1.0 0.0 concrete9
-----
#domain: 1 1
#dx_dy: 0.00125 0.00125
#time_window: 10e-9
time_step_stability_factor: 1
```

```
#abc_type: pml
```

```
-----  
#box: 0.1 0.45 0.9 0.55 concrete9
```

```
-----  
#line_source: 1.0 2300e6 ricker MyLineSource
```

```
-----  
#analysis: 1 humide.out b
```

```
#tx: 0.48 0.44875 MyLineSource 0.0 6e-9
```

```
#rx: 0.52 0.44875
```

```
#snapshot: 1 0.0 0.0 1.0 1.0 0.00125 0.00125 1e-9 snaphumide1.out b
```

```
#snapshot: 1 0.0 0.0 1.0 1.0 0.00125 0.00125 1.1e-9 snaphumide2.out b
```

```
#snapshot: 1 0.0 0.0 1.0 1.0 0.00125 0.00125 1.2e-9 snaphumide3.out b
```

```
#snapshot: 1 0.0 0.0 1.0 1.0 0.00125 0.00125 1.3e-9 snaphumide4.out b
```

```
#snapshot: 1 0.0 0.0 1.0 1.0 0.00125 0.00125 1.5e-9 snaphumide5.out b
```

```
#snapshot: 1 0.0 0.0 1.0 1.0 0.00125 0.00125 2.1e-9 snaphumide6.out b
```

```
#snapshot: 1 0.0 0.0 1.0 1.0 0.00125 0.00125 4.5e-9 snaphumide7.out b
```

```
#snapshot: 1 0.0 0.0 1.0 1.0 0.00125 0.00125 8.5e-9 snaphumide8.out b
```

```
#end_analysis:
```

```
-----  
#geometry_file: humide.geo
```

```
#title: humide
```

```
#messages: y
```

## **Superposition de deux dalles à saturation**

```
#medium: 9 0.0 0.0 0.08 1.0 0.0 concrete9
```

```
-----  
#domain: 1 1
```

```
#dx_dy: 0.00125 0.00125
```

```
#time_window: 6e-9
```

```
time_step_stability_factor: 1
```

```
#abc_type: pml
```

```
-----  
#box: 0.1 0.40 0.9 0.50 concrete9
```

```
#box: 0.1 0.50 0.9 0.60 concrete9
```

```
-----  
#line_source: 1.0 2300e6 ricker MyLineSource
```

```
-----  
#analysis: 1 superpositionHH.out b
```

```
#tx: 0.48 0.39875 MyLineSource 0.0 6e-9
```

```
#rx: 0.52 0.39875
```

```
#snapshot: 1 0.0 0.0 1.0 1.0 0.00125 0.00125 1e-9 snapsuperpositionHH1.out b
```

```
#snapshot: 1 0.0 0.0 1.0 1.0 0.00125 0.00125 1.1e-9 snapsuperpositionHH2.out b
```

```
#snapshot: 1 0.0 0.0 1.0 1.0 0.00125 0.00125 1.2e-9 snapsuperpositionHH3.out b
```

```
#snapshot: 1 0.0 0.0 1.0 1.0 0.00125 0.00125 1.3e-9 snapsuperpositionHH4.out b
```

```
#snapshot: 1 0.0 0.0 1.0 1.0 0.00125 0.00125 1.5e-9 snapsuperpositionHH5.out b
```

```
#snapshot: 1 0.0 0.0 1.0 1.0 0.00125 0.00125 2.1e-9 snapsuperpositionHH6.out b
```

```
#snapshot: 1 0.0 0.0 1.0 1.0 0.00125 0.00125 4.5e-9 snapsuperpositionHH7.out b
```

```
#end_analysis:
```

```
-----  
#geometry_file: superpositionHH.geo
```

```
#title: superpositionHH
#messages: y
```

## Superposition d'une dalle sèche et d'une dalle humide

```
#medium: 9 0.0 0.0 0.08 1.0 0.0 concrete9
#medium: 4.5 0.0 0.0 0.005 1.0 0.0 concrete0
-----
#domain: 1 1
#dx_dy: 0.00125 0.00125
#time_window: 6e-9
time_step_stability_factor: 1
#abc_type: pml
-----
#box: 0.1 0.40 0.9 0.50 concrete0
#box: 0.1 0.50 0.9 0.60 concrete9
-----
#line_source: 1.0 2300e6 ricker MyLineSource
-----
#analysis: 1 superpositionSH.out b
#tx: 0.48 0.39875 MyLineSource 0.0 6e-9
#rx: 0.52 0.39875
#snapshot: 1 0.0 0.0 1.0 1.0 0.00125 0.00125 1e-9 snapsuperpositionSH1.out b
#snapshot: 1 0.0 0.0 1.0 1.0 0.00125 0.00125 1.1e-9 snapsuperpositionSH2.out b
#snapshot: 1 0.0 0.0 1.0 1.0 0.00125 0.00125 1.2e-9 snapsuperpositionSH3.out b
#snapshot: 1 0.0 0.0 1.0 1.0 0.00125 0.00125 1.3e-9 snapsuperpositionSH4.out b
#snapshot: 1 0.0 0.0 1.0 1.0 0.00125 0.00125 1.5e-9 snapsuperpositionSH5.out b
#snapshot: 1 0.0 0.0 1.0 1.0 0.00125 0.00125 2.1e-9 snapsuperpositionSH6.out b
#snapshot: 1 0.0 0.0 1.0 1.0 0.00125 0.00125 3e-9 snapsuperpositionSH7.out b
#snapshot: 1 0.0 0.0 1.0 1.0 0.00125 0.00125 3.5e-9 snapsuperpositionSH8.out b
#snapshot: 1 0.0 0.0 1.0 1.0 0.00125 0.00125 4.5e-9 snapsuperpositionSH9.out b
#snapshot: 1 0.0 0.0 1.0 1.0 0.00125 0.00125 5e-9 snapsuperpositionSH10.out b
#end_analysis:
-----
#geometry_file: superpositionSH.geo
#title: superpositionSH
#messages: y
```

## Etude du gradient se formant à la surface supérieure du béton : 1 couche

```
#medium: 9 0.0 0.0 0.08 1.0 0.0 concrete9
#medium: 4.5 0.0 0.0 0.005 1.0 0.0 concrete0
-----
#domain: 1 1
#dx_dy: 0.00125 0.00125
#time_window: 6e-9
```

```

time_step_stability_factor: 1
#abc_type: pml
-----
#box: 0.1 0.40 0.9 0.45 concrete0
#box: 0.1 0.45 0.9 0.50 concrete9
#box: 0.1 0.50 0.9 0.60 concrete9
-----
#line_source: 1.0 2300e6 ricker MyLineSource
-----
#analysis: 1 1couche.out b
#tx: 0.48 0.39875 MyLineSource 0.0 6e-9
#rx: 0.52 0.39875
#snapshot: 1 0.0 0.0 1.0 1.0 0.00125 0.00125 1e-9 snap1couche.out b
#snapshot: 1 0.0 0.0 1.0 1.0 0.00125 0.00125 1.1e-9 snap1couche2.out b
#snapshot: 1 0.0 0.0 1.0 1.0 0.00125 0.00125 1.2e-9 snap1couche3.out b
#snapshot: 1 0.0 0.0 1.0 1.0 0.00125 0.00125 1.3e-9 snap1couche4.out b
#snapshot: 1 0.0 0.0 1.0 1.0 0.00125 0.00125 1.5e-9 snap1couche5.out b
#snapshot: 1 0.0 0.0 1.0 1.0 0.00125 0.00125 2.1e-9 snap1couche6.out b
#snapshot: 1 0.0 0.0 1.0 1.0 0.00125 0.00125 4.5e-9 snap1couche7.out b
#end_analysis:
-----
#geometry_file: 1couche.geo
#title: 1couche
#messages: y

```

## **Etude du gradient se formant à la surface supérieure du béton : 3 couches**

```

#medium: 4.5 0.0 0.0 0.005 1.0 0.0 concrete0
#medium: 6 0.0 0.0 0.03 1.0 0.0 concrete1
#medium: 7.5 0.0 0.0 0.055 1.0 0.0 concrete2
#medium: 9 0.0 0.0 0.08 1.0 0.0 concrete9
-----
#domain: 1 1
#dx_dy: 0.00125 0.00125
#time_window: 6e-9
time_step_stability_factor: 1
#abc_type: pml
-----
#box: 0.1 0.4 0.9 0.4175 concrete0
#box: 0.1 0.4175 0.9 0.435 concrete1
#box: 0.1 0.435 0.9 0.45 concrete2
#box: 0.1 0.45 0.9 0.5 concrete9
#box: 0.1 0.5 0.9 0.6 concrete9
-----
#line_source: 1.0 2300e6 ricker MyLineSource
-----
#analysis: 1 3couches.out b
#tx: 0.48 0.39875 MyLineSource 0.0 6e-9
#rx: 0.52 0.39875
#snapshot: 1 0.0 0.0 1.0 1.0 0.00125 0.00125 1e-9 snap3couches1.out b

```

```

#snapshot: 1 0.0 0.0 1.0 1.0 0.00125 0.00125 1.1e-9 snap3couches2.out b
#snapshot: 1 0.0 0.0 1.0 1.0 0.00125 0.00125 1.2e-9 snap3couches3.out b
#snapshot: 1 0.0 0.0 1.0 1.0 0.00125 0.00125 1.3e-9 snap3couches4.out b
#snapshot: 1 0.0 0.0 1.0 1.0 0.00125 0.00125 1.5e-9 snap3couches5.out b
#snapshot: 1 0.0 0.0 1.0 1.0 0.00125 0.00125 2.1e-9 snap3couches6.out b
#snapshot: 1 0.0 0.0 1.0 1.0 0.00125 0.00125 3.5e-9 snap3couches7.out b
#snapshot: 1 0.0 0.0 1.0 1.0 0.00125 0.00125 4.5e-9 snap3couches8.out b
#end_analysis:
-----
#geometry_file: 3couches.geo
#title: 3couches
#messages: y

```

## **Etude du gradient se formant à la surface supérieure du béton : 40 couches**

Il est bon de signaler que le programme GprMax n'autorise par défaut que 8 matériaux différents. Dès lors, si on veut en utiliser plus, il faudra indiquer au programme le nombre de matériaux et placer la liste de ceux-ci dans un fichier annexe. On a donc dû créer un fichier « .dat » dans lequel on est venu mettre les différentes couches de béton. Voici ce fichier qui se nomme: medium.dat

#	4.5	0.0	0.0	0.005	1.0	0.0	concrete0
#	4.621621622	0.0	0.0	0.007027027	1.0	0.0	concrete1
#	4.743243243	0.0	0.0	0.009054054	1.0	0.0	concrete2
#	4.864864865	0.0	0.0	0.011081081	1.0	0.0	concrete3
#	4.986486486	0.0	0.0	0.013108108	1.0	0.0	concrete4
#	5.108108108	0.0	0.0	0.015135135	1.0	0.0	concrete5
#	5.22972973	0.0	0.0	0.017162162	1.0	0.0	concrete6
#	5.351351351	0.0	0.0	0.019189189	1.0	0.0	concrete7
#	5.472972973	0.0	0.0	0.021216216	1.0	0.0	concrete8
#	5.594594595	0.0	0.0	0.023243243	1.0	0.0	concrete10
#	5.716216216	0.0	0.0	0.02527027	1.0	0.0	concrete11
#	5.837837838	0.0	0.0	0.027297297	1.0	0.0	concrete12
#	5.959459459	0.0	0.0	0.029324324	1.0	0.0	concrete13
#	6.081081081	0.0	0.0	0.031351351	1.0	0.0	concrete14
#	6.202702703	0.0	0.0	0.033378378	1.0	0.0	concrete15
#	6.324324324	0.0	0.0	0.035405405	1.0	0.0	concrete16
#	6.445945946	0.0	0.0	0.037432432	1.0	0.0	concrete17
#	6.567567568	0.0	0.0	0.039459459	1.0	0.0	concrete18
#	6.689189189	0.0	0.0	0.041486486	1.0	0.0	concrete19
#	6.810810811	0.0	0.0	0.043513514	1.0	0.0	concrete20
#	6.932432432	0.0	0.0	0.045540541	1.0	0.0	concrete21
#	7.054054054	0.0	0.0	0.047567568	1.0	0.0	concrete22
#	7.175675676	0.0	0.0	0.049594595	1.0	0.0	concrete23
#	7.297297297	0.0	0.0	0.051621622	1.0	0.0	concrete24
#	7.418918919	0.0	0.0	0.053648649	1.0	0.0	concrete25
#	7.540540541	0.0	0.0	0.055675676	1.0	0.0	concrete26
#	7.662162162	0.0	0.0	0.057702703	1.0	0.0	concrete27
#	7.783783784	0.0	0.0	0.05972973	1.0	0.0	concrete28

#	7.905405405	0.0	0.0	0.061756757	1.0	0.0	concrete29
#	8.027027027	0.0	0.0	0.063783784	1.0	0.0	concrete30
#	8.148648649	0.0	0.0	0.065810811	1.0	0.0	concrete31
#	8.27027027	0.0	0.0	0.067837838	1.0	0.0	concrete32
#	8.391891892	0.0	0.0	0.069864865	1.0	0.0	concrete33
#	8.513513514	0.0	0.0	0.071891892	1.0	0.0	concrete34
#	8.635135135	0.0	0.0	0.073918919	1.0	0.0	concrete35
#	8.756756757	0.0	0.0	0.075945946	1.0	0.0	concrete36
#	8.878378378	0.0	0.0	0.077972973	1.0	0.0	concrete37
#	9	0.0	0.0	0.08	1.0	0.0	concrete9

Dans ce fichier on retrouve toutes les interpolations concernant les propriétés des matériaux. Il servira à plusieurs reprises dans la suite des fichiers de modélisation. On retrouvera d'ailleurs une commande pour l'appeler si besoin.

```

-----
#domain: 1 1
#dx_dy: 0.00125 0.00125
#time_window: 6e-9
time_step_stability_factor: 1
#abc_type: pml
#number_of_media: 40
#media_file: medium.dat
-----
#box: 0.1 0.4 0.9 0.40125 concrete0
#box: 0.1 0.40125 0.9 0.4025 concrete1
#box: 0.1 0.4025 0.9 0.40375 concrete2
#box: 0.1 0.40375 0.9 0.405 concrete3
#box: 0.1 0.405 0.9 0.40625 concrete4
#box: 0.1 0.40625 0.9 0.4075 concrete5
#box: 0.1 0.4075 0.9 0.40875 concrete6
#box: 0.1 0.40875 0.9 0.41 concrete7
#box: 0.1 0.41 0.9 0.41125 concrete8
#box: 0.1 0.41125 0.9 0.4125 concrete10
#box: 0.1 0.4125 0.9 0.41375 concrete11
#box: 0.1 0.41375 0.9 0.415 concrete12
#box: 0.1 0.415 0.9 0.41625 concrete13
#box: 0.1 0.41625 0.9 0.4175 concrete14
#box: 0.1 0.4175 0.9 0.41875 concrete15
#box: 0.1 0.41875 0.9 0.42 concrete16
#box: 0.1 0.42 0.9 0.42125 concrete17
#box: 0.1 0.42125 0.9 0.4225 concrete18
#box: 0.1 0.4225 0.9 0.42375 concrete19
#box: 0.1 0.42375 0.9 0.425 concrete20
#box: 0.1 0.425 0.9 0.42625 concrete21
#box: 0.1 0.42625 0.9 0.4275 concrete22
#box: 0.1 0.4275 0.9 0.42875 concrete23
#box: 0.1 0.42875 0.9 0.43 concrete24
#box: 0.1 0.43 0.9 0.43125 concrete25
#box: 0.1 0.43125 0.9 0.4325 concrete26
#box: 0.1 0.4325 0.9 0.43375 concrete27
#box: 0.1 0.43375 0.9 0.435 concrete28

```

```

#box: 0.1 0.435 0.9 0.43625 concrete29
#box: 0.1 0.43625 0.9 0.4375 concrete30
#box: 0.1 0.4375 0.9 0.43875 concrete31
#box: 0.1 0.43875 0.9 0.44 concrete32
#box: 0.1 0.44 0.9 0.44125 concrete33
#box: 0.1 0.44125 0.9 0.4425 concrete34
#box: 0.1 0.4425 0.9 0.44375 concrete35
#box: 0.1 0.44375 0.9 0.445 concrete36
#box: 0.1 0.445 0.9 0.44625 concrete37
#box: 0.1 0.44625 0.9 0.6 concrete9

```

```

-----
#line_source: 1.0 2300e6 ricker MyLineSource
-----

```

```

#analysis: 1 40couches.out b

```

```

#tx: 0.48 0.39875 MyLineSource 0.0 6e-9

```

```

#rx: 0.52 0.39875

```

```

#snapshot: 1 0.0 0.0 1.0 1.0 0.00125 0.00125 1e-9 snap40couches1.out b

```

```

#snapshot: 1 0.0 0.0 1.0 1.0 0.00125 0.00125 1.1e-9 snap40couches2.out b

```

```

#snapshot: 1 0.0 0.0 1.0 1.0 0.00125 0.00125 1.2e-9 snap40couches3.out b

```

```

#snapshot: 1 0.0 0.0 1.0 1.0 0.00125 0.00125 1.3e-9 snap40couches4.out b

```

```

#snapshot: 1 0.0 0.0 1.0 1.0 0.00125 0.00125 1.5e-9 snap40couches5.out b

```

```

#snapshot: 1 0.0 0.0 1.0 1.0 0.00125 0.00125 2.1e-9 snap40couches6.out b

```

```

#snapshot: 1 0.0 0.0 1.0 1.0 0.00125 0.00125 3.5e-9 snap40couches7.out b

```

```

#snapshot: 1 0.0 0.0 1.0 1.0 0.00125 0.00125 4.5e-9 snap40couches8.out b

```

```

#end_analysis:

```

```

-----
#geometry_file: 40couches.geo

```

```

#title: 40couches

```

```

#messages: y

```

## **Etude du gradient se formant à l'interface entre une dalle sèche et humide : 3couches**

```

#medium: 4.5 0.0 0.0 0.005 1.0 0.0 concrete0
#medium: 5.625 0.0 0.0 0.02375 1.0 0.0 concrete1
#medium: 6.75 0.0 0.0 0.0425 1.0 0.0 concrete2
#medium: 7.875 0.0 0.0 0.06125 1.0 0.0 concrete3
#medium: 9 0.0 0.0 0.08 1.0 0.0 concrete9

```

```

-----
#domain: 1 1

```

```

#dx_dy: 0.00125 0.00125

```

```

#time_window: 6e-9

```

```

time_step_stability_factor: 1

```

```

#abc_type: pml

```

```

-----
#box: 0.1 0.4 0.9 0.45 concrete0

```

```

#box: 0.1 0.45 0.9 0.4675 concrete1

```

```

#box: 0.1 0.4675 0.9 0.485 concrete2

```

```

#box: 0.1 0.485 0.9 0.5 concrete3

```

```

#box: 0.1 0.5 0.9 0.6 concrete9

```

```

#line_source: 1.0 2300e6 ricker MyLineSource
-----
#analysis: 1 3couches.out b
#tx: 0.48 0.39875 MyLineSource 0.0 6e-9
#rx: 0.52 0.39875
#snapshot: 1 0.0 0.0 1.0 1.0 0.00125 0.00125 1e-9 snap3couches1.out b
#snapshot: 1 0.0 0.0 1.0 1.0 0.00125 0.00125 1.1e-9 snap3couches2.out b
#snapshot: 1 0.0 0.0 1.0 1.0 0.00125 0.00125 1.2e-9 snap3couches3.out b
#snapshot: 1 0.0 0.0 1.0 1.0 0.00125 0.00125 1.3e-9 snap3couches4.out b
#snapshot: 1 0.0 0.0 1.0 1.0 0.00125 0.00125 1.5e-9 snap3couches5.out b
#snapshot: 1 0.0 0.0 1.0 1.0 0.00125 0.00125 2.1e-9 snap3couches6.out b
#snapshot: 1 0.0 0.0 1.0 1.0 0.00125 0.00125 3.5e-9 snap3couches7.out b
#snapshot: 1 0.0 0.0 1.0 1.0 0.00125 0.00125 4.5e-9 snap3couches8.out b
#end_analysis:
-----
#geometry_file: 3couches.geo
#title: 3couches
#messages: y

```

## **Etude du gradient se formant à l'interface entre une dalle sèche et humide : 40 couches**

Remarque : le fichier medium.dat utilisé est similaire au précédent. On ne le reprendra donc pas ici.

```

-----
#domain: 1 1
#dx_dy: 0.00125 0.00125
#time_window: 6e-9
time_step_stability_factor: 1
#abc_type: pml
#number_of_media: 40
#media_file: medium.dat
-----
#box:    0.1    0.4    0.9    0.45125    concrete0
#box:    0.1    0.45125    0.9    0.4525    concrete1
#box:    0.1    0.4525 0.9    0.45375    concrete2
#box:    0.1    0.45375    0.9    0.455    concrete3
#box:    0.1    0.455 0.9    0.45625    concrete4
#box:    0.1    0.45625    0.9    0.4575    concrete5
#box:    0.1    0.4575 0.9    0.45875    concrete6
#box:    0.1    0.45875    0.9    0.46    concrete7
#box:    0.1    0.46 0.9    0.46125    concrete8
#box:    0.1    0.46125    0.9    0.4625    concrete10
#box:    0.1    0.4625 0.9    0.46375    concrete11
#box:    0.1    0.46375    0.9    0.465    concrete12
#box:    0.1    0.465 0.9    0.46625    concrete13
#box:    0.1    0.46625    0.9    0.4675    concrete14
#box:    0.1    0.4675 0.9    0.46875    concrete15
#box:    0.1    0.46875    0.9    0.47    concrete16
#box:    0.1    0.47 0.9    0.47125    concrete17
#box:    0.1    0.47125    0.9    0.4725    concrete18

```

```

#box: 0.1 0.4725 0.9 0.47375 concrete19
#box: 0.1 0.47375 0.9 0.475 concrete20
#box: 0.1 0.475 0.9 0.47625 concrete21
#box: 0.1 0.47625 0.9 0.4775 concrete22
#box: 0.1 0.4775 0.9 0.47875 concrete23
#box: 0.1 0.47875 0.9 0.48 concrete24
#box: 0.1 0.48 0.9 0.48125 concrete25
#box: 0.1 0.48125 0.9 0.4825 concrete26
#box: 0.1 0.4825 0.9 0.48375 concrete27
#box: 0.1 0.48375 0.9 0.485 concrete28
#box: 0.1 0.485 0.9 0.48625 concrete29
#box: 0.1 0.48625 0.9 0.4875 concrete30
#box: 0.1 0.4875 0.9 0.48875 concrete31
#box: 0.1 0.48875 0.9 0.49 concrete32
#box: 0.1 0.49 0.9 0.49125 concrete33
#box: 0.1 0.49125 0.9 0.4925 concrete34
#box: 0.1 0.4925 0.9 0.49375 concrete35
#box: 0.1 0.49375 0.9 0.495 concrete36
#box: 0.1 0.495 0.9 0.49625 concrete37
#box: 0.1 0.495 0.9 0.6 concrete9

```

```

-----
#line_source: 1.0 2300e6 ricker MyLineSource
-----

```

```

#analysis: 1 40couches.out b
#tx: 0.48 0.39875 MyLineSource 0.0 6e-9
#rx: 0.52 0.39875
#snapshot: 1 0.0 0.0 1.0 1.0 0.00125 0.00125 1e-9 snap40couches1.out b
#snapshot: 1 0.0 0.0 1.0 1.0 0.00125 0.00125 1.1e-9 snap40couches2.out b
#snapshot: 1 0.0 0.0 1.0 1.0 0.00125 0.00125 1.2e-9 snap40couches3.out b
#snapshot: 1 0.0 0.0 1.0 1.0 0.00125 0.00125 1.3e-9 snap40couches4.out b
#snapshot: 1 0.0 0.0 1.0 1.0 0.00125 0.00125 1.5e-9 snap40couches5.out b
#snapshot: 1 0.0 0.0 1.0 1.0 0.00125 0.00125 2.1e-9 snap40couches6.out b
#snapshot: 1 0.0 0.0 1.0 1.0 0.00125 0.00125 3.5e-9 snap40couches7.out b
#snapshot: 1 0.0 0.0 1.0 1.0 0.00125 0.00125 4.5e-9 snap40couches8.out b
#end_analysis:

```

```

-----
#geometry_file: 40couches.geo
#title: 40couches
#messages: y

```

## **Etude de l'influence de l'épaisseur du gradient : 1cm**

Remarque : le fichier medium.dat utilisé est similaire au précédent mais la variation des propriétés se fait bien désormais sur 8 couches et non sur 37. On ne le reprendra donc pas ici.

```

-----
#domain: 1 1
#dx_dy: 0.00125 0.00125
#time_window: 6e-9
time_step_stability_factor: 1
#abc_type: pml

```

```

#number_of_media: 40
#media_file: medium.dat
-----
#box: 0.1 0.40 0.9 0.49125 concrete0
#box: 0.1 0.49125 0.9 0.4925 concrete1
#box: 0.1 0.4925 0.9 0.49375 concrete2
#box: 0.1 0.49375 0.9 0.495 concrete3
#box: 0.1 0.495 0.9 0.49625 concrete4
#box: 0.1 0.49625 0.9 0.4975 concrete5
#box: 0.1 0.4975 0.9 0.49875 concrete6
#box: 0.1 0.49875 0.9 0.5 concrete7
#box: 0.1 0.5 0.9 0.6 concrete9
-----
excitation_file: usersource0.125.dat
#line_source: 1.0 2300e6 ricker MyLineSource
-----
#analysis: 1 1cm.out b
#tx: 0.48 0.39875 MyLineSource 0.0 6e-9
#rx: 0.52 0.39875
#end_analysis:
-----
#geometry_file: 1cm.geo
#title: 1cm
#messages: y

```

## **Etude de l'influence de l'épaisseur du gradient : 2cm**

Remarque : le fichier medium.dat utilisé est similaire au précédent mais la variation des propriétés se fait bien désormais sur 16 couches. On ne le reprendra donc pas ici.

```

-----
#domain: 1 1
#dx_dy: 0.00125 0.00125
#time_window: 6e-9
time_step_stability_factor: 1
#abc_type: pml
#number_of_media: 40
#media_file: medium.dat
-----
#box: 0.1 0.40 0.9 0.48125 concrete0
#box: 0.1 0.48125 0.9 0.4825 concrete1
#box: 0.1 0.4825 0.9 0.48375 concrete2
#box: 0.1 0.48375 0.9 0.485 concrete3
#box: 0.1 0.485 0.9 0.48625 concrete4
#box: 0.1 0.48625 0.9 0.4875 concrete5
#box: 0.1 0.4875 0.9 0.48875 concrete6
#box: 0.1 0.48875 0.9 0.49 concrete7
#box: 0.1 0.49 0.9 0.49125 concrete8
#box: 0.1 0.49125 0.9 0.4925 concrete10
#box: 0.1 0.4925 0.9 0.49375 concrete11
#box: 0.1 0.49375 0.9 0.495 concrete12
#box: 0.1 0.495 0.9 0.49625 concrete13

```

```

#box: 0.1 0.49625 0.9 0.4975 concrete14
#box: 0.1 0.4975 0.9 0.49875 concrete15
#box: 0.1 0.49875 0.9 0.5 concrete16
#box: 0.1 0.5 0.9 0.6 concrete9

```

```

-----
excitation_file: usersource0.125.dat
#line_source: 1.0 2300e6 ricker MyLineSource
-----

```

```

#analysis: 1 2cm.out b
#tx: 0.48 0.39875 MyLineSource 0.0 6e-9
#rx: 0.52 0.39875
#end_analysis:
-----

```

```

#geometry_file: 2cm.geo
#title: 2cm
#messages: y

```

## **Etude de l'influence de l'épaisseur du gradient : 3cm**

Remarque : le fichier medium.dat utilisé est similaire au précédent mais la variation des propriétés se fait bien désormais sur 24 couches. On ne le reprendra donc pas ici.

```

-----
#domain: 1 1
#dx_dy: 0.00125 0.00125
#time_window: 6e-9
time_step_stability_factor: 1
#abc_type: pml
#number_of_media: 40
#media_file: medium.dat
-----
#box: 0.1 0.40 0.9 0.47125 concrete0
#box: 0.1 0.47125 0.9 0.4725 concrete1
#box: 0.1 0.4725 0.9 0.47375 concrete2
#box: 0.1 0.47375 0.9 0.475 concrete3
#box: 0.1 0.475 0.9 0.47625 concrete4
#box: 0.1 0.47625 0.9 0.4775 concrete5
#box: 0.1 0.4775 0.9 0.47875 concrete6
#box: 0.1 0.47875 0.9 0.48 concrete7
#box: 0.1 0.48 0.9 0.48125 concrete8
#box: 0.1 0.48125 0.9 0.4825 concrete10
#box: 0.1 0.4825 0.9 0.48375 concrete11
#box: 0.1 0.48375 0.9 0.485 concrete12
#box: 0.1 0.485 0.9 0.48625 concrete13
#box: 0.1 0.48625 0.9 0.4875 concrete14
#box: 0.1 0.4875 0.9 0.48875 concrete15
#box: 0.1 0.48875 0.9 0.49 concrete16
#box: 0.1 0.49 0.9 0.49125 concrete17
#box: 0.1 0.49125 0.9 0.4925 concrete18
#box: 0.1 0.4925 0.9 0.49375 concrete19
#box: 0.1 0.49375 0.9 0.495 concrete20

```

```

#box: 0.1 0.495 0.9 0.49625 concrete21
#box: 0.1 0.49625 0.9 0.4975 concrete22
#box: 0.1 0.4975 0.9 0.49875 concrete23
#box: 0.1 0.49875 0.9 0.5 concrete24
#box: 0.1 0.5 0.9 0.6 concrete9

```

```

-----
excitation_file: usersource0.125.dat
#line_source: 1.0 2300e6 ricker MyLineSource
-----

```

```

#analysis: 1 3cm.out b
#tx: 0.48 0.39875 MyLineSource 0.0 6e-9
#rx: 0.52 0.39875
#end_analysis:
-----

```

```

#geometry_file: 3cm.geo
#title: 3cm
#messages: y

```

## **Etude de l'influence de l'épaisseur du gradient : 4cm**

Remarque : le fichier medium.dat utilisé est similaire au précédent mais la variation des propriétés se fait bien désormais sur 32 couches. On ne le reprendra donc pas ici.

```

-----
#domain: 1 1
#dx_dy: 0.00125 0.00125
#time_window: 6e-9
time_step_stability_factor: 1
#abc_type: pml
#number_of_media: 40
#media_file: medium.dat
-----
#box: 0.1 0.40 0.9 0.46125 concrete0
#box: 0.1 0.46125 0.9 0.4625 concrete1
#box: 0.1 0.4625 0.9 0.46375 concrete2
#box: 0.1 0.46375 0.9 0.465 concrete3
#box: 0.1 0.465 0.9 0.46625 concrete4
#box: 0.1 0.46625 0.9 0.4675 concrete5
#box: 0.1 0.4675 0.9 0.46875 concrete6
#box: 0.1 0.46875 0.9 0.47 concrete7
#box: 0.1 0.47 0.9 0.47125 concrete8
#box: 0.1 0.47125 0.9 0.4725 concrete10
#box: 0.1 0.4725 0.9 0.47375 concrete11
#box: 0.1 0.47375 0.9 0.475 concrete12
#box: 0.1 0.475 0.9 0.47625 concrete13
#box: 0.1 0.47625 0.9 0.4775 concrete14
#box: 0.1 0.4775 0.9 0.47875 concrete15
#box: 0.1 0.47875 0.9 0.48 concrete16
#box: 0.1 0.48 0.9 0.48125 concrete17
#box: 0.1 0.48125 0.9 0.4825 concrete18
#box: 0.1 0.4825 0.9 0.48375 concrete19
#box: 0.1 0.48375 0.9 0.485 concrete20

```

```

#box: 0.1 0.485 0.9 0.48625 concrete21
#box: 0.1 0.48625 0.9 0.4875 concrete22
#box: 0.1 0.4875 0.9 0.48875 concrete23
#box: 0.1 0.48875 0.9 0.49 concrete24
#box: 0.1 0.49 0.9 0.49125 concrete25
#box: 0.1 0.49125 0.9 0.4925 concrete26
#box: 0.1 0.4925 0.9 0.49375 concrete27
#box: 0.1 0.49375 0.9 0.495 concrete28
#box: 0.1 0.495 0.9 0.49625 concrete29
#box: 0.1 0.49625 0.9 0.4975 concrete30
#box: 0.1 0.4975 0.9 0.49875 concrete31
#box: 0.1 0.49875 0.9 0.5 concrete32
#box: 0.1 0.5 0.9 0.6 concrete9

```

```

-----
excitation_file: usersource0.125.dat
#line_source: 1.0 2300e6 ricker MyLineSource
-----

```

```

#analysis: 1 4cm.out b
#tx: 0.48 0.39875 MyLineSource 0.0 6e-9
#rx: 0.52 0.39875
tx_steps: 0.01 0.0
rx_steps: 0.01 0.0
#end_analysis:
-----

```

```

#geometry_file: 4cm.geo
#title: 4cm
#messages: y

```

## **Etude de l'influence de l'épaisseur du gradient : 5cm**

Remarque : le programme utilisé est identique au programme correspondant à l'étude du gradient se formant à l'interface entre une dalle sèche et humide de 40 couches. On ne le reprendra donc pas ici.

## **Influence de la forme du gradient**

Remarque : le programme utilisé est similaire à celui correspondant à l'étude du gradient de 40 couches se formant à l'interface entre une dalle sèche et humide. On ne le reprendra donc pas ici. La seule différence vient du fichier medium.dat. Dans cette étude il fallait utiliser le fichier suivant :

```

# 4.5 0.0 0.0 0.005 1.0 0.0 concrete0
# 4.50001 0.0 0.0 0.00684212 1.0 0.0 concrete1
# 4.50003 0.0 0.0 0.008589801 1.0 0.0 concrete2
# 4.50005 0.0 0.0 0.010250114 1.0 0.0 concrete3
# 4.5001 0.0 0.0 0.011829531 1.0 0.0 concrete4
# 4.5002 0.0 0.0 0.013333926 1.0 0.0 concrete5
# 4.5005 0.0 0.0 0.014769083 1.0 0.0 concrete6
# 4.501 0.0 0.0 0.016139949 1.0 0.0 concrete7
# 4.502 0.0 0.0 0.017452198 1.0 0.0 concrete8
# 4.504 0.0 0.0 0.018712271 1.0 0.0 concrete10
# 4.51 0.0 0.0 0.019937825 1.0 0.0 concrete11
# 4.52 0.0 0.0 0.021135185 1.0 0.0 concrete12

```

#	4.56	0.0	0.0	0.022438095	1.0	0.0	concrete13
#	4.62	0.0	0.0	0.023818667	1.0	0.0	concrete14
#	4.7	0.0	0.0	0.025291939	1.0	0.0	concrete15
#	4.8	0.0	0.0	0.026871795	1.0	0.0	concrete16
#	5	0.0	0.0	0.029035639	1.0	0.0	concrete17
#	5.5	0.0	0.0	0.033045267	1.0	0.0	concrete18
#	6.25	0.0	0.0	0.038762626	1.0	0.0	concrete19
#	7.25	0.0	0.0	0.046319444	1.0	0.0	concrete20
#	8	0.0	0.0	0.052553606	1.0	0.0	concrete21
#	8.5	0.0	0.0	0.057318008	1.0	0.0	concrete22
#	8.7	0.0	0.0	0.060129944	1.0	0.0	concrete23
#	8.8	0.0	0.0	0.062251852	1.0	0.0	concrete24
#	8.88	0.0	0.0	0.064214208	1.0	0.0	concrete25
#	8.94	0.0	0.0	0.066008602	1.0	0.0	concrete26
#	8.98	0.0	0.0	0.06762716	1.0	0.0	concrete27
#	8.99	0.0	0.0	0.068985764	1.0	0.0	concrete28
#	8.996	0.0	0.0	0.070276444	1.0	0.0	concrete29
#	8.998	0.0	0.0	0.071499259	1.0	0.0	concrete30
#	8.999	0.0	0.0	0.072678491	1.0	0.0	concrete31
#	8.9995	0.0	0.0	0.073819428	1.0	0.0	concrete32
#	8.9998	0.0	0.0	0.074925871	1.0	0.0	concrete33
#	8.9999	0.0	0.0	0.075999156	1.0	0.0	concrete34
#	8.99995	0.0	0.0	0.077041826	1.0	0.0	concrete35
#	8.99997	0.0	0.0	0.078055295	1.0	0.0	concrete36
#	8.99999	0.0	0.0	0.079041008	1.0	0.0	concrete37
#	9	0.0	0.0	0.08	1.0	0.0	concrete9

## Réflexion sur une feuille métallique

```
#medium: 9 0.0 0.0 0.08 1.0 0.0 concrete9
#medium: 4.5 0.0 0.0 0.005 1.0 0.0 concrete0
-----
#domain: 1 1
#dx_dy: 0.00125 0.00125
#time_window: 6e-9
time_step_stability_factor: 1
#abc_type: pml
-----
#box: 0.1 0.40 0.9 0.50 concrete0
#box: 0.1 0.50 0.9 0.50125 pec
#box: 0.1 0.50125 0.9 0.60 concrete9
-----
#line_source: 1.0 2300e6 ricker MyLineSource
-----
#analysis: 1 reflexion.out b
#tx: 0.48 0.39875 MyLineSource 0.0 6e-9
#rx: 0.52 0.39875
#snapshot: 1 0.0 0.0 1.0 1.0 0.00125 0.00125 1e-9 snapreflexion1.out b
#snapshot: 1 0.0 0.0 1.0 1.0 0.00125 0.00125 1.1e-9 snapreflexion2.out b
#snapshot: 1 0.0 0.0 1.0 1.0 0.00125 0.00125 1.2e-9 snapreflexion3.out b
#snapshot: 1 0.0 0.0 1.0 1.0 0.00125 0.00125 1.3e-9 snapreflexion4.out b
#snapshot: 1 0.0 0.0 1.0 1.0 0.00125 0.00125 1.5e-9 snapreflexion5.out b
```

```
#snapshot: 1 0.0 0.0 1.0 1.0 0.00125 0.00125 2.1e-9 snapreflexion6.out b  
#snapshot: 1 0.0 0.0 1.0 1.0 0.00125 0.00125 4.5e-9 snapreflexion7.out b  
#end_analysis:
```

```
-----  
#geometry_file: reflexion.geo
```

```
#title: reflexion
```

```
#messages: y
```

# Annexe 4 : Bon de commande



Université  
de Liège

**BON DE COMMANDE**  
n° ULG11/1449414/R

(à rappeler dans toute correspondance)

## Adresse de facturation

Université de Liège  
Administration des Ressources Financières  
Service Contrôle Factures  
Place du Vingt-Août, 7  
B-4000 LIEGE Belgique  
N° de TVA: BE0325777171  
Tél: +32 4 / 366 57 40 Fax: +32 4 / 366 52 53

Attn.:  
FARNELL BELGIUM  
RUE DE L'AEROPOSTALE 11  
B-4460 GRACE-HOLLOGNE

## Adresse de livraison

Monsieur  
COURARD Luc  
ARGENCO - GeMMe - Service matériaux de  
Chemin des Chevreuils, 1  
Bât: B 52 - Parking 52  
B-4000 LIEGE 1 (SART-TILMAN)  
Tél: +32 4 3669350 Fax: +32 4 3669520

Le délégué de l'université pour l'exécution du présent marché est :  
Mme Van der Wielen Audrey - Tél.: 04/366 93 50

Votre offre : GQ 9859.. du 24.02.2011

Conditions de paiement : 50 jours calendrier

Conditions particulières :

Poste	Désignation	Quantité	Un.	T.TVA	Prix HTVA	Total HTVA
0010	Data logger RH+TEMP - réf. 8522898	10	PCE	21,00	69,10	691,00
0020	Sensor Humidity T&EMP V4 - réf. 1590511 - Suivant votre offre de prix GQ 9859-0894 FRAIKIA du 24/02/2011	5	PCE	21,00	22,82	114,10

Veillez obligatoirement mentionner notre numéro de TVA  
BE 0325.777.171 sur chaque facture conformément  
à l'AR.1,art 5, §1er du Code TVA

<b>Total HTVA</b>	<b>EUR</b>	805,10
<b>TVA</b>	<b>EUR</b>	169,07
<b>Total TVAC</b>	<b>EUR</b>	974,17

### Régime applicable au Marché

- Le présent marché est régi par la loi du 24-12-93, relative aux marchés publics et à certains marchés de travaux, de fournitures et de services, les Arrêtés Royaux du 08-01-96 et 26-09-96 établissant les règles générales d'exécution des marchés publics et des concessions de travaux publics, tels qu'ils ont été modifiés jusqu'au jour de la passation du marché.

- Les conditions générales habituellement imposées par le fournisseur ou l'entrepreneur sont annulées et remplacées par les dispositions du présent bon de commande même si l'offre s'y réfère expressément.

- Chaque commande doit faire l'objet d'une facture distincte.

Liège, le 28.02.2011

Signé électroniquement par :  
pour le délégué, le secrétaire exécutif  
Madame Pascale FOGUENNE

## **Annexe 5 : Offre de prix**

From: [vincentlamour@cementys.com](mailto:vincentlamour@cementys.com)  
To: [avdwielen@ulg.ac.be](mailto:avdwielen@ulg.ac.be)  
Subject: Teneur en eau dalle en béton  
Date: Thu, 17 Feb 2011 10:54:00 +0100  
CC:

---

Bonjour,

Nous avons bien reçu votre demande d'informations pour la solution de mesure de gradient de teneur en eau dans une dalle en béton.

Nous avons déjà effectué ce type de mesure de deux manières différentes avec le LMT Cachan, l'Ecole Centrale de Lille, EdF et l'Andra :

- mesure par sonde HydraCap : mesure du gradient d'humidité interne au béton

Il vous faut l'isotherme d'adsorption d'eau si vous voulez remonter à la teneur en eau.

Coût de la centrale d'acquisition autonome MobiLogger+ 5 sondes HydraCap = 5200 euros HT

Location pour une année : 1850 Euros HT (récupération des sondes)

Cette solution permet la récupération des sondes mais n'est pas durable sur une échelle de plus de 5 ans (la puce électronique est étalonnée pour deux ans de mesure)

- mesure par sonde HydraPter

Cette mesure de teneur en eau volumique est basée sur la technologie TDR.

Elle est durable, les sondes sont noyées dans le béton (sonde non récupérable)

Coût de la centrale pour 8 sondes TDR : 8500 euros (location pour une année : 2500 Euros)

Coût des sondes HydraPter : 300 euros la sonde avec 5m de câble

Je joins les Fiches techniques à ce mail.

Je reste à votre disposition pour discuter avec vous de la problématique de mesure de teneur en eau dans le béton.

Cordialement  
Vincent Lamour

---

**Vincent Lamour**

Directeur Technique et Scientifique

**CEMENTYS S.A.S**

Portable : 06 07 09 32 54

Tel : 01 48 52 21 68

Fax : 01 48 52 23 80

Siege Social : 27 Villa Daviel 75013 Paris, France

Bureaux & Laboratoires : 29 Avenue de la République 94600 - Choisy-Le-Roi, France

Centre d'Essais de la Manche : 5 Fosse Yvon- 50440 Beaumont-Hague, France

[www.cementys.com](http://www.cementys.com)

Organisme de formation agréé, Cementys vous propose son [catalogue de formation professionnelle 2011-2012 en ligne](#)

# Annexe 6 : Certificat d'étalonnage



laboratoire Belge de Thermométrie  
Je du Bosquet 7, B-1348 Louvain-la-Neuve - Belgium  
tel : +32 (0)10/45 48 56 Fax : +32 (0)10/45 49 34  
welcome@lbt-blt.be



## CERTIFICAT D'ETALONNAGE

### Thermo-hygromètre à mémoire

UNIVERSITE DE LIEGE - FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES  
Laboratoire des Matériaux de Construction  
Laboratoire de Mécanique des Matériaux & Structure  
allée des Chevreuils, 1  
B-4000 Liège

Date d'exécution : du 23/02/2011 au 25/02/2011  
Délivré le : 25 février 2011  
Nombre total de pages : 2  
Numéro de certificat : 1102-043

Une étiquette identifie l'appareil avec le numéro de certificat.

#### DESCRIPTION DE L'APPAREIL

Marque : ELPRO  
Modèle : ECOLOG  
Type : TH2  
Série : 65822  
Identification : 559

Identification Barcode LBT : APP\_09994

#### GENERALITES

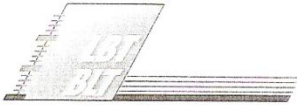
Les thermomètres sont étalonnés au moyen d'étalons rattachés aux étalons nationaux et internationaux, suivant l'Echelle Internationale de Température de 1990 (EIT-90).  
L'incertitude de mesure élargie est définie comme l'incertitude-type, multipliée par un facteur d'élargissement  $k = 2$  ce qui, pour une distribution normale, correspond à un niveau de confiance d'environ 95%.

La température ambiante du laboratoire est de  $23 \pm 2$  °C avec une humidité relative de  $50 \pm 20$  %.

Maud Moreau-Lizé  
Suppléante d'accréditation

Ce certificat d'étalonnage est délivré  
en conformité avec les conditions d'accréditations de BELAC  
Ce certificat d'étalonnage ne peut être reproduit  
qu'intégralement, sauf autorisation écrite de  
reproduction partielle donnée par le laboratoire.

Page 1 de 2



N° accréditation BELAC : 001-CAL  
Numéro de certificat : 1102-043  
Délivré le : 25 février 2011  
Identification : 559

**Méthode de mesure :** les observations ont lieu dans une enceinte climatique et ont été contrôlées au moyen d'un étalon.

**Logiciel utilisé :** ElproLog V3.20

**Nombre de mesures :** 10 lectures

**Traitement des résultats :** chaque valeur mentionnée est la moyenne ajustée ou non, selon le cas

**Étalon(s) utilisé(s) :**

Identification	Désignation
53/tr/2	Hygromètre étalon à point de rosée
70006/26	Thermomètre étalon à résistance de platine

## RESULTAT DES MESURES

### DESCRIPTION DE LA SONDE

Description : sonde combinée  
Marque : ELPRO  
Modèle : 3087  
Type : hygroclip  
Série : 2009 19748  
Dossier : 559

Identification Barcode LBT : SON\_06026

### Humidité relative

#### Mesures lecture affichage digital

Température [°C]	Valeur lue [%RH]	Valeur vraie [%RH]	Erreur [%RH]	Incertitude [%RH]
21	39.5	40.0	-0.5	1.0
21	59.6	60.0	-0.4	1.2
21	90.6	90.0	0.6	1.7

### Température

#### Mesures lecture affichage digital

Valeur lue [°C]	Valeur vraie [°C]	Erreur [°C]	Incertitude [°C]
5.1	5.0	0.1	0.10
15.0	15.0	0.0	0.10
24.9	25.0	-0.1	0.10

07/10/11  
Certificat d'étalonnage validé

Les incertitudes dans le certificat d'étalonnage s'appliquent uniquement aux valeurs mesurées pendant la durée de l'étalonnage et ne donnent aucune information sur la stabilité à long terme de l'instrument.

## **Annexe 7 : Méthode d'analyse de la permittivité diélectrique basée sur le coefficient de réflexion**

En fait, cette approche est similaire à celle réalisée dans la partie modélisation. Nous allons étudier le coefficient de réflexion de l'onde sur la face supérieure du béton. Pour ce faire nous plaçons le radar à une certaine distance de cette face (environ 80 cm). Nous réalisons une mesure de l'onde avec (figure 117a) et sans feuille métallique (figure 117b) placée sur la surface du béton. La différence d'amplitude pic à pic est égale au coefficient de réflexion. De ce coefficient de réflexion, nous tirons la valeur de permittivité diélectrique de la surface du béton. Il faut bien faire attention qu'ici on travaille en surface, nous n'obtenons pas comme dans la méthode suivante une valeur moyenne de la permittivité au sein de la dalle.



Figure 117 : Mesure de l'onde réfléchie sur une feuille métallique (a) et sur le béton (b)

Réalisons par exemple l'expérience pour la dalle à 60% HR. Nous avons fait les deux tests précédemment cités. Vu que le radar que l'on utilise voit son onde directe changer au cours du temps, il est nécessaire de réaliser avant analyse une certaine correction des signaux. Premièrement, nous devons enlever la dérive de ceux-ci, pour cela il suffit de venir soustraire à l'ensemble des points la valeur moyenne des signaux. Ensuite, il faut s'assurer que les graphiques se superposent correctement. Si ce n'est pas le cas, nous viendrons réaliser un décalage pour assurer une superposition parfaite de ceux-ci. Finalement, avant de venir lire la valeur de l'amplitude pic à pic, nous devons venir soustraire l'onde directe du signal dans l'air afin de bien isoler l'impact de la dalle en béton et de sa réflexion.

Voici les graphiques avant (figure 118a) et après traitement (figure 118b) dans le cas de la dalle à 60% HR :

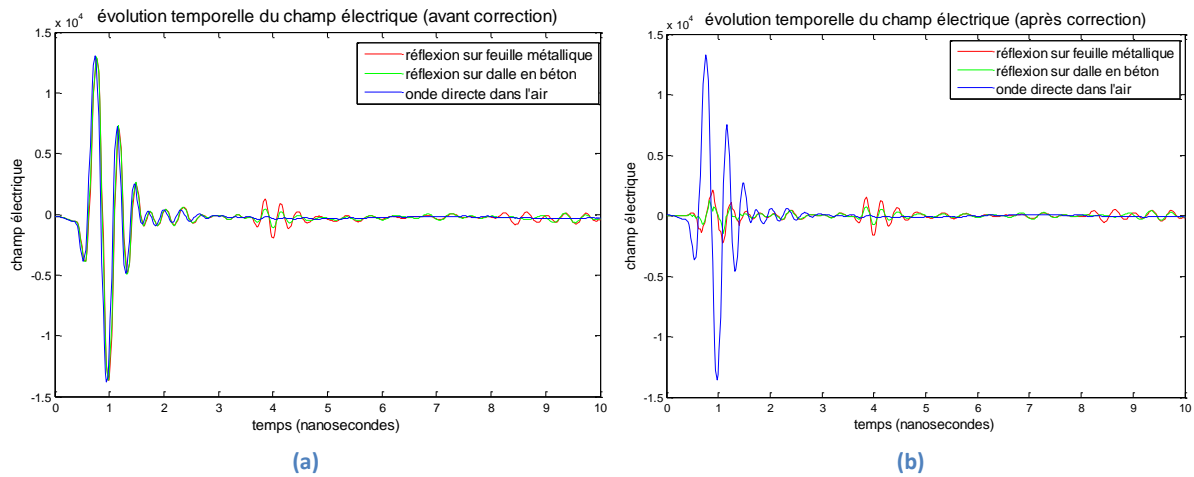


Figure 118: Détermination du coefficient de réflexion avant (a) et après (b) correction des signaux

Si on réalise un agrandit sur la zone qui nous intéresse, nous pouvons trouver les valeurs de l’amplitude pic à pic :

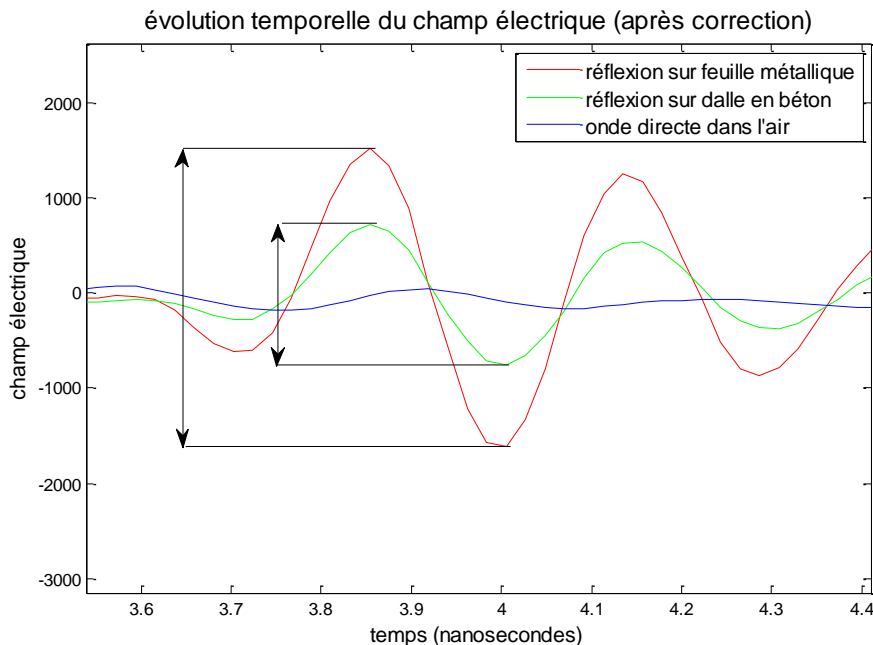


Figure 119: Détermination de la permittivité diélectrique des dalles par l’approche du coefficient de réflexion

Grâce à la figure 119, nous pouvons déterminer les valeurs des amplitudes. Pour la réflexion sur la feuille métallique, nous trouvons une amplitude de 3119,7 et pour la réflexion sur la dalle en béton seule, nous trouvons une amplitude de 1477,3. Le coefficient de réflexion est donc égal à (Van der Wielen A., 2011):

$$R = \frac{3119,7}{1477,3} = 0.474 = \frac{\cos \theta_1 - \sqrt{\frac{\epsilon_{r2}}{\epsilon_{r1}} - \sin^2 \theta_1}}{\cos \theta_1 + \sqrt{\frac{\epsilon_{r2}}{\epsilon_{r1}} - \sin^2 \theta_1}} \quad (112)$$

Dans la formule précédente, seule la permittivité diélectrique du béton ( $\epsilon_{r2}$ ) est inconnue. En effet,  $\epsilon_{r1}$  est connue puisqu’il s’agit de la permittivité relative de l’air ( $\epsilon_{r1} = 1$ ) et en ce qui concerne l’angle d’incidence  $\theta$ , nous supposons que la distance séparant l’émetteur et le récepteur est

négligeable vis-à-vis de la hauteur séparant le radar de la dalle, nous supposons donc  $\theta = 0^\circ$ . Après résolution, nous trouvons que la permittivité de surface de la dalle à 60% HR est de  $\varepsilon_{r2} = 7,82$ . Nous pouvons procéder de la même manière pour l'ensemble des dalles utilisées dans la partie expérimentale. Comme annoncé, on ne développe pas le calcul pour tous les cas, mais les résultats peuvent être retrouvés dans le tableau 23 ci-dessous :

**Tableau 23: Détermination de la permittivité de surface des dalles utilisées**

	Dalle 2009 (60% HR)	Dalle 2009 (100% HR)	Dalle 2011 (100% HR)
<i>Amplitude pic à pic sur feuille métallique</i>	3119,7	5981	6208,5
<i>Amplitude pic à pic sur la dalle en béton</i>	1477,3	3060,1	3267,91
<i>Coefficient de réflexion</i>	0,4735	0,5116	0,5264
$\theta$	0	0	0
$\varepsilon_{r1}$	1	1	1
$\varepsilon_{r2}$	7,834	9,581	10,385

On constate comme attendu que la permittivité de la dalle à 60% HR est inférieure à la permittivité des dalles à 100% HR. En ce qui concerne ces deux dernières, on constate que leurs permittivités sont certes différentes l'une de l'autre ce qui est logique puisqu'il s'agit de deux dalles différentes, mais celles-ci restent quand même relativement proches.

On peut quand même noter que les valeurs obtenues par la méthode basée sur la vitesse de propagation de l'onde sont en quelques sortes plus représentatives que ces valeurs. En effet, dans le cas présent, si une fine pellicule d'eau se trouve à la surface du béton, cette pellicule vient perturber la réflexion de l'onde sur la face du béton. Cela se traduit au final par une augmentation virtuelle de la permittivité de celui-ci. C'est ce qui explique sûrement le fait que dans le premier cas, pour la dalle réalisée en 2011, nous trouvons  $\varepsilon_r' = 8,89$ , tandis qu'ici pour la même dalle nous trouvons  $\varepsilon_r' = 10,39$ . Vu que cette dalle était déjà placée dans un bac d'eau pour la mesure par réflexion, il se peut que l'on n'ait pas suffisamment nettoyé sa surface avant de prendre la mesure. L'inverse est vrai aussi si le temps de mise en place du système est trop long, la dalle a le temps de légèrement sécher et cela a un impact sur le coefficient de réflexion.

De plus, ici, on note une certaine incohérence puisque la permittivité de la dalle de 2011 est supérieure à la permittivité de la dalle de 2009 à 100% HR alors que si on se réfère aux calculs du point 2, sa teneur en eau est inférieure à celle de la dalle de 2009. En effet, si on en croit les courbes de Soustos (Soustos M.N., 2001), vu que la teneur en eau de la dalle de 2011 à l'état saturé est de 6%, il est logique de trouver une valeur de permittivité plus faible que la permittivité de la dalle de 2009 à 100% HR puisque pour cette dernière, on a vu que la teneur en eau avoisinait les 10,5%. Par contre, si on se réfère à la figure 91, en ce qui concerne la dalle de 2009 entreposée dans un environnement de 60% HR, la teneur en eau de celle-ci devrait avoisiner les 4%. Sa permittivité devrait donc être légèrement moindre que celle de la dalle de 2011. Heureusement nous n'observons pas cette incohérence dans la méthode basée sur la vitesse.

## Annexe 8 : Etude de l'influence du séchage du silicone sur le capteur

Pour mettre en évidence la surestimation des valeurs attendues dues au silicone, il suffit de venir placer un capteur dans une enceinte hermétique, enceinte contenant également un récipient avec du silicone. Grâce à cette petite expérience, on peut regarder la réponse du capteur lors du séchage de celui-ci. La figure 120 présente l'expérience actuelle:



Figure 120: Illustration du test de l'influence du silicone sur les capteurs

En ce qui concerne le protocole suivi, après mise en place du silicone dans son récipient, nous avons directement placé le couvercle hermétique sur la boîte contenant le capteur et le silicone. Nous avons laissé la réaction se dérouler tranquillement jusqu'au lendemain. A partir de ce moment, nous avons trouvé intéressant de regarder ce qui se passait si on réalisait une ouverture du couvercle durant 30 min suivi d'une fermeture hermétique durant 1 h. Nous avons répété quelques fois ce cycle. Ensuite, nous avons laissé le couvercle jusqu'au lendemain. La figure 121 présente la réponse du capteur.

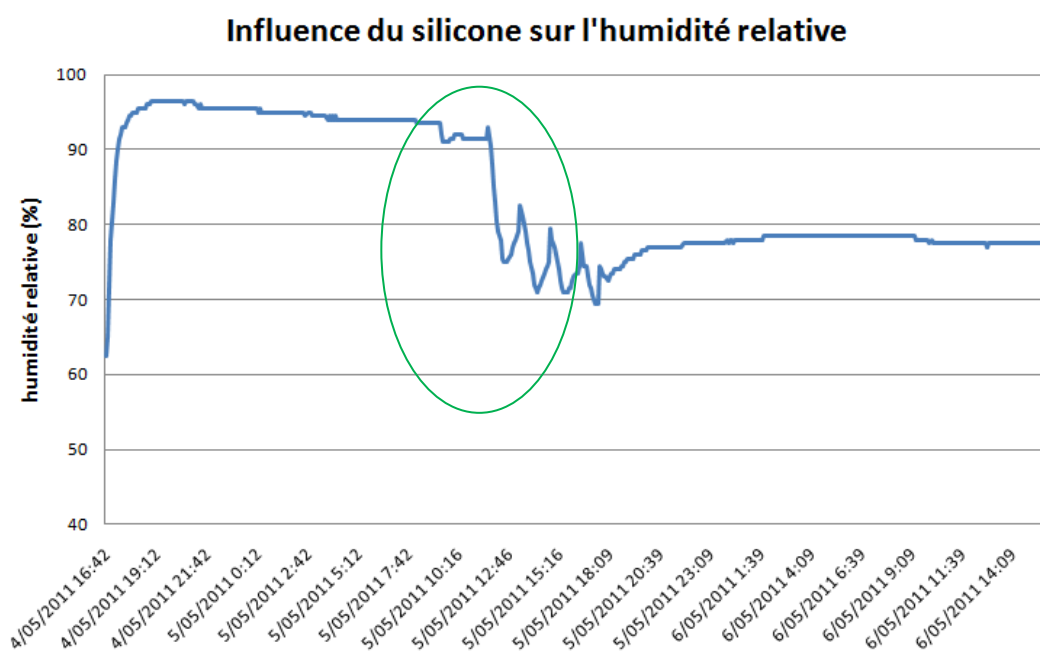


Figure 121: Influence du silicone sur l'humidité relative perçue par un capteur

On constate que le solvant du silicone vient bien perturber les capteurs hygrométriques puisqu'on observe une augmentation de l'humidité relative perçue lors du séchage de celui-ci. Or il se trouve que la réaction du silicone ne dégage pas d'eau. Cette montée est donc une sorte d'artefact. Grâce à la zone en vert qui correspond aux divers cycles d'ouverture et de fermeture de l'enceinte, on constate que dès qu'il y a un apport d'air, le capteur nous indique une diminution de l'humidité relative. En fait, l'acide acétique dégagé par la réaction de séchage du silicone se mélange avec de l'air neuf, ce qui crée une diminution de sa concentration. Or, vu que le capteur ne dissocie pas l'acide acétique de l'eau, il observe une diminution de l'humidité relative alors qu'en fait il y a juste une diminution de la concentration d'acide acétique dans l'air. Si on referme le couvercle, la réaction du silicone continue et la concentration en acide augmente de nouveau, c'est ce qui explique les divers cycles observés.

## Annexe 9 : Détermination de l'humidité introduite par le carottage

Pour essayer de mettre en évidence l'impact de l'eau introduite par le carottage, nous allons travailler sur un cube (figure 122).



Figure 122: Influence de l'humidité introduite par forage

Ce cube a été placé en même temps que la dalle dans la pièce à 60% HR, c'est-à-dire il y a plus ou moins un an. Nous avons essayé de reproduire la même procédure que celle suivie initialement pour la mise en place des capteurs. Pour imiter l'isolement de la cavité due au matériau de rebouchage, un bouchon en liège a été placé une heure après réalisation du forage.

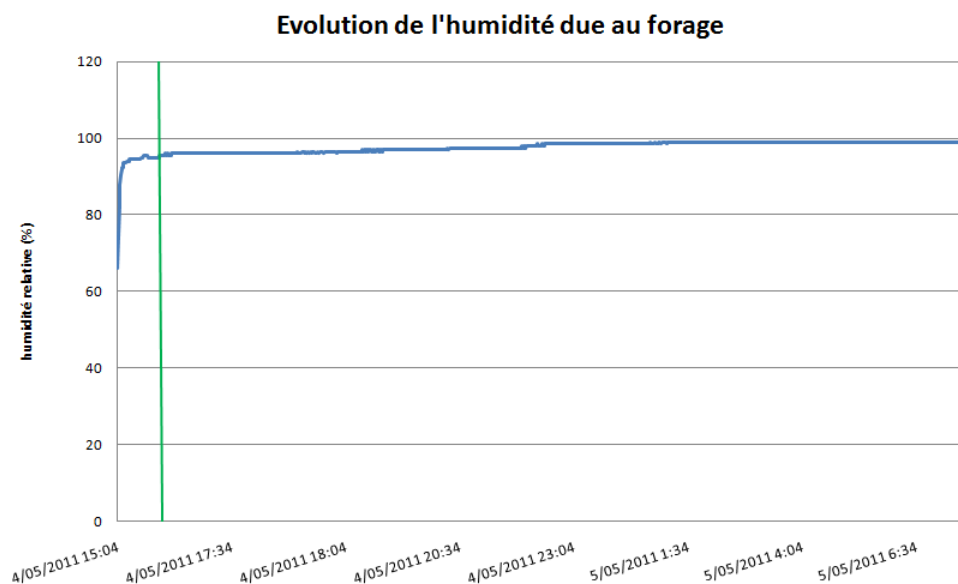


Figure 123: Etude de l'évolution de l'humidité relative due au carottage par voie humide

La figure 123, nous montre que l'apport d'eau dû au forage n'est en fait pas négligeable. En effet, directement après mise en place du capteur, on constate une brusque montée de l'humidité jusqu'à ce que celle-ci atteigne un palier aux alentours de 95% HR. Ensuite, vers 16 h, nous avons appliqué un bouchon sur le forage. A partir de ce moment (représenté par la ligne verte), l'humidité n'a fait qu'augmenter pour se stabiliser à 99% HR.

Il est vraisemblable que l'eau apportée par ce carottage ait joué un impact dans le fait que les capteurs donnaient toujours 100% HR alors qu'ils étaient placés dans une dalle supposée être à 60% HR. Cependant, il est dangereux de tirer trop vite des conclusions. En effet, certes l'utilisation d'un forage par voie humide n'est pas la meilleure solution en ce qui nous concerne puisque nous apportons une certaine quantité d'eau dans la dalle. Mais rien ne nous dit que l'eau apportée par le carottage est seule responsable de cette montée d'humidité. En effet, il s'avère que l'humidité au sein de la dalle n'est pas de 60% HR (cf. annexe 10). Cependant après mise en place du bouchon, nous observons que l'humidité au sein de la cavité se stabilise à 99% HR. Or dans l'annexe 10, on met en évidence le fait que l'équilibre de la dalle se situe plus aux alentours de 94% HR. L'eau du forage augmente donc bien virtuellement l'humidité interne.

## **Annexe 10 : Détermination de l'humidité au sein d'un forage par voie sèche dans la dalle à 60% HR**

Dans le chapitre montage expérimental, l'hypothèse de dalles stabilisées à l'humidité relative des pièces dans lesquelles elles étaient entreposées a été utilisée. Malheureusement, vu que dans le cas de la configuration n°1, les capteurs donnent des réponses supérieures à celles attendues, on peut se demander si cette hypothèse est correcte ou non. Pour la vérifier, nous pouvons réaliser un forage d'une épaisseur de 5 cm et y placer un capteur. Cela permet simplement de vérifier l'humidité obtenue dans la cavité par équilibre des échanges entre l'air de celle-ci et le béton. Directement après réalisation du forage, on place un bouchon sur l'extrémité du forage afin d'éviter toute perturbation par le milieu extérieur. Bien entendu ce forage est réalisé par voie sèche. La figure 124 présente la réponse d'un capteur placé à 5 cm de profondeur :

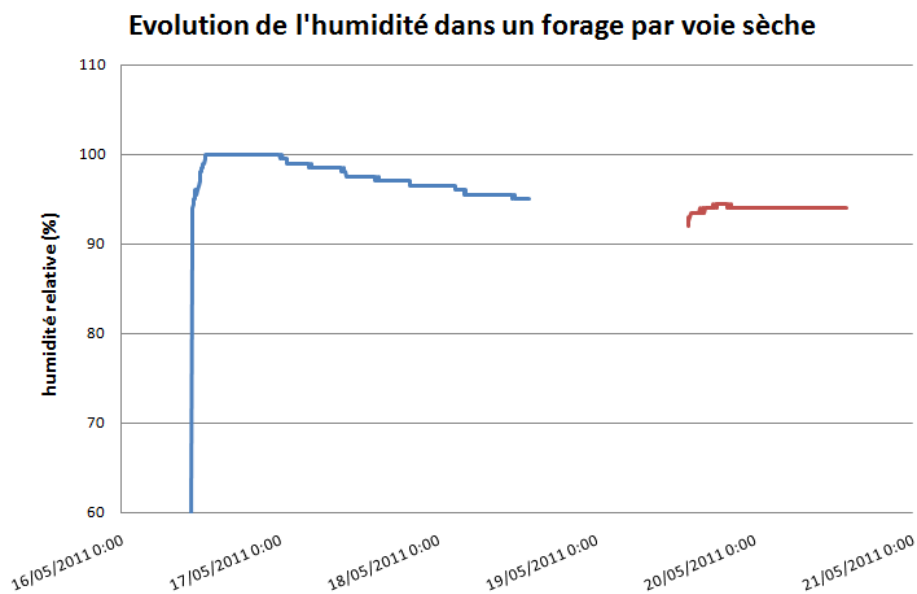


Figure 124: Evolution de l'humidité relative dans un forage réalisé par voie sèche

Le graphique de la figure 124 est assez inattendu. En effet, on constate que si nous réalisons un forage sur lequel nous venons directement placer un bouchon, l'humidité qui va régner dans ce forage est assez éloignée des 60% HR escomptée. Effectivement, dans un premier temps, nous avons une montée rapide de l'humidité et ensuite, on constate une stabilisation de celle-ci aux alentours de 95% après 3 jours de test. A partir de ce moment, nous avons enlevé le capteur pour réaliser un second forage afin de confirmer ce résultat. Après un jour de test, les constatations étaient identiques, l'humidité au sein de ce second forage est montée elle aussi aux alentours des 100% HR et elle commençait à redescendre doucement. Nous avons ensuite replacé le capteur dans le premier forage qui a eu une journée entière pour sécher. La seconde courbe en rouge sur cette figure 124 correspond aux résultats obtenus. On constate que l'humidité au sein de la cavité était redescendue aux alentours de 91,5% HR. Dès la remise en place du bouchon, l'humidité a de nouveau augmenté pour se stabiliser à 94% HR. Sur base de ce test, si on combine les deux courbes, on peut conclure que pour une dalle placée dans un environnement à 60% HR, les capteurs donneront 94-95% HR au cœur de celle-ci.

Dans le cas d'un forage par voie sèche, deux choses peuvent expliquer les valeurs élevées

obtenues :

- soit la dalle n'est pas stabilisée et dès lors, l'humidité en son sein est plus élevée que les 60% HR attendu,
- soit il se peut que l'on n'ait pas une équivalence entre l'humidité extérieure et l'humidité au sein de notre forage.

Pour vérifier la première hypothèse, nous pouvons simplement venir prélever un morceau assez important de la dalle, le placer à l'étuve et vérifier la teneur en eau obtenue. Si cette teneur s'éloigne de la teneur obtenue au point 4.2.1 : « étude du lien entre teneur en eau et l'humidité relative » basée sur des fines plaquettes, cela signifiera que la dalle n'est pas équilibrée, et ce même après presque un an.

Il se trouve qu'après avoir réalisé le test, nous avons trouvé une teneur en eau de 6,78%. Cette teneur s'éloigne de manière non négligeable de la courbe du point 4.2.1 puisque nous avons obtenu une teneur inférieure à 4% HR pour une dalle placée dans une ambiance à 60% HR (figure 91). Dès lors, contrairement aux hypothèses posées, il s'embrancherait que la dalle ne soit pas à l'équilibre. Le cœur de celle-ci est plus humide que la surface ; il existe donc une influence de ce paramètre dans la réponse de nos capteurs.

La seconde hypothèse n'est pas anodine non plus. En effet, dans les rappels théoriques (chapitre 1.3.4 : « mesure par sondes hygrométriques »), il a été montré que les graphiques : « teneur en eau - humidité relative extérieure » étaient fonction du chemin suivi. Ci-dessous on retrouve la figure 10 extraite de ces rappels :

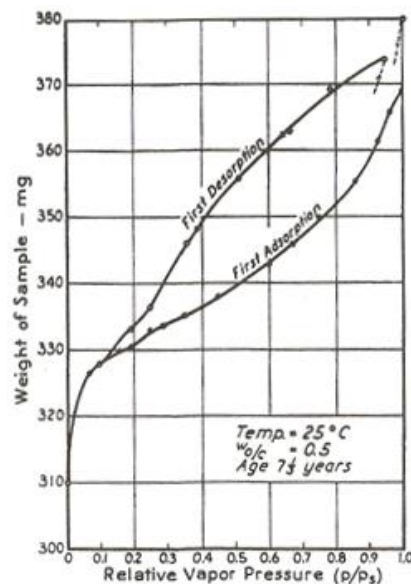


Figure 125: Cycle d'adsorption-désorption (Harrison P. J., 2006)

Pour une même humidité extérieure, la figure 125 montre que si l'équilibre est réalisé par désorption, la teneur en eau d'une dalle béton est supérieure à celle qui serait obtenue en partant d'une dalle précédemment séchée. Or, il se trouve que les capteurs hygrométriques donnent en réalité une traduction selon une autre échelle de cette teneur en eau. Dès lors, si une dalle saturée est placée dans une ambiance extérieure à 60% HR, il n'est pas impossible de tomber sur une humidité relative interne plus élevée que 60% HR. En effet, puisque pour une humidité extérieure

donnée, il existe deux teneurs en eau différentes en fonction du chemin suivi, il est logique que pour une humidité extérieure donnée, il existe aussi deux humidités relatives internes différentes au sein de la dalle. Tout simplement, il se pourrait que les fins capillaires au sein du béton soient encore saturés et ce même si la dalle n'est plus à 100% HR car plus ceux-ci sont fins, plus il est difficile de venir faire évaporer l'eau qu'ils contiennent<sup>4</sup>. D'autant plus qu'ici nous avons travaillé par désorption, dès lors, nous sommes dans le cas où pour une humidité relative extérieure donnée, la teneur en eau au sein de notre béton est la plus élevée. Lorsque nous réalisons le forage, il est possible que cette eau capillaire soit mise en mouvement. Lorsque nous venons le boucher, il va y avoir un équilibre entre cette eau et l'air de la cavité, puisque l'eau liquide va progressivement passer sous forme de vapeur d'eau ce qui crée une augmentation de l'humidité interne au sein de la cavité.

Ce phénomène pourrait être à l'origine de la différence des résultats entre le SPW et nous. En effet, au sein du SPW, les résultats fournis par les capteurs<sup>5</sup> concordent mieux avec l'humidité relative extérieure que les résultats obtenus ici. Grâce à la discussion précédente, on peut supposer que si l'éprouvette avait subi un séchage avant le test, l'eau apportée au béton ne proviendrait que de l'ambiance extérieure puisqu'elle serait fournie sous forme de vapeur d'eau par celle-ci. Dès lors, il serait logique à ce moment-là de venir trouver une humidité plus proche de celle de l'air extérieur puisqu'il a fourni la majorité de l'eau.

Il serait fort intéressant d'approfondir ce sujet de discussions pour savoir si cette affirmation est réaliste. Malheureusement, ce sujet sort un peu trop largement du contexte de ce travail. Dès lors, ici, nous laisserons ceci à l'état d'hypothèse

---

<sup>4</sup>Communication personnelle avec Monsieur Frédéric Michel (2011)

<sup>5</sup>Communication personnelle avec Monsieur Claude Sauvage (2011)

---

# Détection de zones humides dans le béton par Ground Penetrating Radar (GPR) en présence d'un gradient d'humidité.

---

L'objectif de ce travail de fin d'études est de mettre en évidence l'impact de la présence d'un gradient d'humidité sur la détection d'une zone humide dans du béton, en combinant une approche numérique et des résultats expérimentaux. Dans cette optique, diverses modélisations ont été menées à l'aide d'un programme de simulation numérique de propagation d'ondes électromagnétiques. L'influence de la taille du gradient, mais aussi de sa position et de sa forme, ont ainsi été étudiées. Parallèlement, deux programmes expérimentaux ont été mis sur pied afin de créer artificiellement un gradient d'humidité dans du béton. Ce gradient a été créé par remontée capillaire dans un cas et par séchage dans l'autre. A l'aide de capteurs hygrométriques placés dans les dalles, l'évolution de la zone de transition se trouvant au-dessus de la zone humide a été contrôlée. Nous avons ensuite tenté de corrélérer cette évolution du gradient avec les résultats fournis par Ground Penetrating Radar muni d'une antenne de 2,3 GHz. Nous avons ainsi étudié l'influence du gradient sur l'évolution temporelle du champ électromagnétique reçu. Ce programme expérimental a nécessité une batterie de tests préliminaires visant à déterminer les propriétés diélectriques des dalles et la réponse propre des capteurs. Sur base des modélisations, nous avons conclu que la détection de la zone humide reste possible tant que celle-ci est suffisamment éloignée de l'onde directe et tant que son épaisseur reste inférieure à  $2/5$  de la longueur d'onde du signal. En ce qui concerne la partie expérimentale, nous avons pu mettre en évidence l'évolution du signal lié à l'évolution du gradient d'humidité. Dans le cas de la remontée capillaire, nous avons également pu confirmer les tendances prédites par modélisation.

The objective of this master thesis is to highlight the impact of the presence of a humidity gradient on the detection of a wet area in concrete by combining a numerical approach and experimental results. In order to achieve this objective, several models have been conducted using a numerical simulation program of electromagnetic waves propagation. Influence of the size of the gradient, but also their position and shape, have been studied. Meanwhile, two experimental programs have been established in order to artificially generate a gradient of moisture into the concrete. This gradient was established by capillary rise in one case and by drying in the other case. Humidity sensors placed in the slabs allowed us to control the evolution of the transition zone located above the wet area. We tried then to correlate the evolution of the gradient with results from a Ground Penetrating Radar with 2.3 GHz antenna. We studied the influence of the gradient on the evolution with time of the electromagnetic field. This experimental program required many preliminary tests to define the dielectric properties of the slabs and the specific response of the sensors. Based on modeling, we concluded that the detection of the wet area remains possible as long as it is far enough from the direct wave and as its thickness is less than  $2/5$  of the signal wavelength. Regarding the experimental results, we were able to highlight the signal evolution with regard to the evolution of the moisture gradient. In the case of capillary rise, we were also able to confirm the trends predicted by modeling.