

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.

Mémoire de fin d'études réalisé en vue de l'obtention du grade d'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.

Résumé

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 Libioulle 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

Table des matières	5
Introduction.....	6
1ère partie : Recherche bibliographique	8
1. <i>L'eau et le béton.....</i>	8
1.1. Porosité et perméabilité.....	8
1.2. Dégradations.....	10
1.3. Technique de mesure de l'humidité.....	15
1.4. Les gradients dans les bétons.....	26
2. <i>LE GPR (Ground penetrating radar).....</i>	28
2.1. Principes de fonctionnement	28
2.2. Théorie électromagnétique.....	30
2.3. Réfraction et réflexion.....	35
2.4. Résolution des radars	37
2.5. Influence de l'humidité sur les propriétés électriques du béton.....	42
2.6. Mesure dynamique.....	44
3. <i>Modélisation à l'aide d'un simulateur : GprMax</i>	45
3.1. Concept de base et problème aux frontières.....	45
3.2. Equations discrétisées de Maxwell et algorithme de Yee.....	46
3.3. Hypothèses réalisées par GprMax.....	53
3.4. Stabilité numérique	53
3.5. Discrétisation	54
Bibliographie.....	56
Annexe 1.....	59

Introduction

Actuellement, le trafic autoroutier dans nos régions ne cesse de croître année après année, ce qui introduit une demande toujours croissante pour les routes et les 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 des 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 voit leur cycle naturel de vieillissement accéléré par la croissance du trafic. En ce qui concerne la région wallonne, le réseau routier géré par la direction général opérationnel 1 (DGO1) comporte près de 3000 ponts dont l'entretien figure au rang des tâches essentielles. Ces ouvrages sont soumis à des sollicitations toujours croissantes, résultant de l'augmentation du trafic et des charges. Divers phénomènes physico-chimiques de dégradation sont aussi enregistrés : corrosion des aciers, carbonatation du béton, sensibilité au gel des bétons, action des chlorures, réactions alcalis-granulats, etc. (Demars Ph., 2001 ; De smet D., 2005)



Figure 1: Dégradation du pont de Bastogne (Demars Ph., 2001)

Comme on peut s'en rendre compte dans le document de Monsieur Courard (2010), la grande majorité des mécanismes de dégradation du béton pouvant mener à des délaminations¹ a un point commun, la nécessité d'être en présence d'eau pour se développer. En plus, une fois ces divers 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 où 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 géologie 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 ici apparaître le but de mon travail de fin d'étude. Promouvoir le radar au rang de technique préventive à la dégradation de 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 différentes applications ont pu être 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 de celui-ci. (Van der Wielen A., 2011)

Ce travail de fin d'étude va s'orienter sur 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, des éprouvettes en béton seront réalisées dans le but de déterminer l'influence d'un gradient d'humidité sur la réflexion des ondes radar. Finalement on réalisera une modélisation à l'aide du logiciel GprMax.

¹ Délaminations : séparation en lamelles d'un matériau macro-moléculaire

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 le gravier et le mortier. Ce dernier est composé de sable et de ciment hydraté contenant différents sulfates, silicates et aluminates de calcium hydratés. Sur la figure ci-dessous, on peut voir 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)

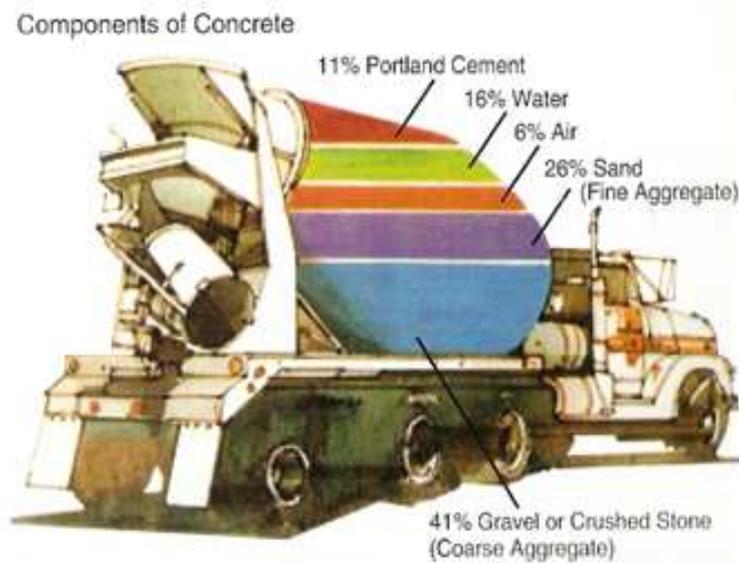


Figure 2: composants principales des bétons (Howard M.K., 2005)

Contrairement à ce que l'on pourrait penser, 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. Nous allons expliquer ceci plus en détails dans les paragraphes suivants. (Hernández M., 2000 ; Courard L., 2008 ; Courard L., 2010)

1.1. Porosité et perméabilité

Comme on peut le voir en bleu sur la figure 3, deux éléments influencent fortement les propriétés de notre béton, à savoir la granulométrie (des granulats et des sables), ainsi que

le rapport eau-ciment (E/C). C'est ce dernier qui va avoir une grande influence en ce qui concerne la porosité. (Courard L., 2009)

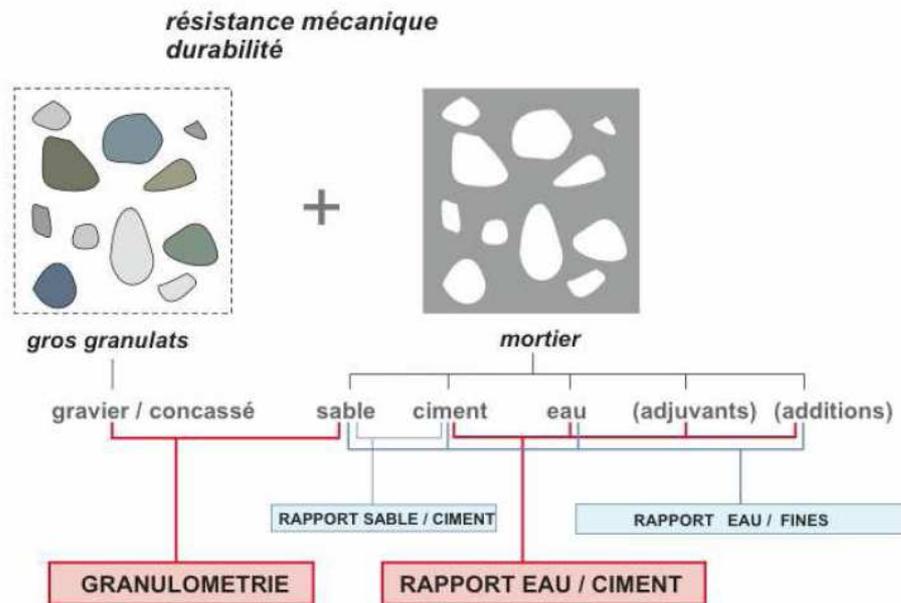


Figure 3: éléments constitutifs d'un béton (Courard L., 2009)

Pour comprendre le rôle entre le rapport eau-ciment et la porosité, nous pouvons faire un raisonnement assez simpliste. 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 donc très éloignés les uns des autres et, après s'être complètement hydratés, il restera un surplus d'eau important, donc, une porosité capillaire très importante. La perméabilité du béton sera très grande et ses propriétés mécaniques seront très faibles. Inversement, si la quantité d'eau est très 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 perméabilité du béton sera très faible et les propriétés 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 mise en plus de celle nécessaire à l'hydratation ainsi que des vides éventuels présents dans les granulats. La porosité d'un matériau représente le volume de tous les capillaires cumulés. Il est important 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 (par exemple un béton à structure semi-caverneuse) ou, au contraire, être relativement poreux mais ne pas se laisser traverser par la moindre goutte d'eau (cas d'un béton compact mais de qualité très moyenne). 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 petits 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 fin et plus discontinu. (Ployaert C., 2009 ; Gagné R., 2010)

Dans le tableau ci-dessous montrant des paramètres obtenu à l'aide d'un porosimètre à mercure, nous pouvons bien voir que plus le rapport eau-ciment sera grand plus la porosité de notre béton sera élevés. (Hernández M., 2000)

W/C ratio	Porosity (%)	Apparent density (g/cm ³)	Real density (g/cm ³)	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

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

Généralement, on mesure la porosité accessible à l'aide de l'essai d'absorption d'eau par immersion à la pression atmosphérique. En effet, pour obtenir cette porosité, il suffira de venir multiplier cette valeur d'absorption par la masse spécifique sèche du béton. Pour mieux comprendre, on peut reprendre un exemple cité par (Ployaert 2009) : soit un morceau de béton de 2,2 dm³ 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 dm³. Son absorption d'eau par immersion sera de $0,3/5 = 6\%$. Sa porosité peut être directement déduite de l'essai et vaudra $0,3/2,2 = 13,6\%$. On peut retrouver ce chiffre en multipliant l'absorption par la masse spécifique en kg/dm³ : $6*2,27=13,6\%$.

La valeur obtenue par absorption d'eau sera donc l'image des mouvements capillaires dans les pores du béton qui sont ouverts sur le milieu ambiant. Cela pourra 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

Il faut savoir que le béton n'est pas un matériau invulnérable. Il peut en effet être attaqué par 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 nous pouvons nommer les suivants :

- La corrosion des aciers (chlorure et carbonatation)
- La dégradation du béton par cycle de gel-dégel
- La dégradation par les réactions alcali-granulats

- Les réactions sulfatiques dans les bétons

Ci-dessous nous allons reprendre et développer un à un ces processus. Il est clair que 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, nous allons les reprendre séparément et nous allons mettre 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. On peut signaler que ces décollements apparaîtront 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'accompagnant d'une diminution de la résistance de la structure qui à terme pourra présenter un certain danger. (Courard L., 2010; Mommer P., 2004)

On peut expliquer le processus électrochimique à la base de la formation de la rouille 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 second endroit (appelé cathode), on dénote la présence d'oxygène dans le milieu aqueux, celui-ci se transforme en hydroxydes (OH^-) et utilise 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 ci-dessous (Mommer P., 2004):

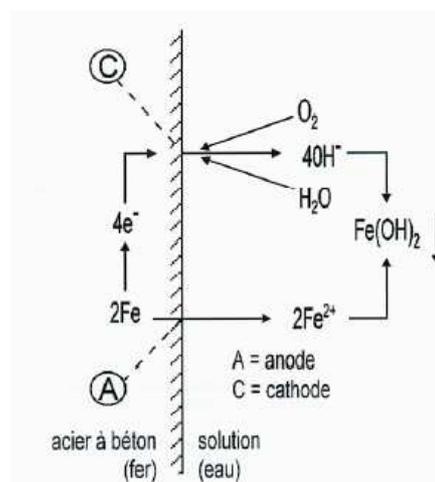


Figure 4: formation de la rouille (Mommer P., 2004)

Il faut savoir qu'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 sera généralisée à une zone beaucoup plus importante. On peut noter ici le rôle important joué par l'eau, sans laquelle cette réaction de corrosion n'aurait pas lieu. Il est bon de signaler que la nature du métal ainsi que le milieu électrolytique (surtout le pH) sont deux facteurs importants dans ces processus de corrosion. (Courard L., 2010 ; Mommer P., 2004)

1.2.2. Action des chlorures sur les aciers

Il faut savoir que 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 perforent 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 (granulat marins, accélérateur de prise du type $CaCl_2$). On peut signaler qu'il faut une fissure assez large pour permettre le mouvement de ces ions.

Lorsque ces ions sont en contacts avec les armatures, il se développe alors un processus de corrosion. La corrosion due aux chlorures étant locale, elle provoque des piqûres caractéristiques dans l'acier. Le tableau suivant 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) :

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%

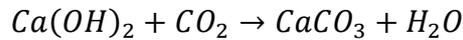
Tableau 2: teneur limite en ions chlorure (Courard L., 2010)

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 part 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 certain avantage puisque grâce à cela, le béton possède une certaine passivité et donc la corrosion des armatures présente dans les bétons armés sera fortement ralentie. Malheureusement, cette chaux réagit avec le dioxyde de carbone pour former du carbonate de calcium selon la réaction suivante:



On peut insister 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 sèche, cette réaction ne se fera pas, et si elle tend à la saturation, elle ne se fera pas non plus. On peut voir sur la figure ci-dessous que l'optimum se situe aux alentours de 50% d'humidité relative :

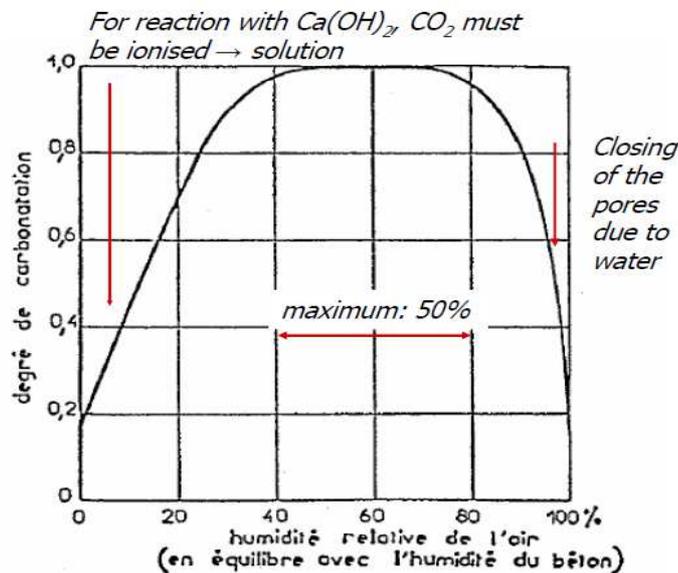


Figure 5: Lien entre le degré de carbonatation et la teneur en eau de l'air (Courard L., 2010)

Il faut savoir que cette réaction est expansive de 11%. Le carbonate de calcium va donc progressivement boucher les pores et la vitesse de réaction va donc décroître avec le temps. Ce phénomène naturel qui nécessite un apport constant de 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, on va progressivement perdre la propriété de passivation et la corrosion des armatures pourra continuer. Or comme on a pu le dire précédemment, cette corrosion s'accompagne d'une augmentation de volume qui peut créer une fissuration et un écaillage du béton. On peut encore noter que 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. Cycle 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 de 10% supérieur au volume occupé par celle-ci à l'état liquide. Bien entendu, la quantité d'eau contenue dans le béton jouera un rôle essentiel dans ce processus puisque les risques de dégradations n'existeront 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 retrouvera 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. 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 sera faible, plus la quantité d'eau susceptible de geler sera faible. De plus, la résistance du béton sera supérieure et le point de congélation bas car le diamètre des pores sera plus faibles. D'une manière générale, on considère 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 déverglaçage pourront aggraver la situation existante. En effet, lorsque ceux-ci sont appliqués, ils puisent la chaleur nécessaire pour faire fondre la glace ou la neige dans la couche superficielle du béton. Cela créera une chute brutale de la température et donc un retrait important pouvant former des fissures.

On peut améliorer le comportement au gel-dégel en ajoutant au béton un entraîneur d'air qui va permettre de réaliser des sortes de vase d'expansion afin de limiter les contraintes internes dans le béton lorsque l'eau gèlera. 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

On peut facilement reconnaître cette pathologie par le faïençage typique et l'exsudation d'un gel blanc 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.

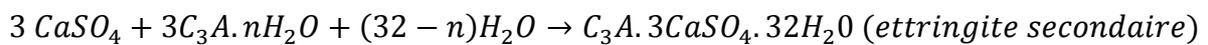
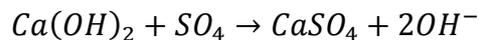
La réaction alcali-granulats produit un gel de silicates alcalins qui est fortement expansif. Si le béton présente une résistance à la traction non adaptée, on aura apparition de fissures. De nouveau, il faut un taux d'humidité élevé pour que cette réaction se déroule. En effet, les alcalins doivent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

On peut signaler que, généralement, les bétons concernés par cette pathologie sont constitués par des granulats porphyriques ainsi que par des granulats 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 son 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.

Ci-dessous, on peut voir la réaction de formation de l'ettringite et de la thaumasite:



En présence de CO_2 : *ettringite* \rightarrow $CaCO_3.CaSO_4.CaSiO_3.15H_2O$ (*Thaumasite*)

L'ettringite secondaire ainsi que la thaumasite présentent un caractère fortement expansif, ce qui va provoquer la fissuration du béton durci. A terme, il en résulte donc une décomposition de celui-ci.

Les sources externes de sulfates peuvent être fort variables, on peut notamment citer le milieu marin, des nappes phréatiques, le stockage de produit, des matières organiques en décomposition,... (Courard L., 2010 ; Mommer P., 2004)

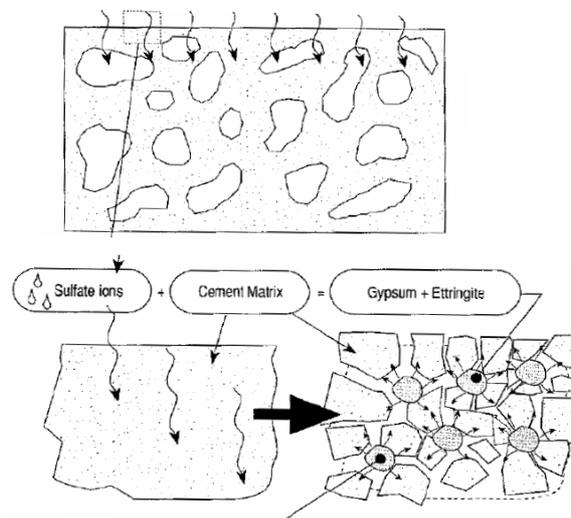


Figure 6: réaction sulfatique (Courard L., 2009)

1.3. Technique de mesure de l'humidité

Dans les deux paragraphes précédents, nous avons mis en évidence le rôle de la porosité dans la durabilité des bétons mais aussi celui joué par l'eau dans les dégradations. 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. On peut noter que ces gradients d'eau 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 pour détecter celles-ci. En effet, il existe tout un ensemble d'autres techniques qui sont beaucoup plus spécifiques et utilisées dans ce but. Ce présent chapitre va tenter de donner un rapide aperçu des différentes techniques que l'on peut rencontrer pour mesurer l'humidité dans les bétons.

Il existe deux types de mesure de l'humidité : des mesures qualitatives et des mesures quantitatives. En ce qui nous concerne, on se concentrera sur les tests quantitatifs qui pourront aboutir à des résultats numériques. Dans la suite de ce paragraphe, on va se focaliser sur sept techniques courantes de mesures de l'humidité 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 24h (norme NBN B15-215 :1989). On trouvera la teneur en eau 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 granulat. Bien entendu, le carottage devra se faire par voie sèche et non par voie humide et ce 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, cette qualité de résultat dépend du soin apporté à l'échantillon. Après extraction, celui-ci devra être immédiatement enveloppé dans un élément imperméable afin que la teneur en eau ne se modifie pas durant son trajet et son stockage. (Howard M.K., 2005.)

Parmi les désavantages de cette technique, on peut signaler que l'obtention d'échantillons secs par étuvage prend un certain temps, les résultats ne pourront donc être immédiats. On peut aussi noter le fait qu'elle est destructive vu qu'elle exige un carottage. Pour limiter ces inconvénients, on pourrait imaginer récupérer des carottes réalisées pour d'autres analyses. 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, on peut mettre en évidence 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

Ici aussi, il s'agit 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, on concasse celui-ci à l'aide d'un marteau et on place cet échantillon dans un flacon spécialement prévu à cet effet. On peut voir celui-ci sur l'image ci-dessous :



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

On pourra déduire la teneur en eau de l'échantillon 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. Le 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. Ce dôme possède une hauteur de 30 mm et une surface de 460 cm².

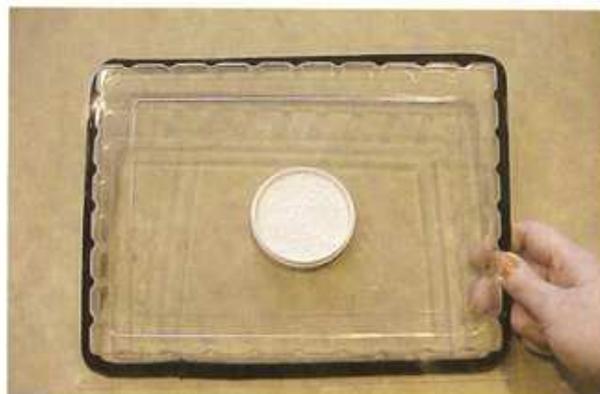


Figure 8: test au chlorure de calcium (Howard M.K., 2005)

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, on place le récipient ouvert sur l'élément en béton préalablement nettoyé et on scelle le dôme 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 72h, on viendra ouvrir le dôme et replacer le plus rapidement possible le couvercle sur le récipient contenant le chlorure de calcium. Pour des raisons de précision dans la mesure ultérieure du poids, on réutilisera la bande étanche prévue à cet effet et pesée avec le reste des éléments au temps initial. De la différence de poids, on déterminera une mesure du taux de vapeur d'eau émise. Malheureusement, ce test ne nous 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).

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

1.3.4. La mesure par sonde hygrométrique

Dans ce test, une sonde compacte est placée dans une cavité réalisée à une profondeur précise dans l'élément en béton. On pourra mesurer l'humidité relative² à l'intérieur de la cavité (dû à l'échange hydrique entre le béton et l'air de la cavité) et ce, après obturation de la partie supérieure et stabilisation du système. Si on réalise plusieurs forages à des profondeurs différentes, on pourra 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).



Figure 9: sondes hygrométriques (Howard M.K., 2005)

² 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)

Howard (2005) nous rappelle qu'il faudra 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 on isole la sonde de cette manière, elle nous donnera une information sur la teneur en humidité de la partie inférieure du forage qui elle est laissée libre. Cela nous permettra 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 (2004) concerne l'importance d'une cavité la plus petite possible. En effet, plus le volume de la cavité sera faible plus la localisation spatiale de la mesure sera précise. De plus, le temps de réponse sera rapide vu que l'équilibre se fera beaucoup plus rapidement que dans un grand volume.

Les mesures d'humidité relative par sonde hygrométrique sont généralement assez précises et de l'ordre de 2% d'humidité relative. Cette précision s'atteint bien entendu en faisant attention à tous les détails de la procédure et demande également une bonne calibration des capteurs. On peut notamment signaler qu'avant tout test, il faudra 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).

On peut vraiment souligner que dans ce type d'appareil et contrairement aux deux techniques qui vont suivre, la mesure se réalise bien 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 hygroscopiques³. 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 on a déjà pu le dire, dans les mesures par sondes hygrométriques, la température joue un rôle important. Dans ces capteurs, on retrouvera assez souvent des programmes de compensation des mesures en fonction de la température. (Lardière C., 2010)

L'inconvénient majeur de cette technique est qu'elle nous fournit une mesure de l'humidité relative. Or, nous ne pouvons pas directement comparer deux dalles 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 (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 ou est placée la sonde. Cela ne signifie aucunement que la cavité est 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 avoir évolution de l'humidité relative. (Clermont G., 2005 ; Harrison P. J., 2006)

³ 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)

Dans ce TFE, nous ne travaillerons pas sur des dalles immergées. Dès lors, seul des taux d'humidité relative inférieure à 100% seront rencontrés. Dans ce cas là, la remarque formulée par Clermont (2005) n'a plus lieu d'être et donc, un lien entre le taux d'humidité relative et entre la teneur en eau pourra être trouvé par essais. On réalisera cela dans la partie expérimentale, dès lors pour plus de détails, je vous renvoie vers cette partie. Cependant, on peut déjà signaler que certains auteurs ont déjà réalisé des essais similaires. Durant ces études, ils ont pu mettre en évidence que le chemin pour arriver à un taux d'humidité voulu sur un échantillon va avoir une influence. En effet, le cycle d'adsorption-désorption n'est pas linéaire, il présente l'hystérésis suivant (Harrison P. J., 2006) :

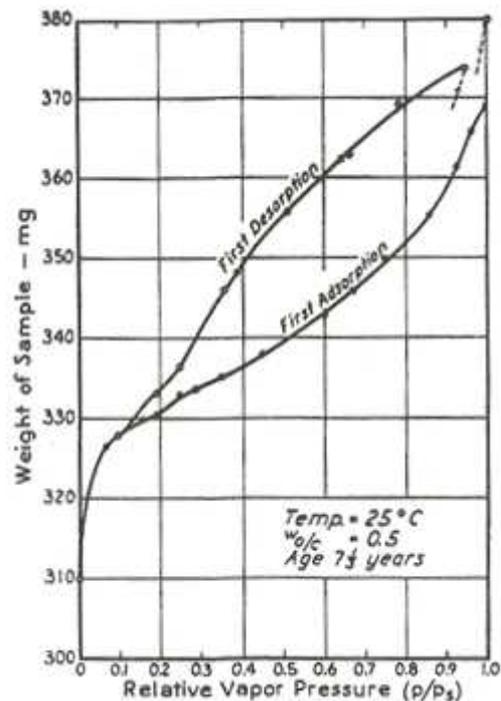


Figure 10: cycle d'adsorption-désorption (Harrison P. J., 2006)

On peut conclure que l'allure des courbes liant la teneur en eau à l'humidité relative sera fonction du chemin. Il faudra donc toujours exprimer la technique utilisée pour trouver la corrélation entre ces deux paramètres. Dans le document d'Harrison P. J. (2006), nous retrouvons un exemple de graphique liant la teneur en eau et l'humidité relative :

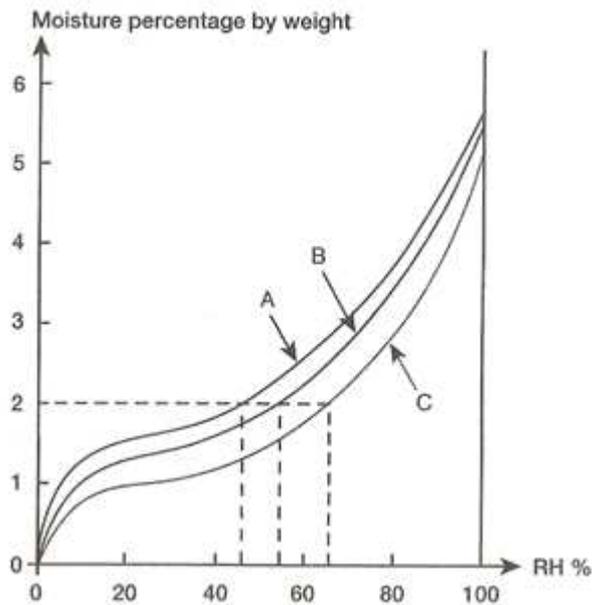


Figure 11: teneur en eau en fonction de l'humidité relative pour 3 échantillons de béton présentant des E/C différents (Harrison P. J., 2006)

On peut voir que 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. On peut aussi signaler qu'ici, les courbes sont obtenues par adsorption. Si on les avait obtenues par séchage, elles auraient été sensiblement plus élevées dans la partie centrale (cfr figure 10). (Harrison P. J., 2006).

1.3.5. La 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. 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 pourra en déduire celle-ci. Initialement, ce test a été mis au point pour déterminer

l'humidité présente dans le bois. On a ensuite extrapolé son utilisation au béton. Malheureusement, dans celui-ci la résistance électrique sera fonction d'un nombre de facteurs plus importants. On retrouvera 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. La 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 (ϵ') d'un matériau humide. Deux électrodes sont introduites dans le matériau, celles-ci formeront 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)

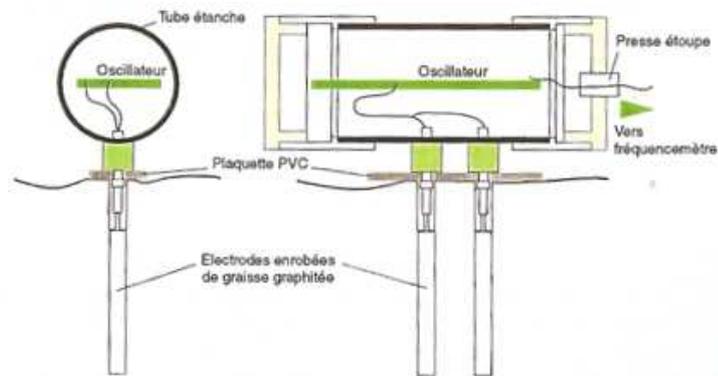


Figure 13: principe de la mesure par sonde capacitive (Khelidj A., 2002)

$$C = \epsilon' \cdot \epsilon^0 / X$$

Avec

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

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

X = Coefficient lié à la géométrie des électrodes.

Bien entendu en fonction de la localisation des électrodes, nous pourrons réaliser une mesure en surface ou une mesure plus en profondeur. De plus, comme dans le cas de la sonde hygrométrique, nous pourrons 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, on raccordera celles-ci à un oscillateur. On pourra déterminer la teneur en eau de l'élément en béton car cette teneur modifie fortement la constante diélectrique du matériau. Cela se traduira par une variation de la fréquence de l'oscillateur déterminé par la valeur prise par la capacité. (Godin J., 2002b ; Cailleux E., 2010 ; Khelidj A., 2001)

Avant toute étude, on sera amené à réaliser un certain 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 sera saturé et ensuite progressivement séché en étuve. Pendant ce temps, la variation de fréquence sera mesurée et reliée à la teneur en eau obtenue par pesée. On peut signaler que la loi liant la variation de fréquence et la teneur en eau est une loi linéaire comme on peut le voir sur l'exemple suivant :

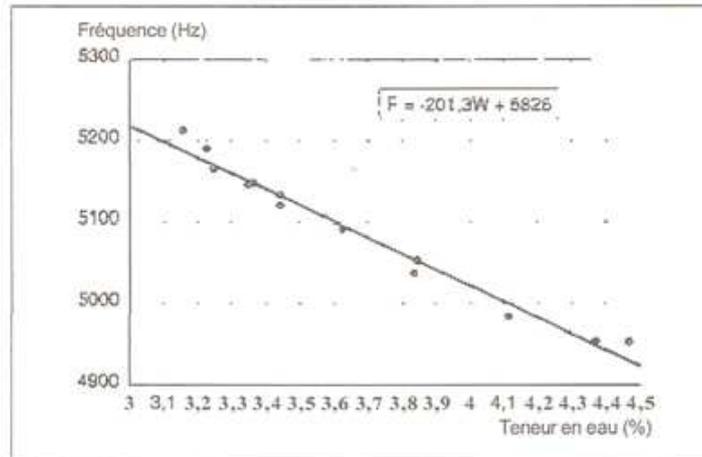


Figure 14: exemple d'étalonnage d'une sonde capacitive (Godin J., 2002b)

En ce qui concerne la mise en place des électrodes, on peut venir les placer dans des réservations prévues avant coulage de la dalle. Si celles-ci n'ont pas été prévues, on peut les placer 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. La mesure par source radioactive

Nous allons dans ce paragraphe présenter le gammadensimètre :

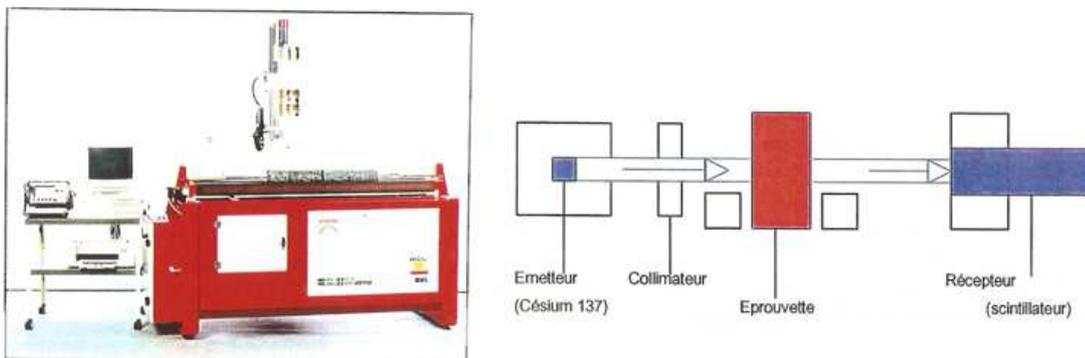


Figure 15: principe de fonctionnement et image d'un gammadensimètre (Khelidj A., 2002)

Cet appareil contenant une source radioactive à savoir du Césium 137, émet des photons

gamma. Plus la matière traversée par ces photons sera dense, plus l'atténuation de ceux-ci sera importante. Dès lors, nous pourrons lier à une densité, une variation du nombre de photons recueilli par rapport à ceux émis. La masse volumique du matériau sera trouvée grâce à la formule suivante, donnée par Godin (2002a) :

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

Avec

N_0 = Nombre de photons incidents.

N = Nombre de photons recueillis.

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

ρ = 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 μ' , nous pourrons déterminer la masse volumique du matériau. La variation de masse volumique totale au cours du temps pourra 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, seront 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 seront donc par leur ralentissement convertis en « neutrons thermiques » qui seront 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 nous renseigne quant à la teneur en eau jusqu'à une profondeur de 10 cm. 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

Méthode	Principe de base	In situ (I) ou au laboratoire (L)	Avantages	Inconvénients	Mesure du gradient possible ?
gravimétrie	Détermination de la masse sèche et	L	- Très connue - Très précise - Détermination de la	- Temps important nécessaire au séchage	En général utilisée pour une mesure

	humide. La teneur en eau est déduite de ces deux valeurs		teneur en eau	<ul style="list-style-type: none"> - Exige une carrote représentative - Nécessite un carottage par voie sèche - destructive 	de la teneur moyenne
Bombe à carbure	Mesure de la pression produite par un gaz issu de la réaction entre l'eau de l'échantillon et le carbure de calcium	L ou I	<ul style="list-style-type: none"> - Rapide - Détermination de la teneur en eau 	<ul style="list-style-type: none"> - Exige une carrote représentative - Nécessite un carottage par voie sèche - destructive 	En général utilisée pour une mesure de la teneur 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	<ul style="list-style-type: none"> - Principe simple - Non destructif 	<ul style="list-style-type: none"> - 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	<ul style="list-style-type: none"> - Précise - Rapide si le volume dans lequel est placée la sonde est faible - Très courante 	<ul style="list-style-type: none"> - 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 corrélérer celle-ci à une teneur en eau	I	<ul style="list-style-type: none"> - Non destructive si on réalise une mesure en surface 	<ul style="list-style-type: none"> - 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)	- Non destructive si on réalise une mesure en surface - Détermination de la teneur en eau - Possibilité de lecture des teneurs en eau au travers des couches de revêtement	- Utilisation d'une source radioactive - Utilisation fortement réglementée - Profondeur limitée à 10cm - Destructive si on utilise des carottes	Réalisable sur base de carottes ou de petits échantillons prélevés à une profondeur précise

Tableau 3: récapitulatifs des différentes méthodes

1.4. Les gradients dans les bétons

Dans le chapitre précédent, nous avons eu l'occasion de présenter toute une série d'appareils permettant de déterminer l'humidité contenue dans un élément en béton. Différents auteurs ont testé ces techniques pour déterminer des profils de teneur en eau d'une dalle dans des cas particuliers qui étaient importants pour leur étude.

Des études déjà réalisées, nous pouvons retenir qu'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 suivante (figure n°16), on peut voir une représentation schématique du taux d'humidité interne d'une dalle dont le séchage se réalise exclusivement par la surface supérieure. (Harrison P. J., 2006)

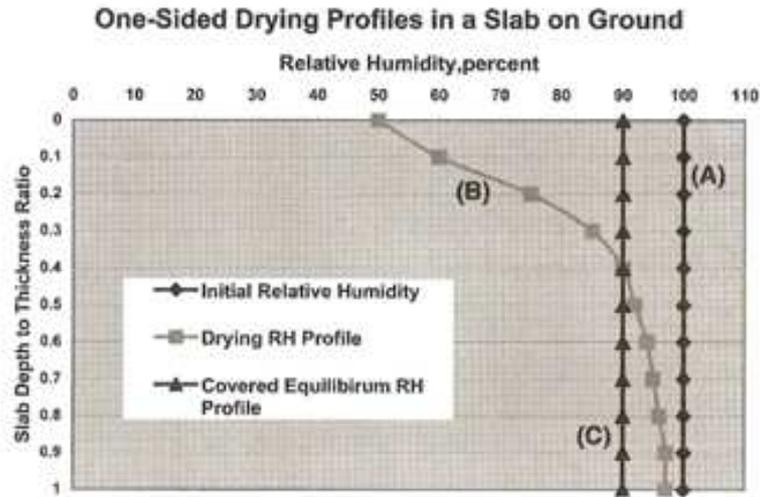


Figure 16: profil de séchage d'une dalle (Harrison P.J., 2006)

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 certaine distribution différentielle d'humidité entre la partie supérieure et inférieure. Le profile de la courbe de séchage sera 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 le document de Khelidj A. (2001), nous retrouvons aussi une étude de gradient mais cette fois en fonction du temps. Cette étude est réalisée par sondes hygrométriques enfoncées 24h 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 coulée, les éprouvettes ont été placées dans une ambiance contrôlée en température et en humidité relative ($T = 20 \pm 1^\circ\text{C}$ et $HR = 50 \pm 5\%$). Voici ce qu'ils obtiennent :

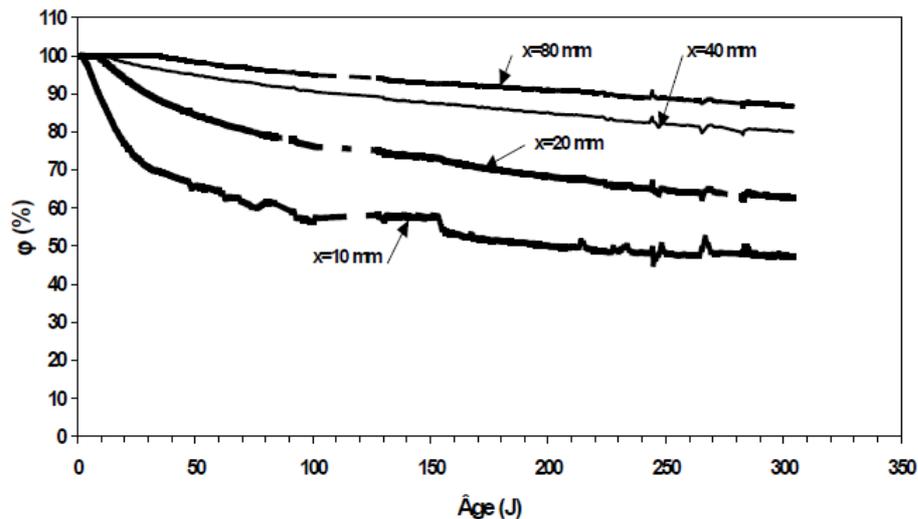


Figure 17: évolution de l'humidité relative du béton à différentes cotes de la face séchant (Khelidj A., 2001)

Cette **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, on voit que des gradients d'humidité se forment assez rapidement puisque les humidités relatives mesurées aux différentes profondeurs diffèrent l'une de l'autre. Dans la partie expérimentale, nous essaierons de mesurer de tels gradients.

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, on le retrouve notamment dans l'auscultation des bétons et des divers autres matériaux de construction. A l'aide d'une antenne haute fréquence portable, on est en mesure 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 sera réfléchi et réfracté à tout changement de milieu et donc d'impédance. Par la suite, cette énergie réfléchie et réfractée sera 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)

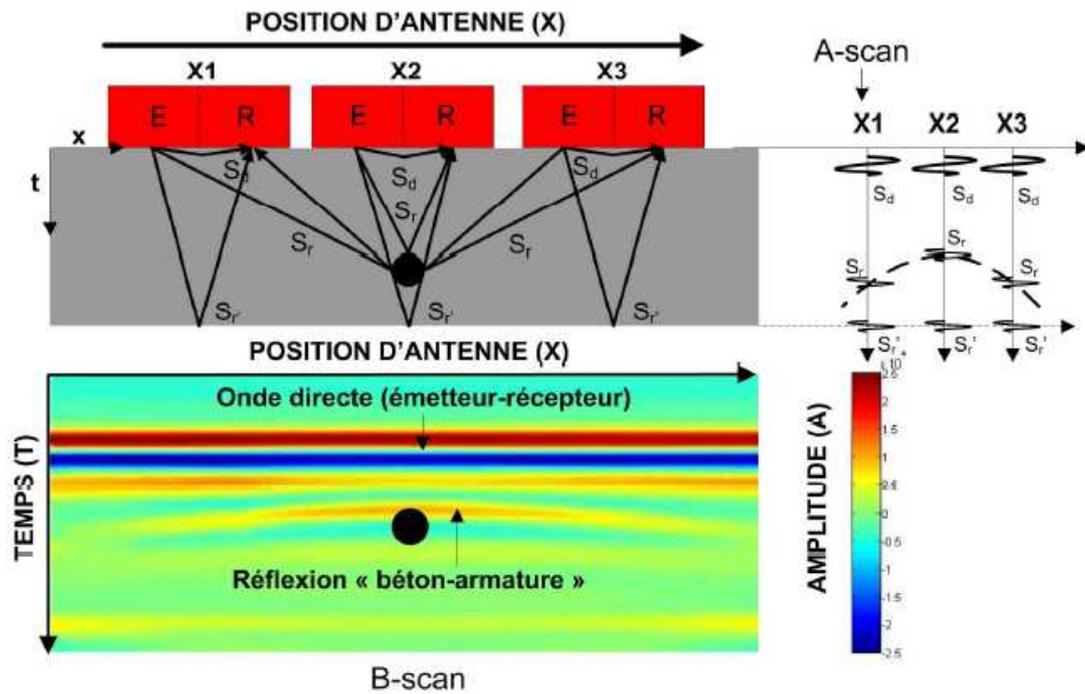


Figure 18: fonctionnement du radar (Viriyametanont K., 2008)

La figure précédente nous 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 sera représenté sur un graphique, l'A-scan. Sur celui-ci visible sur la partie droite de la figure, on peut voir 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 mis 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 fréquence utilisable, celle-ci est assez large puisqu'elle est comprise entre 10 MHz et 2.6 GHz. Si on utilise une antenne basse fréquence (entre 10 et 100 MHz), la profondeur d'investigation est élevée ($> 10m$) mais la résolution est faible. En revanche, pour des antennes de 1 GHz ou plus, on obtient à l'inverse une bonne résolution, ce qui permet notamment de visualiser de fins détails dans les bétons, mais une profondeur d'investigation limitée par une augmentation de l'absorption du signal. Une discussion plus approfondie sur les résolutions pourra être lue 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 nous fournira 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 de la façon suivante :

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

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

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{d} = q,$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{b} = 0$$

Où :

- \vec{E} = vecteur champs électrique
- \vec{H} = vecteur champs 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

La première équation 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 exprimer qu'il existe un lien entre ces deux champs. La loi d'Ampère quant à elle exprime le lien inverse, les courants électriques variables génèrent des champs magnétiques. La troisième équation 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. La dernière équation quant à elle 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 vont nous permettre de caractériser les propriétés physiques des matériaux. Pour déterminer la réaction d'un matériau à un champ électromagnétique, les propriétés électriques et magnétiques seront importantes. Pour l'analyse radar, nous allons retrouver trois équations constitutives :

$$\vec{J}_c = \tilde{\sigma} \vec{E}$$

$$\vec{d} = \tilde{\epsilon} \vec{E}$$

$$\vec{b} = \tilde{\mu} \vec{H}$$

Où :

- $\tilde{\sigma}$ = est le tenseur de conductivité électrique
- $\tilde{\epsilon}$ = est le tenseur de permittivité diélectrique
- $\tilde{\mu}$ = est le tenseur de perméabilité magnétique
- \vec{J}_c = est le courant de conduction

La première équation permet de décrire le mouvement des charges libres en présence d'un champ électrique. Ce mouvement aura pour conséquence la naissance d'un courant. La seconde équation permet de décrire le déplacement subi par les charges déjà contraintes lorsque celles-ci sont soumises à un champ électrique. Finalement, la dernière équation 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 dégénèrent 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 total de courant

Dans ses notes, Giroux (2005) nous 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. Par la seconde équation du point 2.2.2., on peut lier ce courant de déplacement à la permittivité et à la variation de champs électriques :

$$\vec{J}_d = \frac{\partial \vec{d}}{\partial t} = \tilde{\epsilon} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

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

$$\vec{j} = \vec{j}_d + \vec{j}_c = \varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \vec{\sigma} \vec{E}$$

2.2.4. Conductivité et permittivité électrique

Comme on l'a dit précédemment, la conductivité (σ) et la permittivité (ε) sont généralement des variables complexes. De plus, leurs valeurs dépendent de la fréquence d'excitation (f). On peut donc adopter les notations suivantes :

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

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

Dans ces formules, $\omega = 2\pi f$ 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. On va donc utiliser d'autres paramètres qui pourront être beaucoup plus facilement étudiés en laboratoire. On va définir la permittivité effective (ε_e) et la conductivité effective (σ_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 :

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

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

On peut relier ces nouveaux paramètres à la densité totale de courant :

$$\vec{j} = \sigma_e \vec{E} = i\omega \varepsilon_e \vec{E}$$

Pour plus de simplicité, on rapporte généralement la permittivité effective à la permittivité du vide ε_0 définissant ainsi la permittivité relative ε_r .

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon_e}{\varepsilon_0} = \varepsilon'_r - i\varepsilon''_r$$

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, on étudiera 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. En réécrivant les équations du point 2.2.1 et du point 2.2.2. et en éliminant le champ magnétique, nous obtenons :

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

Après plusieurs simplifications et remplacements repris en détails dans le document d'Annan (2005), nous arrivons à l'équation suivante :

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

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

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

La solution de cette équation aura la forme suivante :

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

Où

$$v = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon \mu}}$$

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

$$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}} = 3.10^8 m/s$$

On peut réécrire l'expression de la vitesse de la manière suivante :

$$v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_r'}}$$

Dans cette expression seule la partie réelle de la permittivité électrique est considérée. En effet, comme indiqué précédemment, on a négligé les pertes diélectriques représentées ici par la partie imaginaire de la permittivité diélectriques ε_r'' . (Viriyametant 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 se qui se traduit par la condition suivante (Giroux B., 2005):

$$\frac{\sigma_e}{\epsilon_e \cdot \omega} \ll 1$$

Annan (2005) nous indique que la solution du problème aura la forme ci après :

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

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 $\sigma = 0$.

$$\frac{\partial^2 p_1}{\partial \beta^2} = \mu \epsilon \frac{\partial^2 p_1}{\partial t^2}$$

Et où

$$p_2 = e^{\pm \alpha \beta}$$

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

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

On constate donc que dans ce cas, l'onde voyage avec une vitesse v et décroît exponentiellement en amplitude dans la direction de propagation. Nous pouvons voir ceci sur la figure ci-dessous :

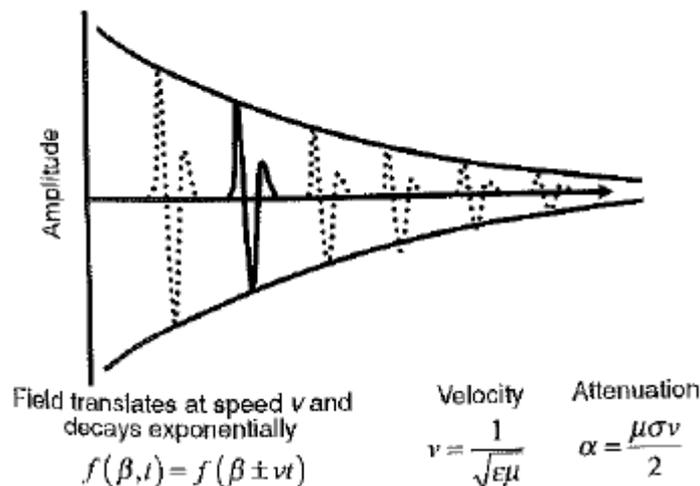


Figure 19: onde électromagnétique amortie lorsque les pertes électriques sont faibles (Annan A.P., 2005)

Le tableau ci-dessous reprend quelques valeurs des paramètres précédemment définis,

c'est-à-dire : des valeurs de permittivité relative, de conductivité, de vitesse et d'atténuation pour plusieurs matériaux couramment testés par les radars. On pourra 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)

Matériau	ϵ'_r	σ (mS/m)	v (m/ns)	α (dB/m)
Air	1	0	0,3	0
Eau distillé	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
Granite	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

Tableau 4: valeurs typiques de propriété électromagnétique pour divers matériaux (Annan A.P., 2005; Giroux B., 2005 ; Soustos M.N., 2001 ; Viriyametantont K., 2008)

2.3. Réfraction et réflexion

Comme on a pu le dire 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 sera réfléchi et réfracté à 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 sinusoidaux 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. Ces deux notions sont très utiles pour comprendre les concepts de réfraction et de réflexion. (Annan A.P., 2005 ; Giroux B., 2005)

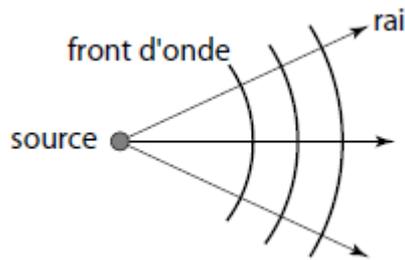


Figure 20: rai et front d'onde (Giroux B., 2005)

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 une constante. Le concept est représenté sur la figure ci-dessous :

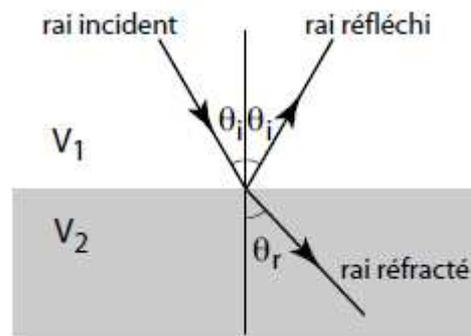


Figure 21: changement de direction à une interface entre 2 milieux présentant des propriétés différentes (Giroux B., 2005)

Soit une onde représentée ici par un rai qui présente avec la verticale un angle θ_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 θ_2 . La loi de Snell-Descartes stipule que :

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{v_1}{v_2}$$

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

Cependant Annan (2005) nous rappelle qu'il existe un angle θ_c 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 :

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

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, comme on l'a déjà vu, 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 :

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

Dans cette équation, ϵ_{r1} est la permittivité diélectrique du premier milieu et ϵ_{r2} la permittivité diélectrique du second milieu. L'angle θ quant à lui représente l'angle d'incidence. (Van der Wielen A., 2011).

2.4. Résolution des radars

Comme on l'a dit dans le paragraphe relatif au principe de fonctionnement, la résolution ainsi que le pouvoir de détection sont liés à la fréquence utilisée. Giroux (2005) nous donne dans son document quelques ordres de grandeur facilement utilisables. Il nous 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 λ n'est rien d'autre que 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, nous allons reprendre plus en détails la physique qui se cache derrière cette notion de résolution. Celle-ci peut en fait être séparée en deux composantes, la résolution verticale (Δ_r) ainsi que la résolution latérale (Δ_l). Ce sont ces deux notions qui vont être expliquées ci-dessous. (Annan A.P., 2005 ; Giroux B., 2005)

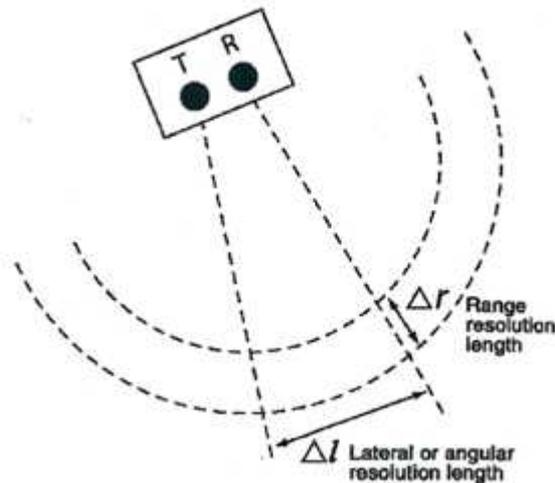


Figure 22: résolution verticale et latérale (Annan A.P., 2005)

2.4.1. Résolution verticale

Dans les explications suivantes, nous allons considérer que les ondes reçues par le récepteur sont des répliques exactes de l'impulsion émise. Les échos que l'on détectera peuvent arriver de manière simultanée, en superpositions ou de manière totalement séparés 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'accords 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. Sur la figure ci-dessous cela signifie que T doit être supérieur à $W/2$.

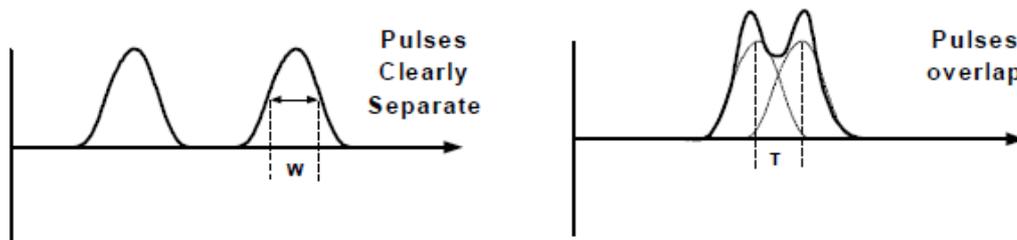


Figure 23: impulsions temporelles clairement distinguables et impulsions temporelles superposées (modifié d'après Annan A.P., 2005)

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 , nous avons un temps de parcours de

$$t_1 = \frac{2d}{v}$$

Si le second point est séparé du premier par une distance Δr , le temps de parcourt sera de :

$$t_2 = \frac{2d + 2\Delta r}{v}$$

La différence entre les deux signaux sera donc de

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \frac{2\Delta r}{v}$$

Comme on la dit précédemment, si on veut distinguer clairement les deux signaux, cette différence doit être supérieure à la moitié de la largeur de la pulsation.

$$\Delta t = \frac{2\Delta r}{v} \geq \frac{W}{2}$$

La résolution verticale sera donc égale à :

$$\Delta r \geq \frac{Wv}{4}$$

On peut donc conclure que 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 cette résolution. Idéalement, cette résolution doit être indépendante de la distance entre la cible et l'émetteur mais en pratique cela n'est pas le cas. En effet, l'impulsion subira des dispersions et des atténuations qui pourront affecter cette résolution radiale. (Annan A.P., 2005)

2.4.2. Résolution latérale

Pour trouver une expression de la résolution latérale, nous allons procéder 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 et si la distance séparant le premier point et la surface est équivalente à d , nous avons un temps de parcours de

$$t_1 = \frac{2r}{v}$$

Vu que le second point est séparé latéralement du premier par une distance Δl , le second temps de parcours sera égal quant à lui à :

$$t_2 = \frac{2\sqrt{r^2 + \Delta l^2}}{v}$$

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

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

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 se simplifier et devenir :

$$\Delta t \approx \frac{\Delta l^2}{vr}$$

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

$$\Delta t = \frac{\Delta l^2}{vr} \geq \frac{W}{2}$$

Et donc la résolution latérale est égale à :

$$\Delta l \geq \sqrt{\frac{vrW}{2}}$$

Dans ce cas-ci, on constate donc 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 on peut signaler que comme on l'avait 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 nous est présentée par Rial (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 sera appelée empreinte de l'antenne. Cette zone peut être visible sur la figure suivante :

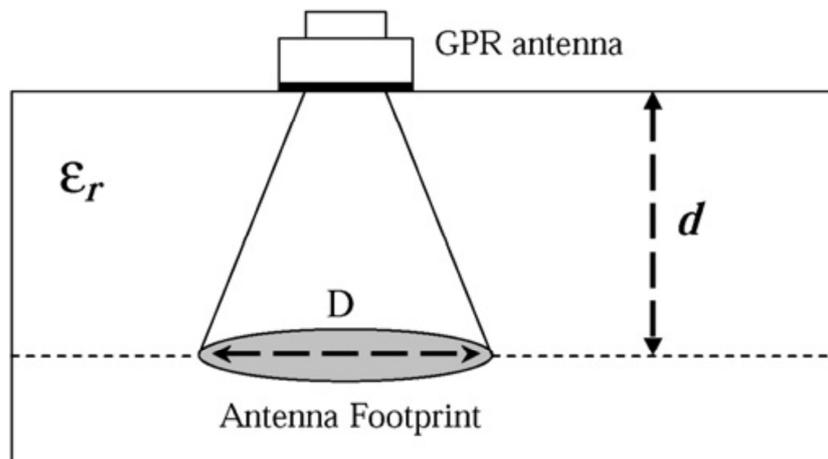


Figure 25: empreinte de l'antenne (Rial F.I., 2009)

On peut considérer la zone de résolution comme étant la zone qui ne permet pas de distinguer clairement deux objets qui seraient présents dans celle-ci. Donc la résolution horizontale peut être comparée avec la taille de l'empreinte. En effet, on aura une distinction parfaite des deux signaux si ceux-ci sont séparés d'une distance d'au moins le diamètre de l'empreinte. Or il se trouve que des estimations de la taille de l'empreinte d'antenne peuvent être obtenues par différentes expressions mathématiques proposées dans la bibliographie spécialisée. Un rapprochement commun identifie l'empreinte avec le diamètre (D) de la première zone de Fresnel.

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

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

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

Les expressions précédentes nous donnaient une résolution qui est telle que chaque objet séparé d'une distance de D ait une réponse clairement distincte des autres réponses. Cependant comme on l'a vu précédemment, on peut quand même avoir une légère superposition de ceux-ci tout en gardant une visualisation distinguée des deux signaux. 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 λ mais $\lambda/2$

$$\Delta l = \sqrt{\frac{\lambda^2}{16} + \frac{\lambda d}{2}}$$

Si la longueur d'onde est petite par rapport à la distance d , nous pouvons négliger le premier terme:

$$\Delta l = \sqrt{\frac{\lambda d}{2}}$$

Et là nous voyons que cette expression est identique à celle fournie par Annan si on utilise la relation suivante:

$$W = \frac{1}{f} = \frac{\lambda}{v}$$

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

Depuis l'apparition des antennes à très hautes 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. Nous pouvons citer par exemple la teneur en chlorure 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 (2001), Viriyametanont (2008) nous 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 ϵ_r' va augmenter. Cependant, on note que cette augmentation de ϵ_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 ϵ_r'' . (Laurens S., 2002 ; Viriyametanont K., 2008)

En effet, dans un document paru en 2001, Soustos nous montre l'influence de la teneur en eau sur les propriétés diélectriques des bétons et ce pour un ensemble d'éprouvettes. Ci-dessous, nous pouvons voir les résultats de son étude.

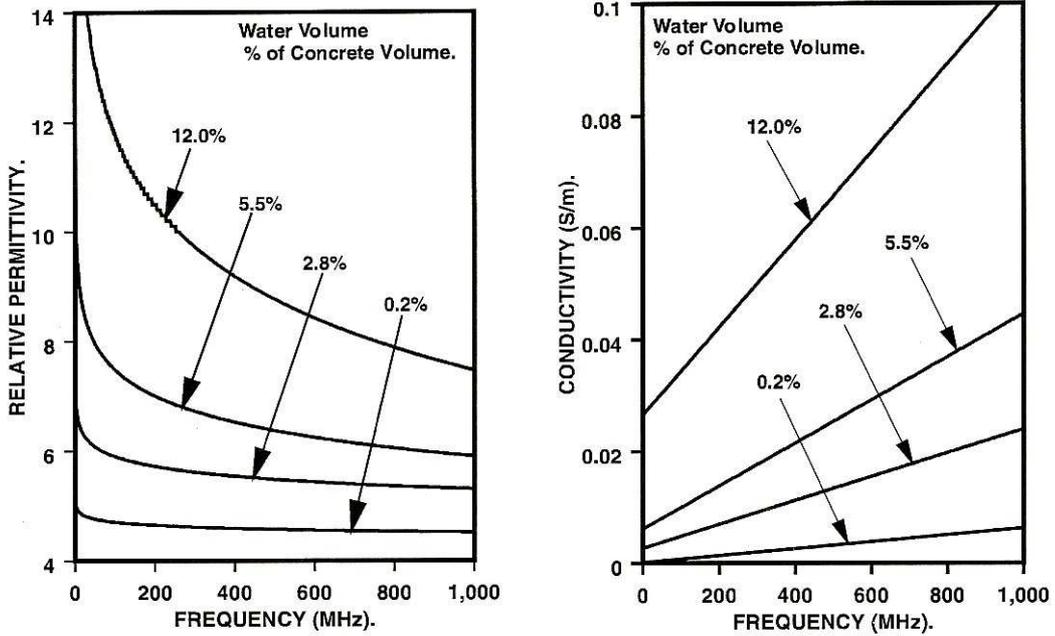


Figure 26: influence de la teneur en eau sur les propriétés diélectriques des bétons en fonction de la fréquence (Soustos M.N., 2001)

Sur cette figure, on peut clairement observer 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 augmente avec la teneur en eau. Cependant c'est encore plus visible sur la figure suivante :

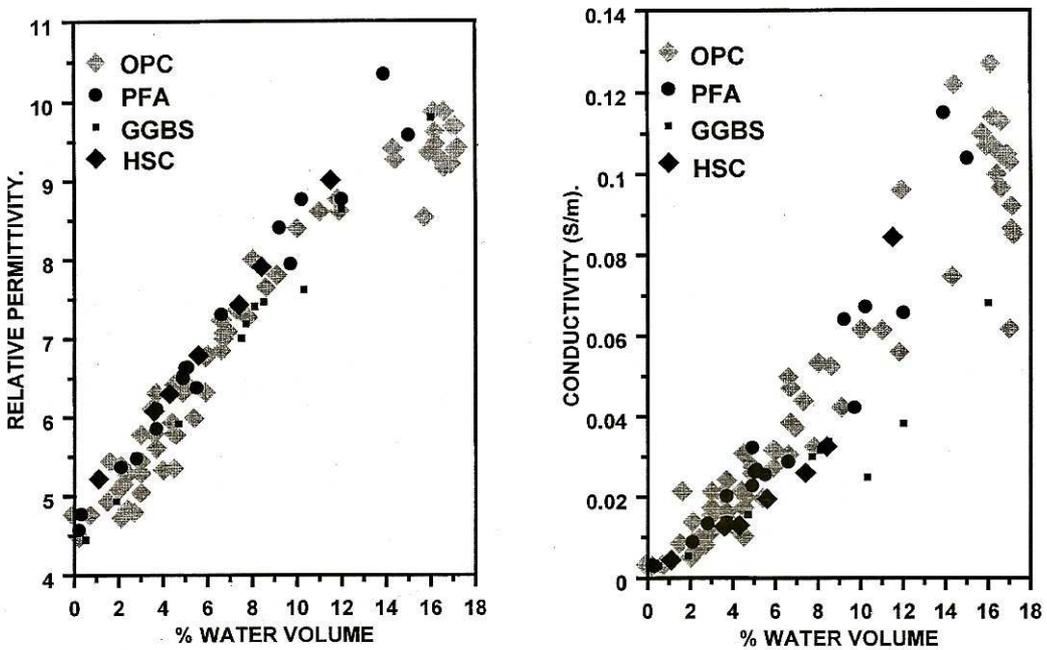


Figure 27: influence de la teneur en eau sur les propriétés diélectriques des bétons (Soustos M.N., 2001)

Sur ces graphiques, on observe bien la tendance proportionnelle entre la teneur en eau et l'augmentation des propriétés électriques du béton. Cette tendance est même linéaire. Soustos (2001) nous 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 tout en restant dans des bornes étroites.

2.6. Mesure dynamique

Au tout début de ce chapitre 2, nous avons vu que l'on pouvait ajouter une information spatiale à l'étude radar. En effet, plutôt que de laisser fixe l'émetteur et le récepteur, on peut bouger ceux-ci ensemble le long d'une ligne pour aboutir à un graphique du type B-scan visible au point 2.1. Cependant, on peut aussi réaliser une étude 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 ; Viriyametanont K., 2008).

A la page suivante, sur le graphique b, nous pouvons voir les courbes typiques obtenues dans le cas d'une étude au CMP :

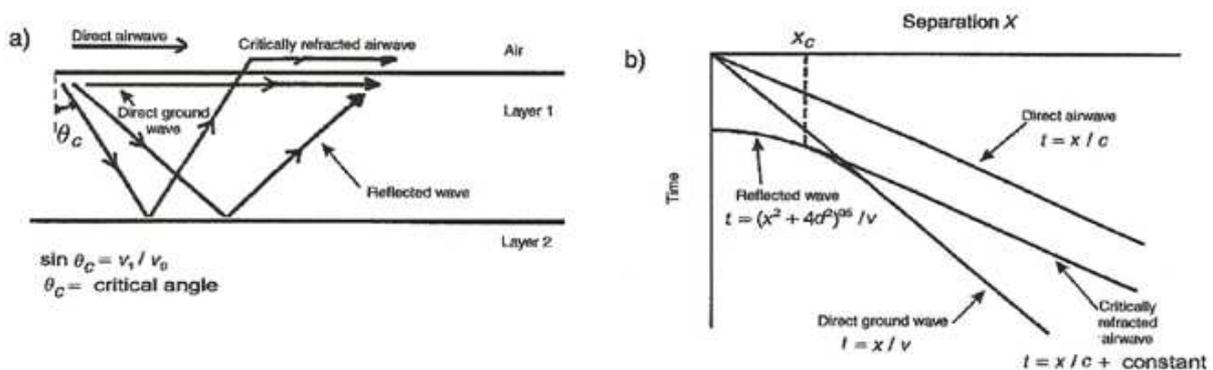


Figure 28 : résultat d'un CMP (modifié d'après Annan A.P., 2005)

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, l'onde directe transmise dans l'air est représentée par la droite de pente x/c ou c est la vitesse de la lumière dans l'air ($3.10^8 m/s$). On distingue aussi la droite de l'onde directe passant par le sol. De celle-ci, on pourra déterminer la vitesse de propagation au sein même du matériau. En ce qui concerne l'onde réfléchie, on voit que nous ne sommes plus en présence d'une droite mais d'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. On peut déjà noter que dans ce travail seul 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)

Dans ce présent chapitre, nous allons expliquer l'origine des équations ainsi que leur discrétisation, l'algorithme de résolution et les hypothèses posées par le programme. On terminera par donner quelques recommandations importantes à respecter.

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'un ordinateur. En effet, celui-ci à une capacité limitée, on ne peut pas 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 devra 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)

Dès lors, si on utilise ce genre de condition limite, tous les milieux contenant les cibles étudiées seront supposés s'entendre jusqu'à l'infini. On peut noter que dans le cas où le milieu n'est pas infini (par exemple une dalle de béton), il faudra 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 (2005) nous renseigne 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 on a pu l'expliquer dans le chapitre deux de cette partie « recherche bibliographique », 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 doit être résolu de manière numérique.

Une discussion intéressante sur la modélisation d'onde électromagnétique peut être trouvée dans le document de Taflove (2005). Celui-ci nous 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 considère en plus une source magnétique. L'équation de Faraday devient donc :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = -\frac{\partial \vec{b}}{\partial t} - \vec{M}$$

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

Après combinaisons des équations, et après avoir fait l'hypothèse d'un milieu linéaire, isotrope et non dispersif, il obtient les équations suivantes :

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

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

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

$$\vec{j} = \vec{j}_{source} + \sigma \vec{E}$$

$$\vec{M} = \vec{M}_{source} + \sigma^* \vec{H}$$

Avec σ^* =perte magnétique équivalente.

On peut écrire les équations précédentes dans chacune des trois directions de l'espace. On obtient donc :

$$\frac{\partial E_x}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left[\frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} - (J_{source_x} + \sigma E_x) \right] \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left[\frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} - (J_{source_y} + \sigma E_y) \right] \quad (3.2)$$

$$\frac{\partial E_z}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left[\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} - (J_{source_z} + \sigma E_z) \right] \quad (3.3)$$

$$\frac{\partial H_x}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left[\frac{\partial E_y}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial y} - (M_{source_x} + \sigma^* H_x) \right] \quad (3.4)$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left[\frac{\partial E_z}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial z} - (M_{source_y} + \sigma^* H_y) \right] \quad (3.5)$$

$$\frac{\partial H_z}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left[\frac{\partial E_x}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial x} - (M_{source_z} + \sigma^* H_z) \right] \quad (3.6)$$

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

Pour trouver une solution aux 6 équations du chapitre précédent, nous allons utiliser l'algorithme de Yee mis au point en 1966 et dont la robustesse n'est plus à démontrer.

L'algorithme de Yee permet de résoudre à la fois le champ 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} sera entouré par 4 composants de \vec{E} . Sur la figure suivante, on peut voir la position des composants vectoriels du champ magnétique et électrique sur une maille cubique du réseau spatial de Yee.

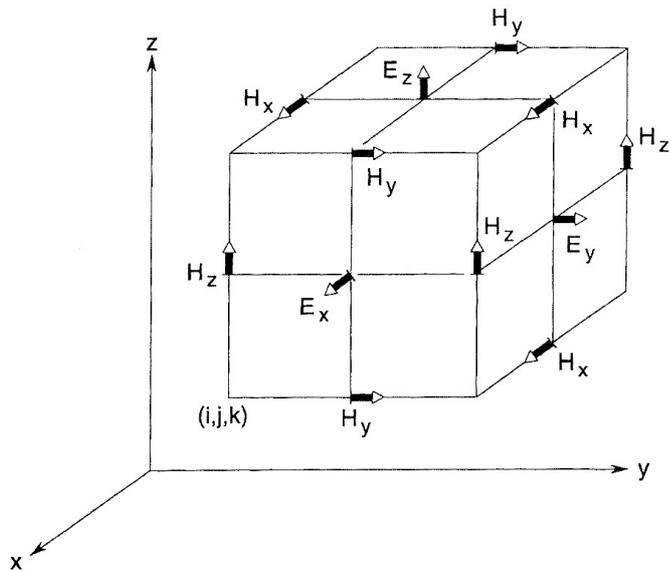


Figure 29 : position des composants vectoriels du champ magnétique et électrique sur une maille cubique du réseau spatial de Yee (Taflove A., 2005)

Cette figure nous 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 on a déjà pu l'expliquer 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, à ce stade on peut noter que l'algorithme de Yee utilisera une différence finie centrée pour approximer les dérivées spatiales. Une discussion plus approfondie à ce sujet pourra être trouvée dans le [paragraphe 3.2.2](#). En ce qui concerne la discrétisation temporelle, Yee utilisera aussi une différence finie centrée.

Ci-dessous, on peut voir une figure qui résume selon l'algorithme de Yee, les différentes étapes de calcul dans l'espace et le temps.

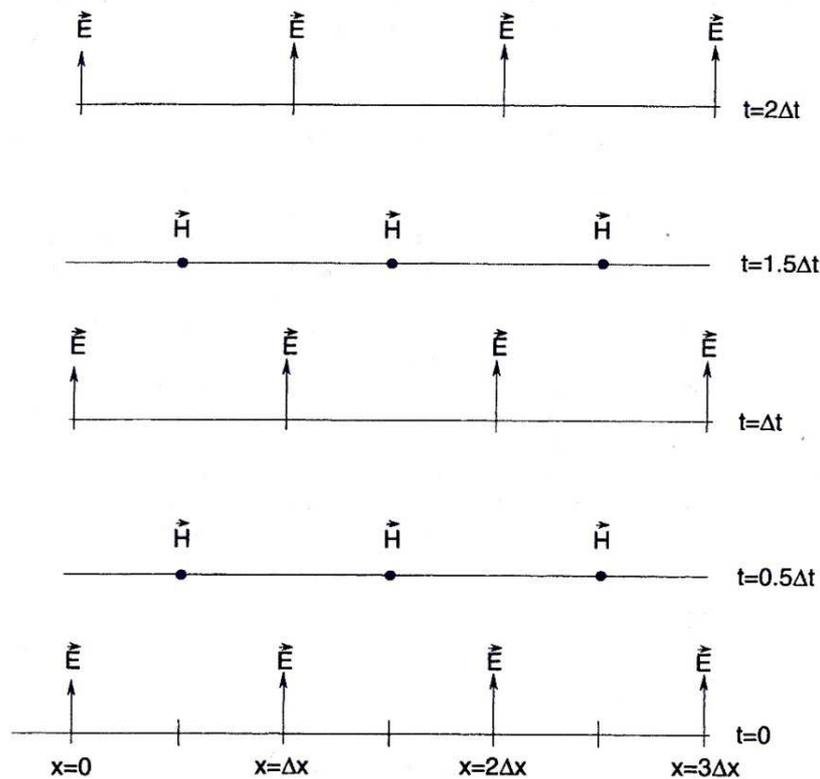


Figure 30 : exemple de graphique espace-temps de l'algorithme de Yee pour une propagation d'onde unidirectionnelle (Taflove A., 2005)

Pour bien comprendre, on peut par exemple se placer au pas de temps Δt . A cet instant, on calcule tous les composants de \vec{E} dans l'espace 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, on arrivera à exprimer l'inconnue \vec{E} uniquement en fonction de valeurs précédemment calculées. Une fois que tous les calculs de \vec{E} sont réalisés, on stocke ces valeurs 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. On voit donc que l'on calcule de manière décalée les champs électriques et magnétiques 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 Δt , 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 1.2.3, nous allons discrétiser numériquement les équations (3.1) à

(3.6). Cependant avant de réaliser cette opération, nous allons introduire les différentes notations que nous allons utiliser dans celui-ci.

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

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

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

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

Dans laquelle Δt est le pas temporel et n un entier.

Comme on a déjà pu le dire, dans son algorithme Yee utilise 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'offrent 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 $t_n = n\Delta t$:

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

On peut voir que pour discrétiser sa dérivée, Yee utilise le point distant de $\Delta x/2$ à sa droite et à sa gauche. Yee utilise cette notation en $\Delta x/2$ car comme on a pu le voir dans le chapitre précédent (3.2.1), il décale l'étude des composant de \vec{E} et de \vec{H} d'un espace égal à $\Delta x/2$. Or pour l'étude des composants de \vec{E} , comme nous allons le voir au chapitre 1.2.3, nous allons utiliser les composant de \vec{H} précédemment mesurés. Par soucis d'exhaustivité, on peut noter 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) , a la forme suivante :

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

Ici aussi on peut noter que nous étudions d'une manière décalée le champ électrique et magnétique. Cela explique pourquoi nous utilisons des incréments de $\Delta t/2$.

3.2.3. Expressions discrétisées des équations de Maxwell en trois dimensions

Désormais, nous pouvons appliquer les notations et les idées développées au point précédent aux équations (3.1) à (3.6), afin d'obtenir une approximation numérique des équations de Maxwell. Nous allons expliquer toutes les étapes pour l'équation (3.1). Cependant, vu que le raisonnement est similaire pour les autres, nous ne noterons que la forme finale de ces équations. De plus par soucis de lisibilité celles-ci seront placées en **Annexe1**. Reprenons l'équation (3.1) sous forme différentielle :

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

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 :

$$\begin{aligned} & \frac{E_x|_{i,j+1/2,k+1/2}^{n+1/2} - E_x|_{i,j+1/2,k+1/2}^{n-1/2}}{\Delta t} \\ &= \frac{1}{\varepsilon_{i,j+1/2,k+1/2}} \left(\frac{H_z|_{i,j+1,k+1/2}^n - H_z|_{i,j,k+1/2}^n}{\Delta y} - \frac{H_y|_{i,j+1/2,k+1}^n - H_y|_{i,j+1/2,k}^n}{\Delta z} \right. \\ & \quad \left. - J_{source_x}|_{i,j+1/2,k+1/2}^n - \sigma_{i,j+1/2,k+1/2} \cdot E_x|_{i,j+1/2,k+1/2}^n \right) \end{aligned} \quad (3.7)$$

On peut noter que 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 :

$$E_x|_{i,j+1/2,k+1/2}^n = \frac{E_x|_{i,j+1/2,k+1/2}^{n-1/2} + E_x|_{i,j+1/2,k+1/2}^{n+1/2}}{2} \quad (3.8)$$

On voit donc que l'on considère la valeur de E_x au pas de temps n 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 on substitue cette équation (3.7) dans l'équation (3.8), et que l'on multiplie les deux membres par Δt nous obtenons :

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

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 :

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

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 sera celle utilisée dans le calcul numérique. La voici :

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

Taflove (2005) nous indique que l'approximation semi-implicite (3.8) posée précédemment s'avère dans la pratique être numériquement stable et donne des résultats précis pour des valeurs de conductivité (σ) allant de 0 à l'infini. Pour rappel, les expressions

discrétisées des équations (3.2) à (3.6) se trouvent en Annexe 1. Nous ne les reprendrons pas ici.

3.3. Hypothèses réalisées par GprMax

On a pu voir au chapitre précédent que Taflove (2005) a dû réaliser certaines hypothèses pour obtenir une forme simple d'équations discrétisées. Dans le programme GprMax de telles hypothèses sont aussi nécessaires et cela afin de garantir un besoin en ressource de calcul raisonnable. De plus, cela facilitera l'étude de la réponse du signal GPR. En effet, si on limite la complexité du problème, on pourra se concentrer sur une réponse intéressante et on n'encombrera 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 seront considérés comme étant linéaires et isotropes.
- En ce qui concerne le programme 2D de GprMax, l'antenne d'émission sera 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, 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 précédemment pour obtenir une valeur plus réaliste de celle-ci. Seule la valeur correspondant à la fréquence du radar sera utilisée dans le programme. 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 (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 de notre 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 Δt ne peuvent pas être prises indépendamment l'une de l'autre. Si on veut un processus inconditionnellement stable, il faudra respecter la condition CFL (d'après les initiales de Courant, Friedrichs et Lewy) suivante :

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

Où c correspond à la vitesse de la lumière. Ainsi on constate que Δt est borné par des valeurs de Δx et Δy . On peut noter que GprMax s'arrange pour toujours respecter cette condition. Il fixera 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, nous aimerions avoir Δx , Δy et même Δt aussi grand que possible afin d'exécuter le plus rapidement notre simulation. Toutefois, comme on vient de le voir, la valeur de Δt est conditionnée. En effet, si on choisit un pas de temps trop grand, la solution peut devenir numériquement instable. Il en est de même pour le pas spatial. Si Δx et Δy sont trop grand 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 (2005), il n'y a pas vraiment de directives nettes et précises pour choisir un pas de discrétisation spatiale. En général, le pas que l'on va choisir 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 devra être suffisamment discrétisé. Par exemple, cela signifie qu'un cylindre dont le rayon est égal à une ou deux fois le pas spatial ne ressemblera pas vraiment à un cylindre. Donc si on veut quelque chose de précis, il faudra 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 quel que soit leur direction et la 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 (2005). Dans celui-ci, on nous 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, si on utilise un maillage carré, l'atténuation de la vitesse sera 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-ci qui résume un peu tout ce qui vient d'être dit :

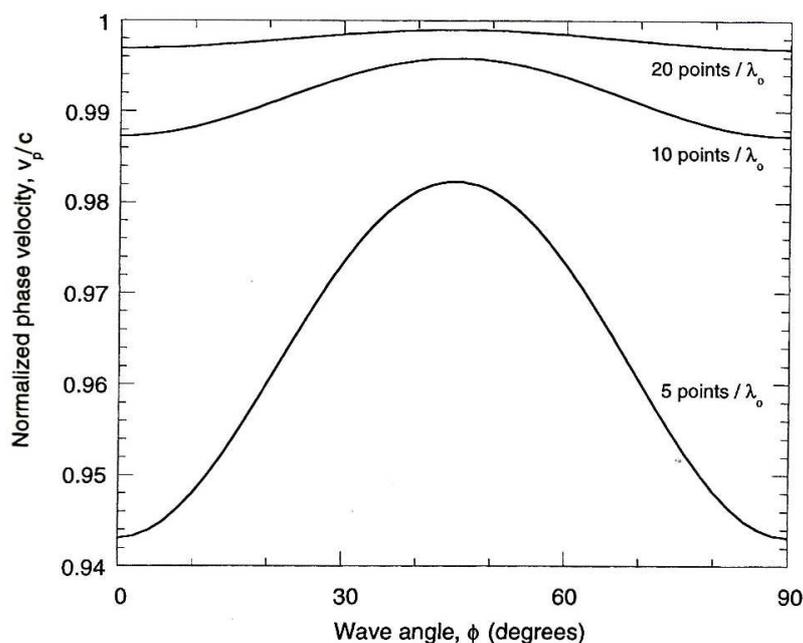


Figure 31: variation de la vitesse de phase en fonction de la discrétisation et de l'angle (Taflove A., 2005)

Grâce à ce qui vient d'être dit mais aussi grâce au document de Giannopoulos (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 ». On peut retranscrire cette phrase sous forme mathématique (Giannopoulos A., 2005 ; Taflove A., 2005):

$$\Delta x, \Delta y \leq \frac{\lambda}{10}$$

Si on respecte l'ensemble des recommandations citées précédemment, notre modélisation devrait donner des résultats concluants. On retrouvera dans la suite de ce document un chapitre entier consacré à des modélisations d'essais réels poursuivis en laboratoire durant ce travail de fin d'étude. Grâce à celles-ci, on pourra choisir la meilleure procédure opératoire à utiliser pour la partie expérimentale et par la suite, on pourra comparer les valeurs numériques aux valeurs réelles obtenues.

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.

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 matériau 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.

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%20SILF/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. 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.

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%20Measureing%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, p43-52.

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

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

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.

Viriyametanont 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.

Annexe 1

Les expressions discrétisées des formules (3.2) à (3.6) du chapitre 3 de la partie recherche bibliographique se présente sous la forme suivante (Taflove A., 2005):

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

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

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

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

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