Radar et Réseaux de Neurones Artificiels appliqués à l'évaluation non destructive des teneurs en eau et en chlorures des bétons

Zoubir Mehdi Sbartaï

Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions (LMDC) – INSA, Université Paul Sabatier - Toulouse – 135 avenue de Rangueil - 31400 TOULOUSE Cedex 4

RESUME. L'évaluation non destructive des ouvrages en béton vise un objectif majeur : obtenir des informations de nature à contribuer au diagnostic de l'état de l'ouvrage ou à alimenter des modèles de prédiction de durée de vie et/ou de requalification. Parmi les informations importantes à évaluer in situ, les teneurs en eau et en chlorures des bétons sont des indicateurs pathologiques pertinents, notamment vis-à-vis du risque de corrosion. La quantification de ces grandeurs physiques in situ et l'évaluation de leurs variations spatiales au sein des structures présentent donc un intérêt évident.

L'objectif de cet article s'inscrit dans ce contexte. Il porte sur l'application de la technologie radar à l'évaluation quantitative des teneurs en eau et en chlorures des bétons. Le problème a été abordé selon une approche statistique, basée sur le concept des réseaux de neurones artificiels. Une banque de données expérimentale, associant caractéristiques physiques de bétons et signatures radar, a été constituée en laboratoire. Cette banque a permis de développer un modèle neuromimétique d'inversion de la mesure radar capable de prédire les teneurs en eau et en chlorures des bétons.

MOTS-CLÉS : Radar, Réseaux de Neurones Artificiels, Béton, Teneurs en eau et en chlorures

ABSTRACT. The main objective of the non-destructive evaluation is to obtain information allowing the diagnosis of concrete structures or to quantify input data of durability prediction and/or recalculation models. Among the interesting information to be evaluated on site, water and chloride contents of concrete are relevant pathological features. The on site quantification of these physical factors and the evaluation of their spatial variation are very important.

The goal of this research work is related to the application of radar technology for the physical characterization of concrete, especially on the quantitative evaluation of water and chloride contents. The problem has been resolved using statistical approach based on artificial neural network model. Experimental database was then implemented, which relates physical characteristics of concrete and radar features. This data base has been leaded to develop neural network model of radar measurement inversion able to predict water and chloride contents of concrete made in laboratory.

KEYWORDS: Radar, Artificial Neural Networks, Concrete, Water and chlorides content

1. INTRODUCTION

De nos jours, le nombre d'infrastructures concernées par la dégradation et le vieillissement a atteint un seuil alarmant. En effet, les dotations consacrées au renforcement des ouvrages d'art du secteur public ont progressé d'environ 200 % depuis 1992 pour atteindre 93,3 millions d'euros en 2005 (http://www.senat.fr). Le Contrôle Non Destructif (CND) des structures en béton présente donc un enjeu économique important permettant la gestion du patrimoine bâti. Mis à part les problèmes de structures liés à la conception et aux sollicitations à long terme qui peuvent entraîner des perturbations graves, la dégradation du béton, sous l'action des pathologies physico-chimiques (ex : corrosion des barres d'armatures) est parmi les facteurs majeurs qui limitent la durée de vie des ouvrages.

Toutefois, il est important de souligner que la présence d'eau dans les pores du béton est un facteur important pour la pénétration des agents agressifs (dioxyde de carbone, chlorures, sulfates…). D'autre part, elle est essentielle pour le développement de la plupart des pathologies (corrosion, réaction alcalis-granulats, cycles de gel-dégel, lessivage des alcalins…). Dans le but de prévoir les risques pathologiques, il est donc nécessaire d'évaluer et de quantifier la variation spatiale de l'humidité du béton au sein de la structure, mais également de certains agents pathogènes tels que les chlorures.

Parmi les diverses méthodes de CND, la technique radar a prouvé son aptitude à la détection des gradients d'humidité de surface dans le béton d'enrobage (Laurens et al, 2002). En outre, la propagation des ondes électromagnétiques (EM) est gouvernée par la permittivité du béton qui est reconnue sensible à la salinité de sa solution interstitielle (Robert, 1998). De plus, la mesure radar se prête particulièrement à l'auscultation des ouvrages de grande dimension du fait de sa rapidité et de sa simplicité d'exécution in situ. Cependant, jusqu'à présent, les travaux réalisés se sont focalisés sur l'étude de l'effet des caractéristiques physiques des bétons (teneur en eau et en chlorures) (Sbartaï et al, 2005) ou de leurs propriétés EM (permittivité, conductivité) (Klysz, 2004) sur la mesure radar. Un travail important reste donc à réaliser sur le problème inverse : prédiction des caractéristiques physiques des bétons à partir de mesures radar.

Les travaux de recherche présentés dans cet article s'inscrivent dans cette optique. Ils visent à mettre en œuvre, à moyen terme, une méthodologie de diagnostic précoce des risques pathologiques basée sur la caractérisation physique des bétons par les ondes radar. Le problème a été abordé selon une approche statistique. Dans cette thématique, les Réseaux de Neurones Artificiels (RNA) se positionnent comme une technique d'inversion prometteuse du fait de leur parcimonie et de leur simplicité. Pour ce faire, une banque de données expérimentale, associant caractéristiques physiques de bétons et signatures radar, a été constituée en laboratoire. Cette banque de données a permis de développer un modèle neuromimétique d'inversion capable de prédire, avec une précision acceptable, les teneurs en eau et en chlorures des bétons.

2. PRINCIPE DE LA TECHNIQUE RADAR

Le RADAR (**Ra**dio **D**etecting **A**nd **R**anging) est une application de la théorie de l'électromagnétisme. Le système rayonne de l'énergie EM dans la gamme des hyperfréquences (environ 100 à 3000 MHz). Cette énergie se propage dans le milieu ausculté et se réfléchit sur des interfaces présentant un contraste de permittivité, par exemple à l'interface béton-armature (figure 1).

La méthode d'auscultation avec une antenne couplée au matériau consiste à réaliser des profils radar sur la structure (figure 1). L'antenne est déplacée sur la surface du béton en collectant des signaux avec un pas défini par l'opérateur. La vitesse d'auscultation dépend du nombre de scans (acquisition) par mètre. Dans le cas de l'auscultation des ponts, la vitesse de déplacement de l'antenne est comprise entre 1 et 20 km/h en fonction de la précision spatiale recherchée. A chaque acquisition, l'antenne réceptrice (R) enregistre le signal de l'onde directe (onde qui se propage directement de l'émetteur vers le récepteur) et des différentes réflexions sous forme de signal temporel (figure 1b). La juxtaposition de l'ensemble des signaux collectés permet une représentation sous forme d'image (coupe-temps) du milieu ausculté (figure 1c). L'analyse des signaux enregistrés (ex : vitesse de propagation et atténuation) peut donner des informations géométriques (position et profondeurs des armatures, épaisseurs de dalles, etc.) et physiques (teneur en eau) sur le milieu de propagation.

La propagation des ondes radar est gouvernée par la permittivité complexe du béton. Cette propriété EM peut être traduite par la relation suivante :

$$\varepsilon = \varepsilon' - i\varepsilon'' \qquad \text{[Eq. 1]}$$

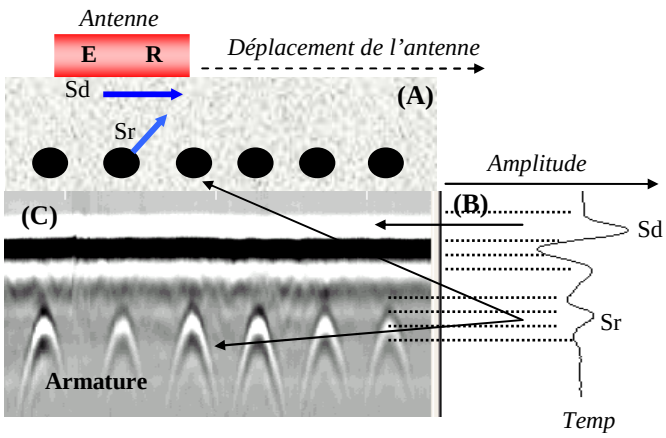
La partie réelle (ε') est la constante diélectrique du béton et traduit sa capacité au stockage d'énergie sous forme de polarisation. Dans le cas d'un milieu à faibles pertes, la vitesse de propagation est reliée à la constante diélectrique et la vitesse de propagation des ondes EM dans le vide ($c = 3\times10^8$ m/s) par la relation suivante :

$$v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon'}} \qquad \text{[Eq. 2]}$$

La partie imaginaire (ε'') est le facteur de perte et traduit les pertes d'énergie électrique par adsorption, résultant des pertes diélectriques (phénomènes de polarisation) et de l'effet Joule (phénomène de conduction électrique). Dans le cas de l'approximation d'onde plane, le facteur de perte définie l'atténuation α des ondes EM selon la relation suivante :

$$\alpha = \frac{\omega\varepsilon''}{2}\sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon'}} \qquad \text{[Eq. 3]}$$

Les relations (Eq. 2 et Eq. 3) montrent que la vitesse et l'atténuation des ondes radar peuvent être analysées pour l'évaluation de la variation de la permittivité du béton. Compte tenu du fait que cette dernière est affectée par les teneurs en eau et en chlorures, il est donc possible d'appliquer la technique radar à la caractérisation physique du béton in situ, permettant ainsi d'évaluer les risques pathologiques des ouvrages.



A) représentation schématique d'un élément en béton armé.

B) signal enregistré (Radargramme)

C) Coupe-temps

Sd : signal de l'onde directe

Sr : signal de la réflexion sur l'interface béton-armature

E : émetteur

R : récepteur

Figure 1: Principe simplifié de l'auscultation radar d'un élément en béton armé.

3. MODELISATION STATISTIQUE PAR RNA

Les RNA offrent une alternative pour la modélisation mathématique et font partie des modèles statistiques non paramétriques et non linéaires aptes à répondre aux problématiques d'aide à la décision, de diagnostic, de prédiction, etc. L'application de ce type de modèle n'est apparue qu'au début des années 1990 et leur avantage réside dans leur capacité de généralisation.

Les RNA sont inspirés de la biologie et représentent un modèle mathématique du fonctionnement du neurone biologique (Jodouin, 1994). L'idée est de présenter au RNA des données d'entrée et de sortie, et de lui faire apprendre la relation entre les deux par un processus appelé apprentissage. Ce dernier consiste à minimiser l'erreur par ajustement des paramètres du modèle. Le processus d'apprentissage se fait généralement en cinq étapes (figure 2).

1- Pondération des entrées par des paramètres appelées poids (W) ;
2- Sommation des entrées pondérées ;
3- Calcul de la réponse du neurone par la fonction d'activation ;
4- Calcul de l'erreur entre la sortie théorique et celle calculée par le RNA ;
5- Modification des poids pour minimiser l'erreur par un algorithme mathématique spécifique appelé algorithme d'apprentissage.

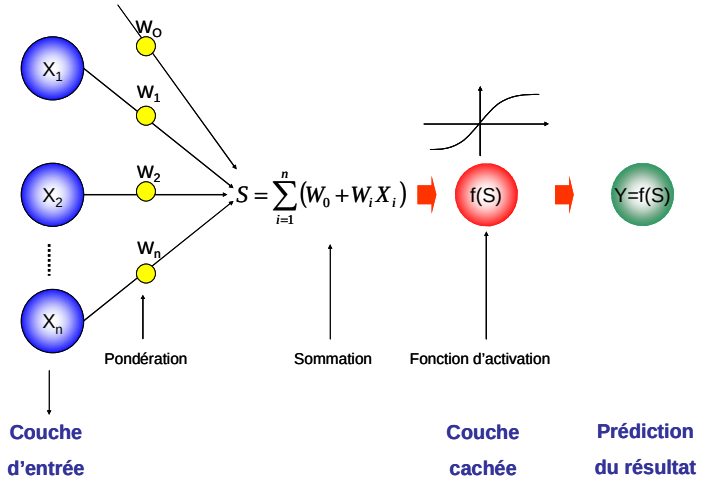


Figure 2: Processus d'apprentissage et fonctionnement du RNA.

L'algorithme d'apprentissage le plus utilisé est celui de la rétropropagation du gradient de l'erreur. Cet algorithme est basé sur le calcul du gradient d'erreur, et vise à minimiser l'erreur en sortie du réseau. Le gradient de l'erreur E_n par rapport à la matrice des poids W se calcule de la façon suivante :

$$\nabla E_{n/W} = \frac{\partial E_n}{\partial W} \qquad \text{[Eq. 4]}$$

Les nouveaux poids de la matrice W à l'étape (n+1) sont alors calculés comme suit :

$$W_{n+1} = W_n - \eta \nabla E_{n/W} \qquad \text{[Eq. 5]}$$

η représente le pas d'apprentissage

La méthode dite de validation croisée est souvent utilisée pour juger de la capacité de généralisation du modèle (Dreyfus et al. 2004). Cette technique consiste à tester le modèle sur des données non utilisées pour l'ajustement des poids. Les données de test représentent généralement 20% de la banque de données.

4. PROGRAMME EXPERIMENTAL : CONSTITUTION DE LA BASE DE DONNEES

4.1. MATERIAUX

Quatre bétons ont été fabriqués avec différents rapports Eau/Ciment (0,5 ; 0,6 ; 0,7 et 0,78). Tous les mélanges ont été formulés avec le ciment Portland CEM I 52,5 R, des granulats roulés siliceux de Garonne (0-10 mm). Le malaxage a été réalisé avec des granulats humides mais en ayant mesuré au préalable et pris en compte leur teneur en eau.

4.2. CONDITIONNEMENT DES CORPS D'EPREUVES

Pour l'étude de l'effet de la teneur en eau sur la mesure radar, nous avons visé six états de saturation (0, 20, 40, 60, 80, et 100 %). Trois dalles de 25×25×8 cm^3 ont été fabriquées pour chaque état de saturation et pour les quatre bétons, 72 dalles ont ainsi été confectionnées durant cette étude. Les états de saturation sont atteints avec un contrôle de masse durant le séchage des éprouvettes. Une fois ces teneurs atteintes, les éprouvettes sont étanchées pour conserver l'état de saturation et placées dans une étuve à 70°C pour une répartition homogène de l'humidité dans les éprouvettes.

Plusieurs dalles issues des mélanges précédents ont été choisies arbitrairement pour l'étude de l'effet d'une contamination par les chlorures. Pour cela, les dalles ont été préalablement séchées dans une étuve à 70°C jusqu'à stabilisation de la masse. Après séchage, elles ont été placées horizontalement dans des bacs au contact de solutions salines (eau douce + NaCl) à des concentrations de 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 80 et 120 g/l. Après saturation totale (environ 2 mois), les dalles ont été séchées progressivement dans une étuve à 70°C. Un suivi pondéral et des mesures radar ont été effectués durant la phase de séchage. A chaque état de saturation, la solution saline présente dans les pores du béton a été répartie de façon homogène selon la procédure décrite dans le paragraphe précédent. Enfin, une analyse chimique a été réalisée sur des carottes prélevées sur chaque dalle à trois profondeurs (partie supérieure, milieu, partie inférieure) pour l'évaluation de la distribution des chlorures totaux selon les recommandations (AFPC-AFREM, 1997).

4.3. INSTRUMENT ET MESURE

Le radar utilisé est un système SIR-2000, développé par la société Geophysical Surveys System Inc (GSSI®). Cet appareil est équipé d'une antenne couplée au matériau de type bi-statique avec une distance E–R fixe de l'ordre de 5,9 cm. L'antenne (modèle GSSI 5100) est caractérisée par une large bande ayant une fréquence centrale égale à 1,5 GHz. Cette antenne a été choisie du fait de son usage fréquent pour l'auscultation des ouvrages en béton armé.

La mesure radar consiste à placer l'antenne sur la surface de la dalle et à enregistrer environ 200 scans. L'antenne réceptrice reçoit le signal direct (Sd) et celui réfléchi par la partie inférieure de la dalle (Sr). L'analyse consiste à suivre les positions et atténuations temporelles de ces deux signaux.

5. RESULTATS EXPERIMENTAUX

Les figures 3 et 4 montrent l'effet des chlorures sur l'atténuation et la position temporelle de Sd et Sr à différentes teneurs en eau. Une augmentation de la teneur en eau conduit à une augmentation de la position temporelle par accroissement de la constante diélectrique et de l'atténuation des signaux radar par effet d'absorption et de couplage (atténuation géométrique). On note un comportement linéaire entre l'atténuation et la teneur en eau volumique. Ce comportement est indépendant de la porosité et cela pour l'ensemble des bétons testés.

L'ajout de chlorures en solution fait augmenter l'atténuation des deux signaux (Sd et Sr) par effet de conduction. L'atténuation des ondes radar est donc affectée par les teneurs en eau et en chlorures alors que la position temporelle de Sr est sensible uniquement à la teneur en eau. La teneur en chlorures n'influe donc pas sur la vitesse de propagation. D'autre part, il est important de souligner que la position temporelle de Sd ne peut être considérée comme une observable pertinente du fait de sa dispersion statistique importante (figure 4).

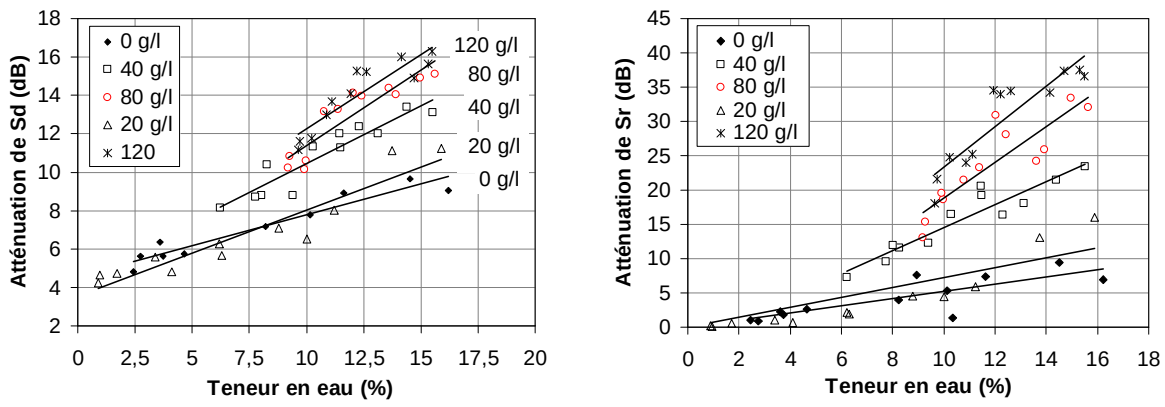


Figure 3 : Effet des teneurs en eau et en chlorures sur l'atténuation des signaux radar.

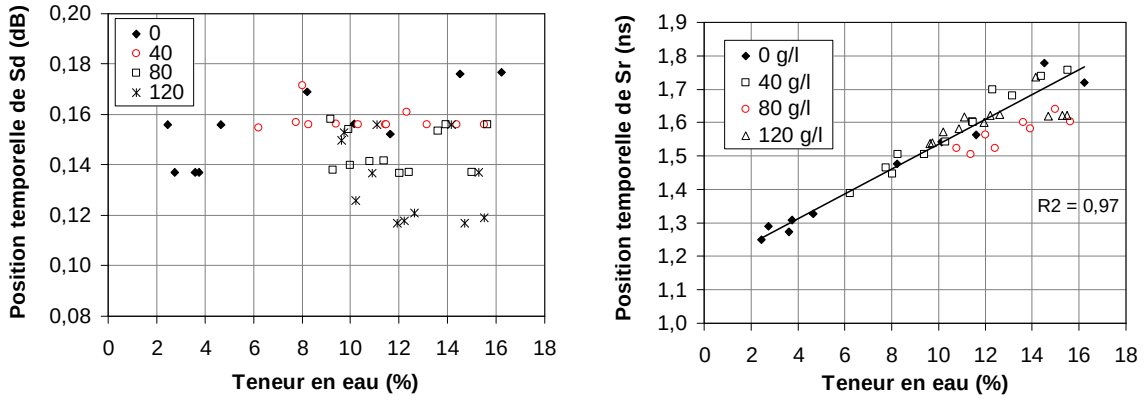


Figure 4 : Effet des teneurs en eau et en chlorures sur la position temporelle des signaux radar.

6. MISE EN ŒUVRE DES RNA

6.1. BASE DE DONNEES ET ARCHITECTURE DU RNA

La base de données utilisée pour la mise en œuvre du RNA est constituée de 100 exemples. Quatre-vingt sont utilisés pour l'apprentissage du réseau et 20 pour le test. Deux RNA multicouches ont été entraînés sur la même base de données pour prédire les teneurs en eau et en chlorures.

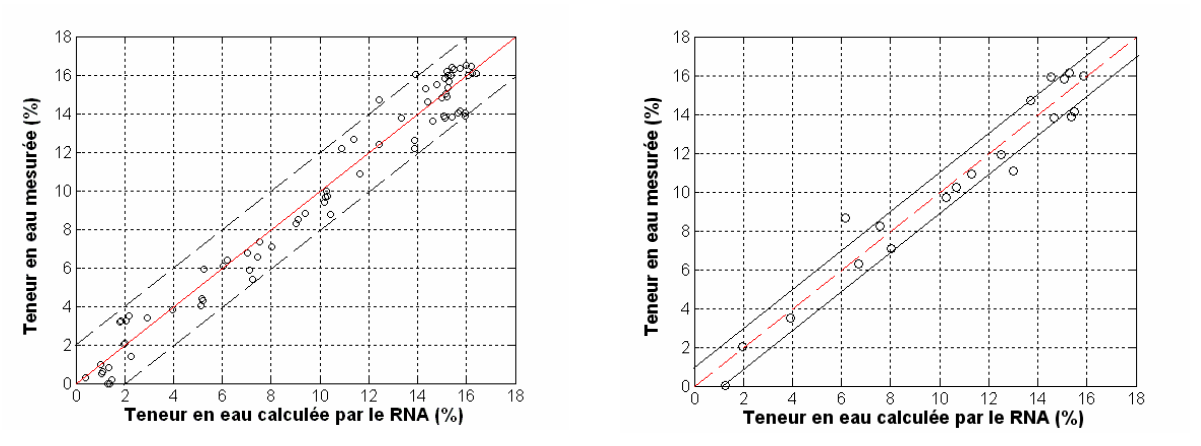
Les RNA mis en œuvre sont constitués d'une couche d'entrée, d'une couche cachée et d'une seule sortie. La fonction d'activation utilisée pour l'ensemble des neurones est de type sigmoïde (Eq. 6)

$$f(x) = 1/1 + e^{-x} \qquad \text{[Eq. 6]}$$

Compte tenu des résultats de laboratoire, les paramètres d'entrée des deux modèles sont les observables sensibles aux teneurs en eau et/ou en chlorures. Ces observables sont l'atténuation de Sd (Ad), l'atténuation de Sr (Ar) et la position temporelle de Sr (Ptr). Le premier modèle appelé PMC-W évalue la teneur en eau et le second (PMC-Cl) utilise les paramètres d'entrée du réseau précèdent ainsi que sa sortie (teneur en eau). Enfin, le codage des différents algorithmes a été effectué dans l'environnement Matlab®.

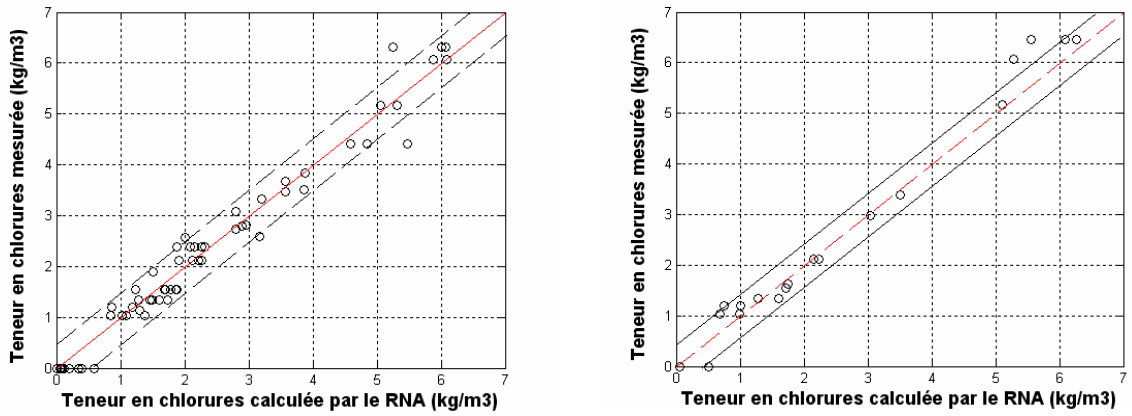
6.2. RESULTATS

La figure 5a illustre la corrélation entre les teneurs en eau mesurées et prédites par le modèle pour la base d'apprentissage. La corrélation est assez bonne avec une erreur absolue de prédiction inférieure à 2 % de teneur en eau. Sur les 80 essais, nous notons que 75 % sont prédits avec une erreur absolue inférieure à 1 %. Sur la base de test, les mêmes observations sont notées avec toutefois un peu moins de précision. La corrélation entre les teneurs en eau mesurées et prédites concernant la base de test est présentée sur la figure 5b. Sur les 20 essais qui composent cette banque de données, l'erreur absolue mesurée sur 70 % des exemples est inférieure à 1%, et seulement 5 % présentent une erreur absolue comprise entre 2 et 3 %. Ces résultats témoignent donc des capacités de généralisation du RNA adopté. Sur la figure 6a, nous montrons la corrélation entre teneurs en chlorures mesurées et calculées par le modèle, basée sur les exemples d'apprentissage. Cette figure montre clairement que le modèle prédit la teneur en chlorures des bétons avec une précision acceptable. En effet, 95 % des essais sont prédits avec une erreur absolue inférieure à 0,5 kg/m^3 de béton. Sur la base de test (figure 6b), l'erreur absolue est plus importante mais reste inférieure à 0,5 kg de chlorures/m^3 de béton pour 90 % des essais.



a- Apprentissage b- Test

Figure 5 : Corrélation entre teneurs en eau mesurée et calculée par le modèle PMC-W.



a- Apprentissage b- Test

Figure 6 : Corrélation entre teneurs en chlorures mesurée et calculée par le modèle PMC-Cl.

7. CONCLUSIONS

Dans le but de la caractérisation physique du béton par radar, une banque de données expérimentale a été constituée en laboratoire reliant des observables des signaux radar à des caractéristiques physiques des bétons. Ces résultats montrent clairement que l'atténuation et la position temporelle des signaux radar sont fortement influencées par la teneur en eau volumique des bétons. En outre, les chlorures participent de façon très significative à la variation de l'atténuation des signaux radar. La position temporelle du signal réfléchi ne dépend pas de la teneur en chlorures, ce qui indiquerait que la vitesse de propagation n'est pas affectée. La position temporelle du signal direct est faiblement influencée. Cependant, elle ne peut être prise comme un paramètre fiable car sa dispersion statistique est très importante.

La technique des réseaux de neurones artificiels a été choisie comme modèle statistique, appliqué à l'inversion des résultats expérimentaux, du fait de sa parcimonie et de sa rapidité. Deux modèles ont été mis en œuvre de façon à relier des observables radars aux teneurs en eau et en chlorures. En fin d'apprentissage, les modèles mis en place ont été jugés satisfaisants mais peuvent être encore optimisés. Ces modèles permettent de prédire la teneur en eau des bétons avec un écart absolu de ± 2% et la teneur en chlorures avec un écart absolu de ± 0,5 kg/m^3.

8. PERSPECTIVES

Bien que les modèles développés présentent une précision acceptable, il est toutefois intéressant d'améliorer leur performance par optimisation de l'architecture ou modification de l'algorithme d'apprentissage. Il faudra aussi intégrer les variabilités liées à la profondeur du réflecteur et à sa géométrie. Cela permettra un apprentissage de reconnaissance automatique des formes (ex : armatures) et l'estimation de leurs profondeurs. Enfin, cette approche statistique de l'inversion des données d'auscultation par RNA ouvre des perspectives en matière de couplage de méthodes non destructives (radar, résistivité électrique, ultrasons…). Elle peut être envisagée dans le but de développer un système expert apte à évaluer le risque pathologique lié à une structure en béton.

9. REFERENCES

AFPC-AFREM. (1997), « Méthodes recommandées pour la mesure des grandeurs associées à la durabilité - Détermination de la teneur en chlorures » *Compte rendu des journées techniques AFPC-AFREM, durabilité des bétons*, 11 et 12 décembre, LMDC, INSA-UPS, Toulouse, France, p. 159-167.

Dreyfus G., Martinez J.-M., Samuelides M., Gordon M. B., Badran F., Thiria S., Hérault L. (Edition 2, 2004), « *Réseaux de neurones, Méthodologie et applications* » Edition Eyrolles.

Jodouin J-F (1994), « *Les réseaux de neurones* ». Edition Hermès, Paris.

Klysz G. (2004) « Caractérisation du béton d'enrobage par technique radar : exploitation de l'onde directe émetteur-récepteur » *Thèse de doctorat*, Université Paul Sabatier – Toulouse III.

Laurens S., Balayssac J.-P., Rhazi J., Arliguie G. (2002), « Influence of concrete moisture upon radar waveform » *RILEM Materials and Structures*, V. 35, p. 198-203.

Robert A. (1998), « Dielectric permittivity of concrete between 50 Mhz and 1 Ghz and GPR measurements for building materials evaluation » *Journal of Applied Geophysics*, V.40, p. 89-94.

Sbartaï Z. M., Laurens S., Balayssac J.-P., Arliguie G., Ballivy G. (2005) « Ability of radar ground-coupled antenna for NDT of concrete structures » *NDT&E International*, Article in pres.