



Partie 4 – Traitement de l'information

VERS UNE OPTIMISATION DU DIAGNOSTIC DES OUVRAGES EN BÉTON ARMÉ – APPOINT DE L'ÉTUDE DE LA VARIABILITÉ SPATIALE DES MESURES NON DESTRUCTIVES

**OPTIMIZING THE DIAGNOSIS OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES –
CONTRIBUTION OF THE STUDY OF THE SPATIAL VARIABILITY OF NON-DESTRUCTIVE
MEASUREMENTS**

N.T NGUYEN^{(a)*}, Z.M SBARTAI^(a), J-F LATASTE^(a), D BREYSSE^(a), F BOS^(a)

a. Université de Bordeaux, I2M – GCE, CNRS UMR 5295, 33405 Talence Cedex, France

* N.T NGUYEN : ngoc-tan.nguyen@u-bordeaux.fr

RÉSUMÉ

Les travaux présentés contribuent à l'évaluation de la variabilité spatiale des structures en béton armé. Ils reposent sur des séries de mesures sur un site-test (en laboratoire), et sur un ouvrage. Les techniques de contrôle non destructif (CND) considérées sont choisies parmi les plus complémentaires : ultrasons, résistivité électrique, radar et rebond. En laboratoire, le site-test est constitué de cinq dalles ($2 \times 2.45 \times 0.2 \text{ m}^3$) en béton armé. Dans le cadre du projet national ACDC-C2D2, des mesures de CND ont été également effectuées sur les piles d'un passage inférieur d'autoroute (pont de Marly – 59). Les données mesurées ont été analysées par des outils statistiques et géostatistiques. Les variabilités ont été quantifiées à différentes échelles (répétabilité, locale et globale) et pour différents bétons de laboratoire et d'ouvrage. La corrélation spatiale des données a été également étudiée. Les premiers résultats montrent qu'il existe des longueurs de corrélation qui dépendent de la propriété mesurée ainsi que du béton de l'ouvrage ausculté.

ABSTRACT

The work presented contributes for assessing spatial variability of reinforced concrete structures using non-destructive testing (NDT) techniques: ultrasonic, electrical resistivity, radar and rebound hammer. NDT measurements were carried out on a testing site (in laboratory) and on an existing structure. In the laboratory, a series of measurements was performed on five reinforced concrete slabs ($2 \times 2.45 \times 0.2 \text{ m}^3$). Within the framework of the ACDC-C2D2 French project, NDT measurements were carried out on the piers of a highway bridge (Marly bridge – 59). The experimental data was analyzed using statistical and geostatistical tools. The variability was quantified at different scales (repeatability, local, global) for both laboratory and on-site concretes. The spatial correlation of the NDT data was also studied. The results show that the correlation lengths identified depend on the measured property and the concrete of the structure inspected.

Mots-clés : Béton armé, CND, Variabilité spatiale, Corrélation spatiale, Variogramme, Krigeage



1. INTRODUCTION

La variabilité spatiale des propriétés du béton est une caractéristique importante dont la connaissance peut contribuer à localiser spatialement les zones de faiblesse dans les éléments d'une structure. Elle permet également d'envisager des analyses fiabilistes pour une qualification plus réaliste de l'ouvrage. Elle résulte de la variabilité intrinsèque du matériau (comme la taille et la nature des granulats), de l'effet de la mise en œuvre, et des conditions environnementales (température et humidité ambiantes). Théoriquement, il est possible d'évaluer la variabilité spatiale du béton en utilisant des essais destructifs sur prélèvements. Cependant, cela est difficile voire impossible dans certaines situations (ex. centrale nucléaire). De plus, en raison du grand nombre des prélèvements, c'est généralement une approche rejetée. C'est pourquoi les techniques de contrôle non destructif (CND) sont considérées comme des outils potentiels, s'adaptant aux contraintes pratiques (ex. budget modéré, répétition) pour l'évaluation de la variabilité spatiale et des propriétés du béton [1]. Dans le cadre des projets de recherche nationaux SENSO [2] et APPLET [3], certaines techniques de CND ont été utilisées pour évaluer la variabilité des bétons. Toutefois, la plupart de ces études ont été réalisées sur des éprouvettes en laboratoire. La variabilité spatiale est rarement évaluée sur ouvrages réels.

L'évaluation de la variabilité se limite d'une part à l'estimation de la dispersion des mesures. Une propriété du béton est considérée comme une variable aléatoire. Elle est caractérisée en utilisant certains points de mesure qui sont répartis aléatoirement sur l'élément étudié. Les valeurs mesurées sont considérées comme des variables aléatoires indépendantes. La variabilité spatiale est donc statistiquement quantifiée sous forme d'un écart-type (ou d'un coefficient de variation) des mesures. Les études récentes montrent que la structuration spatiale des propriétés peut influencer la fiabilité de la structure [4]. L'existence d'une structuration spatiale signifie que les propriétés du béton sont considérées dépendantes spatialement, c'est-à-dire que la différence de deux valeurs mesurées est d'autant plus faible que les deux points sont proches. Dans ce cas, la variabilité spatiale est basée sur l'évaluation de la variance des mesures à différentes distances, en particulier à une distance spécifique appelée *longueur de corrélation*. Certaines longueurs de corrélations ont été identifiées pour la porosité du béton [5], la teneur en chlorure de surface et le coefficient de diffusion apparente [6].

Dans cette étude, la méthodologie consiste en des analyses statistiques et géostatistiques pour quantifier la variabilité spatiale des mesures CND, et identifier les longueurs de corrélation, afin d'estimer le nombre nécessaire de mesures, permettant ainsi d'optimiser la stratégie d'inspection. La méthodologie a été développée sur des séries de mesures sur des dalles d'un site test exposé en conditions atmosphériques réelles, puis appliquée sur un ouvrage réel pour en tester l'applicabilité.

2. ÉVALUATION DE LA VARIABILITÉ SPATIALE DES BÉTONS SUR SITE TEST

2.1. Programme d'expérimentation : site test et mesures non destructives

Un programme expérimental a été mis en œuvre sur un site test constitué de cinq dalles de dimensions 2.45x2.0x0.2 m³ en béton armé. Les dalles ont été coulées avec des bétons fournis par une centrale à béton industriel, de résistance en compression visée à 28 jours de 25 à 45 MPa. La maille d'armatures est de 45x45 cm². Une maille représente une zone de base pour l'analyse de la variabilité. Deux dalles (D2 et D3) ont été fabriquées avec le même béton pour évaluer la variabilité du matériau au sein d'une gâchée. Pour chaque gâchée, 12 éprouvettes cubiques de 15x15x15 cm³ ont été fabriquées et conservées dans les mêmes conditions environnementales extérieures que les dalles. Ces éprouvettes sont utilisées pour des essais destructifs comme la résistance à la compression, la teneur en eau, la porosité et la densité.

Les techniques de CND sont choisies au préalable parmi les plus usuelles dans les bureaux d'étude : ultrasons, résistivité électrique, radar et rebond. La vitesse ultrasonore et le rebond sont largement utilisés pour estimer les propriétés mécaniques du béton telles que la résistance à la compression, le module d'élasticité [1,7]. Les techniques de résistivité électrique et radar sont sensibles à la porosité [8], aux teneurs en eau [9] et en chlorures [10,11] des bétons. L'usage simultané de ces techniques peut donner une évaluation efficace de la variabilité spatiale des bétons. Les protocoles de mesures sont détaillés pour chacune des quatre techniques utilisées comme suit :

- (1) Radar (Ground Penetrating Radar) : les profils radars ont été établis à l'aide d'un équipement GSSI SIR3000, d'une antenne couplée (E-R) de 2.6 GHz de fréquence. L'analyse a consisté à extraire l'amplitude du pic positif du signal direct E-R obtenue le long d'un profil sur la zone [12].
- (2) Résistivité électrique : les résultats sont donnés en termes de résistivité apparente, en utilisant un quadripôle de section carrée, composé de quatre électrodes [13]. Dans cette étude, la résistivité électrique est mesurée pour un écartement entre électrodes de 5cm. Sur dalles, neuf mesures ont été effectuées avec un écartement régulier de 10 cm dans chaque zone de mesure.
- (3) Ultrasons : un système composé d'un générateur d'impulsion et d'un dispositif développé en laboratoire permet de propager les ondes ultrasonores en mode de transmission indirecte. La vitesse est mesurée pour une distance fixée de 7 cm entre émetteur et récepteur de 200 KHz de fréquence. Sur dalles, les positions de mesures sont les mêmes que pour la résistivité électrique.
- (4) Rebond : sur dalle, trente-six mesures ont été effectuées avec un écartement régulier de 5 cm dans chaque zone de mesure.



2.2. Quantification de la variabilité spatiale des mesures de CND

Dans cette étude, la variabilité des bétons est quantifiée par la variabilité des mesures de CND à différentes échelles : variabilité locale sur une zone d'une maille d'armatures $45 \times 45 \text{ cm}^2$, variabilité globale à l'échelle de la dalle $2 \times 2.45 \text{ m}^2$. Pour chacun des observables, le coefficient de variation (cv en %) des mesures est calculé en considérant :

- la variabilité locale moyenne (\bar{V}_L) qui représente la moyenne des 15 zones ;
- la variabilité globale (V_g) de l'ensemble des mesures effectuées sur chaque dalle.

En ce qui concerne la variabilité globale V_g de chacune des cinq dalles, les valeurs de cv varient de 2.8 à 5.1% pour la vitesse ultrasonore, de 7.2 à 8.6% pour le rebond et de 4.7 à 10.3% pour l'amplitude radar. La résistivité électrique est plus variable, de l'ordre de 5.1 à 20.8%. Sur les dalles D2 et D3, les cv de la résistivité électrique sont très différents pour une même composition de béton (20.8% et 12.2%). Cette différence peut être expliquée par une forte variation de l'humidité en surface du béton. Les valeurs de cv sont généralement plus faibles pour la dalle D5 qui présentait la plus grande résistance en compression et donc une plus faible porosité. Les valeurs intermédiaires de cv sont identifiées pour la dalle D1 qui présentait la plus faible résistance à la compression. Pour cette raison la dalle D1 a été choisie pour une analyse plus approfondie de la variabilité spatiale dans les paragraphes suivants. Pour tous les observables, la variabilité globale V_g sur dalles est plus élevée que la moyenne des variabilités locales V_L dans les zones auscultées. Les valeurs représentatives de V_L sont de l'ordre de 2.5 à 4.3% pour la vitesse ultrasonore indirecte, de 3.7 à 7.2% pour la résistivité électrique, de 3.7 à 5.7% pour l'amplitude radar, et de 6.7 à 8.4% pour le rebond. Cette différence signifie que les techniques CND sont aptes à

distinguer, en dépit des bruits de mesures, une variabilité propre au matériau. Pour le rebond, une faible différence entre les deux échelles locale et globale indique que cette technique présente un bruit élevé des mesures, qui peut nuire à l'identification de la variabilité intrinsèque.

2.3. Corrélation spatiale des mesures de CND

Dans cette partie, les propriétés du béton sont considérées comme étant dépendantes spatialement. Le variogramme est un outil pratique pour estimer la variabilité spatiale d'un phénomène naturel. La plupart des algorithmes d'estimation géostatistique nécessitent un modèle analytique qui peut être déduit du variogramme expérimental en utilisant par exemple la méthode des moindres carrés [14]. Le variogramme expérimental est calculé par l'équation 1, avec N est le nombre de paires dont les points de mesure sont espacés d'une distance h , Z est la valeur mesurée en point x sur l'élément étudié.

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{h=1}^{N(h)} [Z(x) - Z(x+h)]^2 \quad (1)$$

Les variogrammes expérimentaux sont illustrés dans la figure 1 pour la vitesse ultrasonore indirecte et la résistivité électrique de la dalle D1. Ces variogrammes ont été construits pour une distance maximale de 100 cm qui correspond à la moitié de la largeur de la dalle. Sur le même graphique, la courbe du modèle de variogramme est également tracée en ajustant les valeurs expérimentales.

Lors de l'analyse variographique, trois caractéristiques principales sont souvent considérées : la portée, le plateau et l'effet de pépite. Pour une meilleure compréhension, rappelons que la portée est la distance à partir de laquelle les valeurs mesurées sont indépendantes (pas corrélées).

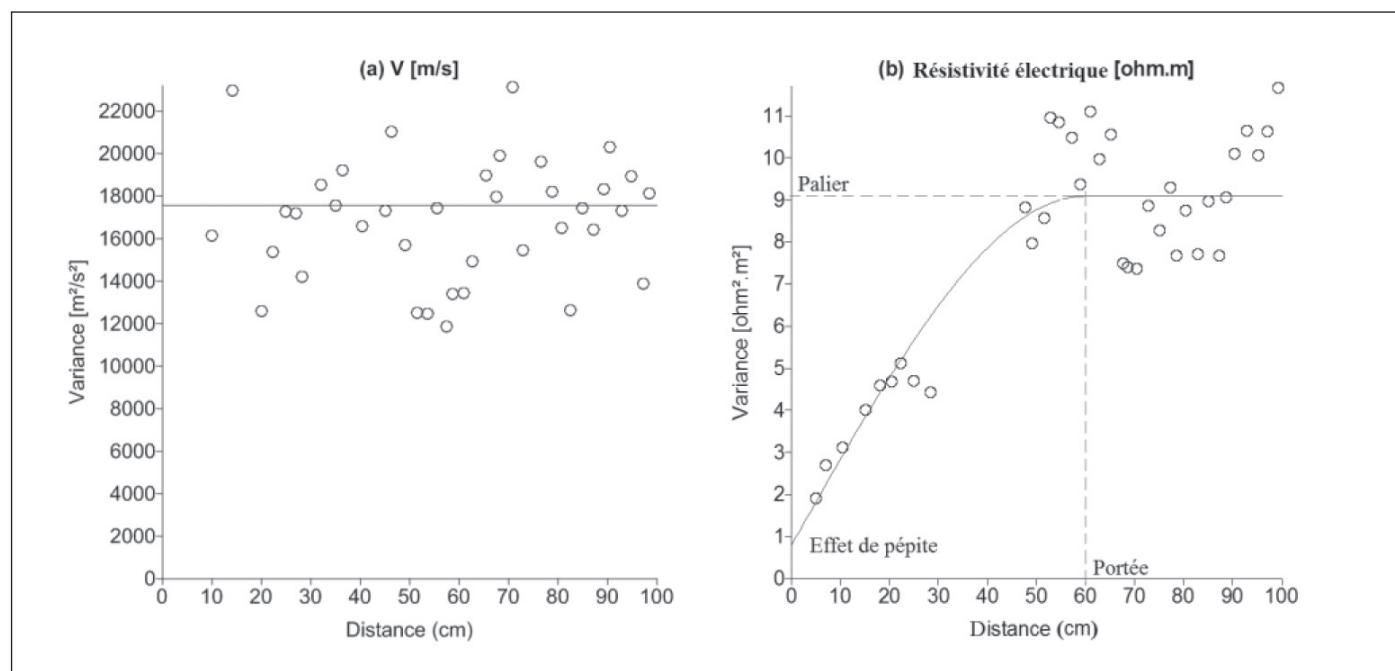


Figure 1 : Variogrammes expérimentaux et modèles d'ajustement (cas de la dalle D1)



Au-delà, la valeur du variogramme correspond à la variance de la variable aléatoire. La portée est ici définie comme la *longueur de corrélation* de l'observable CND. Le palier est la variance de l'observable étudié lorsque la distance atteint la portée. L'effet de pépite représente la variation entre deux mesures infiniment proches. Elle est due soit à l'existence d'une variabilité intrinsèque à plus petite échelle, soit à l'imparfaite répétabilité des mesures. Le variogramme expérimental de la vitesse ultrasonore indirecte (Fig. 1a) montre que les mesures sont indépendantes. L'effet de pépite est égal à $17570 \text{ m}^2/\text{s}^2$. Il indique que dans ce cas la variabilité locale des vitesses mesurées est de l'ordre de 133 m/s pour des distances de moins de 10 cm. Le variogramme expérimental de résistivité électrique (Fig. 1b) peut être ajusté par un modèle sphérique avec une portée spécifique de 60 cm et un palier de $9.1 \Omega^2 \cdot \text{m}^2$. On peut en déduire un écart type de 3 $\Omega \cdot \text{m}$ des mesures à l'échelle globale. L'effet de pépite est égal à $0.8 \Omega^2 \cdot \text{m}^2$ qui correspond à un écart type de 0.9 $\Omega \cdot \text{m}$ pour la résistivité électrique pour des distances de moins de 5 cm. Les premiers points de ce variogramme indiquent une forte corrélation entre mesures jusqu'à la portée. Concernant la mesure de rebond, les résultats montrent une quasi-indépendance des mesures comparable à celui des mesures ultrasonores. La résistance mécanique de cette dalle semble donc distribuée aléatoirement dans l'espace avec une faible variabilité. Cependant, le radar montre une dépendance spatiale des mesures identique à celle de la résistivité électrique avec un palier de l'ordre de 60 cm. Compte-tenu du fait que les deux techniques radar et résistivité sont sensibles à l'humidité des bétons, nous pouvons supposer une structuration dans la distribution spatiale de l'humidité dans cette dalle.

2.4. Estimation du nombre minimal de mesures

En pratique, le nombre de mesures doit assurer la fiabilité de l'auscultation non destructive en considérant des contraintes du budget et du temps. Le nombre minimal peut être estimé pour un niveau de précision visé en se basant sur des valeurs de cv correspondant à chaque investigation spécifique [1,13]. Dans cette étude, il a été estimé en utilisant la théorie statistique et les longueurs de corrélations identifiées (§ 2.3).

Supposons qu'une série de mesures (x_1, \dots, x_n) est un ensemble de variables aléatoires présentant une distribution normale avec une moyenne inconnue μ et une variance inconnue σ^2 , l'intervalle de confiance de la moyenne avec $100(1 - \alpha)$ pourcents de confiance est décrit comme suit :

$$\mu \in \left[\bar{x} - t_{1-\alpha/2, n-1} \frac{s}{\sqrt{n-1}}, \bar{x} + t_{1-\alpha/2, n-1} \frac{s}{\sqrt{n-1}} \right] \quad (2)$$

où \bar{x} est la valeur moyenne mesurée, s est l'écart type des mesures, n est le nombre de mesures, $t_{1-\alpha/2}$ est un paramètre statistique obtenu par la loi t -distribution (loi de Student). Dans le cas où une longueur de corrélation a été identifiée, seules les mesures indépendantes sont utilisées pour le calcul du nombre minimal de mesures (ex. les mesures dis-

tantes d'au moins 60 cm pour la résistivité électrique et le radar sur la dalle D1). Ce nombre de mesures est évalué en estimant la moyenne des valeurs mesurées (spatialement indépendantes) avec une précision de ε pourcent avec la relation suivante :

$$t_{1-\alpha/2, n-1} \frac{cv}{\sqrt{n-1}} \leq \varepsilon \Rightarrow n \geq \left(t_{1-\alpha/2, n-1} \frac{cv}{\varepsilon} \right)^2 + 1 \quad (3)$$

avec, cv en %, est le coefficient de variation d'une série des mesures indépendantes.

Pour une précision de 5% en considérant 95% de l'intervalle de confiance de la moyenne, le nombre minimal de mesures a été calculé pour chaque technique (Tableau 1). À l'échelle locale, le nombre minimal de mesures est de 4 pour la vitesse ultrasonore indirecte, 6 pour la résistivité électrique, 4 pour le radar et 9 pour le rebond. À l'échelle globale, il augmente respectivement jusqu'à 12 et 6 mesures pour la résistivité électrique et le radar. Le nombre minimal de mesures a très légèrement changé entre deux échelles locale et globale pour la vitesse ultrasonore indirecte et le rebond, car leurs cv étaient quasiment identiques entre deux échelles étudiées de la dalle D1. Ces résultats sont utilisés en considérant les mesures effectuées comme les variables indépendantes.

Technique	cv_{V_L} (%)	cv_{V_G} (%)	n_{V_L}	n_{V_G}
Ultrasons	3.3	4.2	4	4
Résistivité	5.1	8.4	6	12
Rebond	6.7	7.2	9	10
GPR	3.7	5.6	4	6

Tableau 1 : cv des techniques de CND et le nombre minimal de mesures à différentes échelles

Dans le cas où il existe une corrélation spatiale des mesures à l'échelle globale, les points de mesure peuvent être positionnés avec un écartement (pas d'échantillonnage) au-delà de la longueur de corrélation afin d'optimiser la stratégie d'auscultation. Par exemple, dans le cas de la dalle D1, 12 mesures de résistivité électrique peuvent être réalisées avec un écartement minimal de 60 cm. Par conséquence, cette approche permet d'étudier une surface la plus large possible en réduisant le nombre des mesures tout en maintenant la qualité d'estimation, soit pour la moyenne des propriétés du béton, soit pour leur variabilité spatiale.

3. ÉVALUATION DE LA VARIABILITÉ SPATIALE DU BÉTON SUR OUVRAGE

Dans le projet national ACDC-C2D2, un pont autoroutier sous l'A2 a été retenu pour être ausculté par des techniques non destructives. Il est situé sur la commune de Marly proche de Valenciennes (59 - France). Il est constitué de trois ponts parallèles orientés Est-Ouest s'appuyant sur 16 piles. Les ponts sud et central ont trois piles de 1.72 m de largeur à la base et de 2.9 m de largeur à 6 m de haut. Le pont nord a deux piles de 3 m de largeur à la base et 4.35

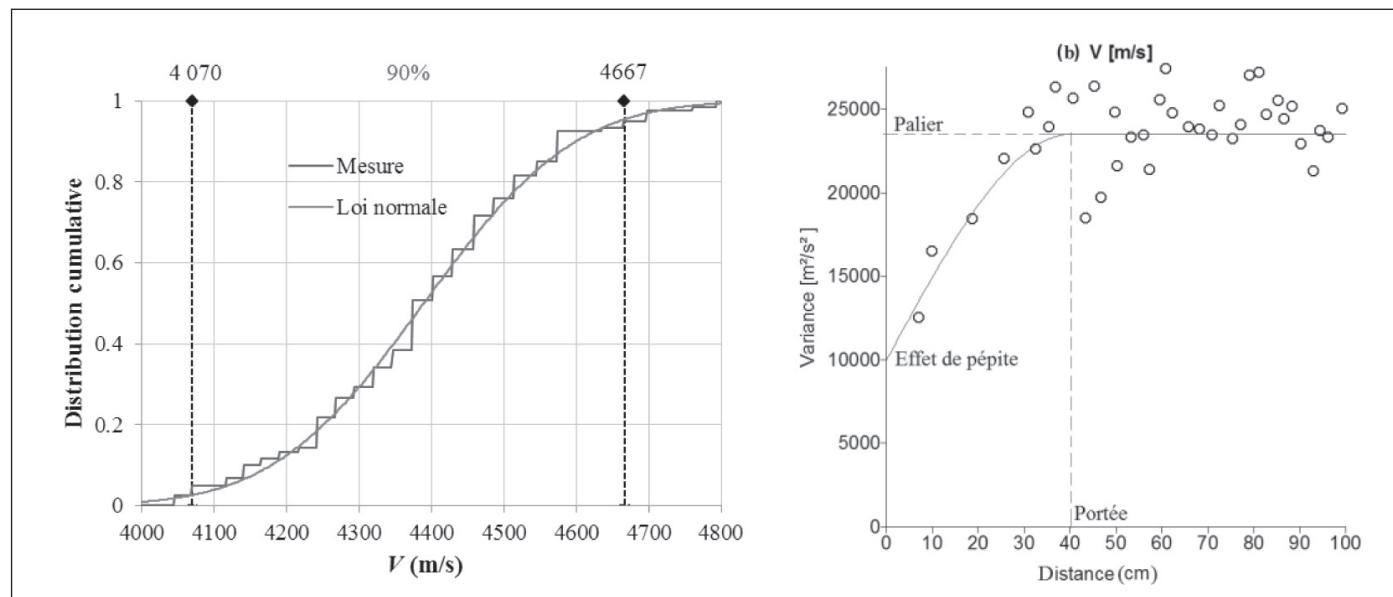


Figure 2 : (a) Distribution cumulative et (b) variogramme de vitesse ultrasonore indirecte

m de largeur à 6 m de haut. L'épaisseur des piles est de 50 cm. La travée principale est de 14.5 m.

3.1. Variabilité spatiale des mesures de CND

Dans cette partie, l'analyse se limite aux mesures de vitesse ultrasonore indirecte et au rebond afin d'évaluer la résistance en compression du béton. La variabilité spatiale a été évaluée dans une zone de 200x100 cm² sur une pile. Cette pile a été identifiée par une pré-auscultation comme la plus contrastée parmi toutes les piles. Les mailles d'armatures sont repérées à l'avance par radar et leur taille moyenne est de 25x25 cm². Basées sur la méthodologie du laboratoire, quatre mesures de vitesse ultrasonore avec un écartement régulier de 7 cm, et douze mesures de rebond avec un écartement régulier de 5 cm ont été effectuées dans chaque maille. On obtient donc au total 120 valeurs mesurées de vitesse et 288 valeurs mesurées de rebond.

En première étape, l'analyse statistique montre que 90% des mesures sont comprises entre 4070 à 4667 m/s pour la vitesse (Figure 2a), et entre 44 à 55 pour le rebond. Les valeurs de *cv* sont égales à 3.7% correspondant à une moyenne de 4389 m/s pour la vitesse, et à 7.2% correspondant à une moyenne de 50.4 pour le rebond. Le test d'ajustement (ex. test du chi-deux, test de Kolmogorov-Smirnov, test d'Anderson-Darling) permet de justifier la loi normale pour les deux observables étudiés.

Figure 2 : (a) Distribution cumulative et (b) variogramme de vitesse ultrasonore indirecte

3.2. Corrélation spatiale des mesures de CND

En deuxième étape, la corrélation spatiale de CND est étudiée en utilisant la méthodologie présentée dans le para-

graphe 2.3. Le variogramme expérimental de la vitesse ultrasonore est illustré dans la figure 2b, avec une distance maximale de 100 cm correspondant à la moitié de la largeur de la zone auscultée. Ce variogramme peut être ajusté par un modèle sphérique, avec une portée spécifique (*longueur de corrélation*) de 40 cm et un palier de 23500 m²/s². On peut en déduire un écart-type de 153 m/s, qui quantifie la variabilité globale des vitesses. L'effet de pépite est égal à 10000 m²/s². Cette valeur qui représente la variabilité locale des vitesses est de l'ordre de 100 m/s pour une distance inférieure à 7 cm.

En comparant avec les résultats obtenus en laboratoire, la différence principale est que des corrélations spatiales sont identifiées sur l'ouvrage, y compris pour la vitesse ultrasonore indirecte avec un effet de pépite qui est de l'ordre de la moitié du palier. La longueur de corrélation est de l'ordre de 40-60 cm pour les deux observables étudiés (vitesse, rebond). Cette distance est une information importante, car on peut en déduire une distance optimisée d'échantillonnage, de manière à considérer les variables de mesure statistiquement indépendantes. Si l'on utilise cette distance et les valeurs de *cv*, le nombre de mesures retenu est au moins 6 pour une zone d'auscultation de 2x1 m². Dans le cas de la pile auscultée, trois mesures par m² peuvent être réalisées en fournissant une précision de 2% sur la valeur moyenne estimée.

En troisième étape, la méthode de krigage a été utilisée, s'appuyant sur un processus d'interpolation spatiale pour établir deux cartes de vitesse ultrasonore indirecte et de rebond (Figure 3). Les deux cartes présentent une différence significative entre les parties gauche et droite de la zone auscultée. Elles mettent en évidence la variabilité spatiale du matériau. La vitesse et le rebond sont significativement sensibles à la résistance en compression du béton. Il est donc plausible que la résistance de surface de la partie gauche est plus forte que la partie droite. Ces cartes peuvent servir à localiser les zones de prélèvement pour les essais destructifs.

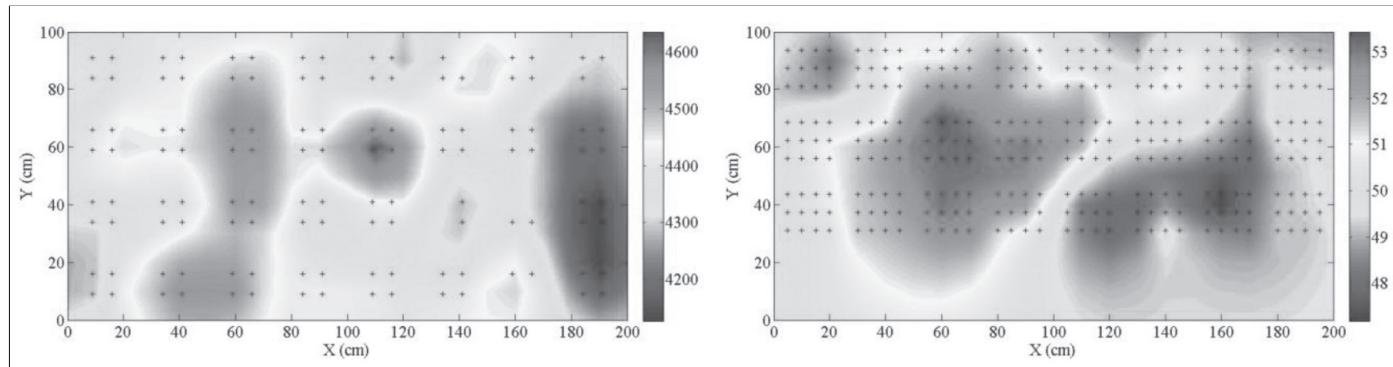


Figure 3 : Cartes reconstruites par krigage (a) de la vitesse ultrasonore indirecte en m/s et (b) du rebond

4. CONCLUSIONS

Les variabilités spatiales de CND offrent deux possibilités : (i) l'évaluation de la variation des propriétés mécaniques (ex. résistance) ou physiques (ex. teneur en eau, porosité) des bétons ; (ii) l'optimisation du nombre de mesures pour un niveau de confiance donné pour chaque investigation spécifique. La méthodologie de laboratoire a été appliquée sur les piles du pont de Marly, près de Valenciennes, France. Des longueurs de corrélation ont été identifiées sur dalles d'un site test et sur ouvrage (40 à 60 cm) pour la résistivité électrique, la vitesse ultrasonore indirecte, le rebond et l'amplitude radar. Ces distances peuvent être utilisées pour optimiser la stratégie d'échantillonnage sur ouvrages de grandes dimensions, de manière à considérer les variables de mesure statistiquement indépendantes (mesures à des distances supérieures à 60 cm par exemple dans le cas des mesures effectuées sur le site test et sur le pont de Marly).

RÉFÉRENCES

- [1] Breysse D., Nondestructive evaluation of concrete strength: An historical review and a new perspective by combining NDT methods. *Construction and Building Materials* 33 (2012) 139–163.
- [2] Balayssac J-P. et al., Description of the general outlines of the French project SENSO – Quality assessment and limits of different NDT methods. *Const. and Building Materials* 35 (2012) 131–138.
- [3] Aït-Mokhtar A. et al., Experimental investigation of the variability of concrete durability properties. *Cement and Concrete Research* 45 (2013) 21–36.
- [4] Stewart M.G., Suo Q., Extent of spatially variable corrosion damage as an indicator of strength and time-dependent reliability of RC beams. *Engineering Structures* 31 (2009) 198–207.
- [5] de Larrard T. et al., Caractérisation expérimentale de la variabilité spatiale des propriétés d'un béton : Identification des longueurs de corrélation et recherche de corrélations entre indicateurs de durabilité. *JFMS2012*, Chambéry - France, 4-6 juin 2012.
- [6] O'Connor A.J., Kenshul O., Experimental evaluation of the scale of fluctuation for spatial variability modeling of the chloride-induced reinforced concrete corrosion. *Journal of Bridge Engi.* 18 (2013) 3-14.
- [7] Benmeddour F., Villain G., Abraham O., Choinska M., Development of an ultrasonic experimental device to characterise concrete for structural repair. *Constr. Build. Mater.* 37 (2012) 934–942.
- [8] Tumidajski P.J. et al., On the relationship between porosity and electrical resistivity in cementitious systems. *Cement and Concrete Research*, Vol. 26, Issue 4, 1996, p. 539–544.
- [9] Klysz G., Balayssac J-P., Determination of volumetric water content of concrete using ground-penetrating radar. *Cement and Concrete Research*, Vol. 37, Issue 8, 2007, p. 1164–1171.
- [10] Saleem M. et al., Effect of moisture, chloride and sulphate contamination on the electrical resistivity of Portland cement concrete. *Construction and Building Materials*, Vol. 10, Issue 3, 1996, 209–214.
- [11] Sbartaï Z.M. et al., Using radar direct wave for concrete condition assessment: Correlation with electrical resistivity. *Journal of Applied Geophysics* 62 (2007) 361–374.
- [12] Laurens S., El Barrak M., Balayssac J-P., Rhazi J., Aptitude of the near-field direct wave of ground-coupled radar antennas for characterisation of the covercrete. *Constr Build Mater* 2007; 21:2072–7.
- [13] Lataste J-F., Breysse D., A Study on the variability of electrical resistivity of concrete. *Nondestructive Testing of Materials and Structures*, RILEM 2012, 255–262.
- [14] Gringarten E., Deutsch C.V., Variogram Interpretation and Modeling. *Mathematical Geology*, Vol. 33, No.44, 2001, p. 507–534.