

## Partie 4 – Traitement de l'information

# OPTIMISATION DU NOMBRE D'ESSAIS POUR L'AUSCULTATION D'UN OUVRAGE D'ART

## OPTIMIZATION OF THE NUMBER OF MEASUREMENTS FOR THE DIAGNOSIS OF CONCRETE STRUCTURES

**C. GOMEZ-CARDENAS<sup>(a\*)</sup>, D. MARTINI<sup>(c)</sup>, Z.M. SBARTAI<sup>(a)</sup>,  
J.P. BALAYSSAC<sup>(b)</sup>, V. GARNIER<sup>(c)</sup>, D. BREYSSE<sup>(a)</sup>**

a. Institut de Mécanique et d'Ingénierie (I2M), dpt GCE. Université Bordeaux 1, CNRS, INRA.  
351 cours de la libération, 33405 TALENCE Cedex

b. Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions (LMDC). INSA-UPS, INSA-GENIE CIVIL.  
135 Av. de Rangueil, 31077 TOULOUSE Cedex

c. Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique. Laboratoire de Contrôle Non Destructive (LMA-LCND).  
Avenue Gaston Berger, 13625 AIX EN PROVENCE Cedex 1

\* auteur correspondant : gomezcar@insa-toulouse.fr

### RÉSUMÉ

*Les techniques de Contrôle Non Destructif (CND) sont incontournables pour ausculter les ouvrages afin d'évaluer les propriétés du béton ou de détecter des anomalies (fissures, pathologies, etc). En raison de contraintes budgétaires, une méthodologie optimale pour évaluer l'intégrité de l'ouvrage à moindre coût est donc nécessaire. Des Essais Destructifs (ED) pourront être nécessaires pour corroborer les informations obtenues par le CND. Cet article présente un moyen efficace de positionner les carottes à prélever en faisant une optimisation spatiale de deux propriétés du béton: résistance à la compression et degré de saturation. Ils ont été obtenus après la fusion de trois techniques d'essais non destructifs (méthode capacitive, ultrasons et impact écho). Cette optimisation spatiale est effectuée par la méthode d'optimisation de l'échantillonnage spatial (OSSM) et elle est fondée sur*

*les propriétés de la corrélation spatiale. Il a été utilisée une approche multi-objectif afin d'obtenir simultanément la meilleure information possible des deux propriétés ainsi qu'une approche systématique pour un nombre limité de mesures et de carottes à prélever. Des résultats sur un mur d'une centrale thermique au Havre - France sont présentés.*

### ABSTRACT

*Non-destructive testing techniques (NDT) are essential to investigate structures in order to assess properties or detect anomalies (cracks, pathologies, etc.) in the concrete. Due to budget limitations, an optimal methodology to estimate the integrity of a structure with a minimum cost is required. Destructive tests (DT) would eventually be necessary to corroborate the information obtained by*

*NDT. This paper presents an efficient way to place the cores to extract by doing a spatial optimization of two concrete properties: Compressive strength and saturation degree. They were obtained after the fusion of three NDT techniques (capacitive method, ultrasound and impact echo). This spatial optimisation is made by the optimisation spatial sampling method (OSSM) and is based on the properties spatial correlation. It was used a multi-objective approach due of the interest in obtaining the best information possible of the two properties at the same time and also a systematic approach for a small number of cores to extract. Some results on a thermal power plant wall in Le-Havre – France will be presented.*

**Mots-clés :** CND, surveillance, structure béton, optimisation, variabilité spatiale.

**Keywords:** NDT, monitoring, concrete structure, optimization, spatial variability.

\*\*\*

## 1. INTRODUCTION

Les techniques de contrôle non destructif (CND) sont utilisées pour détecter des anomalies, mais elles sont également essentielles pour estimer les propriétés mécaniques d'une structure en béton et leur variabilité spatiale. Le CND constitue un outil puissant pour réduire le budget d'auscultation d'un ouvrage d'art. La démarche proposée est incluse dans un projet national dont l'objectif est d'optimiser le suivi des ouvrages de Génie Civil en mettant en œuvre une maintenance préventive afin de réduire les coûts. L'approche intègre l'utilisation de modèles probabilistes pour prévoir l'évolution de la structure entre deux campagnes d'auscultation. Les données d'entrée des modèles fournies par CND ou par des essais destructifs (ED) doivent donc être optimisées afin de réduire autant que possible les durées d'essais et donc de minimiser les coûts.

Dans le cas de la présente étude, des techniques rapides permettent d'obtenir lors d'une pré-auscultation une vue d'ensemble de la distribution spatiale pour une propriété particulière du béton (résistance mécanique, porosité, humidité, etc.) Ensuite, une étude complémentaire avec des techniques de qualité supérieure peut être réalisée dans les zones critiques. Elles sont sensibles aux mêmes propriétés mais sont souvent de mise en œuvre et d'exploitation longue. Cette approche permet une caractérisation efficace de la propriété en s'appuyant sur les apports des deux types de CND et ceci en limitant le coût.

Néanmoins, pour rentabiliser au maximum une technique de CND de haute qualité dans une structure déjà pré-auscultée, il est impératif d'utiliser aussi un échantillonnage spatial optimal pour réduire le nombre de points d'auscultation. Dans ce but, l'algorithme le plus couramment employé est le recuit simulé spatial (SSA) [7]. Même si cette procédure est régulièrement exploitée dans les

applications géostatistiques [3], elle a été largement utilisée dans d'autres domaines tels que les rejets radioactifs [4], l'étude des écosystèmes [6], etc. Dans ce travail, une optimisation de la méthode d'échantillonnage spatial originale (OSSM) inspirée par le SSA a été testée avec une approche multi-objectif de deux fonctions « objectif » différentes: l'erreur de prédiction moyenne et la variance de l'erreur d'estimation. La performance de cet OSSM multi-objectifs a été explorée avec des mesures non destructives prises sur un mur d'une centrale thermique située au Havre - France.

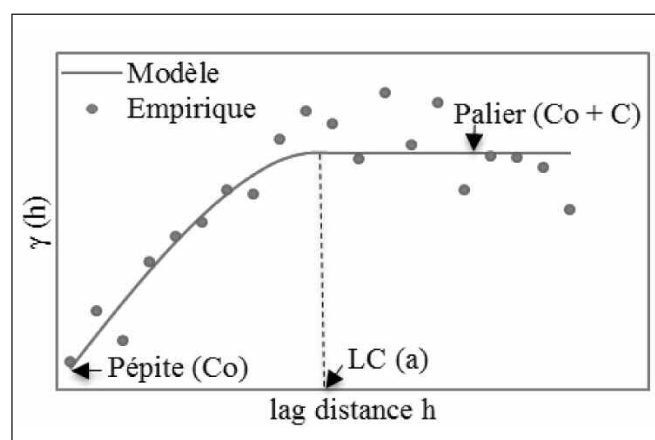
## 2. MÉTHODES ET MATÉRIAUX

### 2.1. Variabilité et interpolation spatiale

L'hétérogénéité du béton implique une variabilité spatiale du matériau qui est constatée lors de l'auscultation. Cependant, la plupart du temps, on peut dire que pour un nombre de mesures distribuées sur une surface, celles qui sont proches en distance auront une certaine similitude en résultat, tandis que les plus éloignées seront différentes. Cette dépendance spatiale peut être représentée sous la forme d'une fonction statistique connue sous le nom de variogramme [1].

Chaque variogramme empirique peut être modélisé par la méthode des moindres carrés pour obtenir des paramètres utilisés ultérieurement dans les matrices nécessaires au krigeage. La figure 1 montre un exemple d'un modèle sphérique adapté à un variogramme empirique. Ici, trois paramètres principaux peuvent être déduits: la pépité ( $C_0$ ) qui décrit la variance d'une mesure répétée plusieurs fois au même point, le palier ( $C$ ) qui représente la variance globale et la longueur de corrélation ( $a$ ) qui représente la distance maximale sur laquelle les données sont corrélées.

Le krigeage, qui est une méthode largement utilisée pour l'interpolation spatiale, permet de prévoir une mesure non observée ( $Z^*$ ) à partir des mesures connues environnantes pondérées en fonction des valeurs de variogramme et en supposant une moyenne constante [2].+



**Figure 1 : Variogramme empirique et modèle ajusté avec ses paramètres.**

## 2.2. Méthode d'optimisation d'échantillonnage spatial (OSSM)

En considérant un ensemble (S) d'un nombre N de mesures, le problème de la réduction de la densité d'échantillonnage consiste à choisir un sous-ensemble  $s_0$  de n points initialement localisés dans une grille régulière  $d_0$  qui doivent être déplacés, toujours à des positions libres dans S. L'optimisation est faite pour approcher au mieux la distribution spatiale des mesures de CND ou la propriété à étudier sur une grille devenue irrégulière.

Pour ce faire, un algorithme inspiré par le recuit simulé spatial (SSA) a été développé. La méthode d'optimisation d'échantillonnage spatial développée dans la présente étude (OSSM) est initiée par une configuration  $s_0$  de N points répartis sur une grille régulière  $d_0$ . Cette grille est modifiée en déplaçant un point de  $s_0$  à un point libre aléatoire dans S. Lorsque la nouvelle configuration  $s_1$  est établie, une fonction objectif  $J_1$  est évaluée. Cette nouvelle configuration sera acceptée sous condition de réduction de cette fonction avec une probabilité d'acceptation P calculée avec une fonction échelon décrite dans (1):

$$\begin{aligned} \Delta &= J_0 - J_1 \\ P &= 1 \quad \text{If } \Delta \leq 0, \\ P &= 0 \quad \text{If } \Delta > 0, \end{aligned} \quad (1)$$

où  $J_0$  est la valeur de la fonction objectif pour  $s_0$  et  $J_1$  est la valeur de la fonction objectif pour  $s_1$ .

Deux fonctions objectif ont été explorées pour l'algorithme d'optimisation:

### 2.2.1. Erreur de prédiction moyenne (MPE)

Cette fonction est la moyenne de l'erreur de prédiction évaluée à travers tous les points. Elle est normalisée par rapport à la moyenne des N points d'origine.

$$MPE = \frac{|Z - Z^*|}{\text{Mean}_R} (\%) \quad (2)$$

### 2.2.3. Variance de l'erreur d'estimation (VEE)

Cette fonction est le rapport entre la variance de n mesures connues ( $V_i$ ) et la variance de la totalité des N mesures initiales ( $V_N$ ).

$$VEE = 1 - \frac{V_i}{V_N} (\%) \quad (3)$$

## 3. ÉCHANTILLONNAGE SPATIAL POUR CAROTTAGE

Dans le cadre d'une inspection complète et fiable, les tests destructifs sont nécessaires pour confirmer les résultats des propriétés obtenues par la combinaison de différentes techniques de CND [8]. En raison du coût du carottage et des dégâts possibles sur la structure, il est important de bâtir un plan d'échantillonnage spatial efficace pour prélever un nombre limité de carottes.

Pour ce faire, une série de 30 mesures ultrasonores, capacitives et par impact écho ont été faites le long d'une ligne longitudinale horizontale pour la pré-auscultation d'un mur en béton d'une centrale thermique au Havre-France, dans le cadre de deux projets nationaux français : C2D2-ACDC et ANR EVADEOS. La figure 2 montre le variogramme correspondant pour chaque technique de CND utilisée sur le mur étudié. Les CND ont été combinés avec un procédé de fusion fondé sur la théorie des possibilités [5] pour obtenir le degré de saturation du béton ainsi que la résistance à la compression en chacun des points du mur ausculté.

Pour chacune des propriétés du béton, un variogramme a été déterminé. Comme le montre la figure 3a, un modèle sphérique avec une longueur de corrélation de 200 cm, un seuil de 1,30 et une pépité de 0,28 a pu être adapté pour des données de saturation. Cependant, pour la résistance à la compression aucun modèle de variogramme n'a pu être adapté en raison du niveau élevé de dispersion (figure 3b).

Nous pouvons remarquer que même si les données de CND ont une corrélation et un variogramme, les propriétés du béton ne montrent pas obligatoirement de corrélation spatiale. Pour cette raison, il est important d'être en mesure d'appliquer l'OSSM, même si un modèle de variogramme ne peut pas être appliqué. Dans ce but, la fonction objectif de VEE (la seule qui ne dépend pas d'un modèle de variogramme) est utilisée pour la mise en œuvre de l'OSSM dans le cas de résistance à la compression.

Ce variogramme obtenu sur un mur donné est appliqué sur un mur voisin « N ». Les deux murs ont été réalisés simultanément et ont la même hauteur et la, même exposition climatique. Seule la longueur diffère (200 cm). Sur ce mur N, 10 points de mesures de CND (capacitifs, ultrasons et impact écho) sont répartis sur deux lignes horizontales de

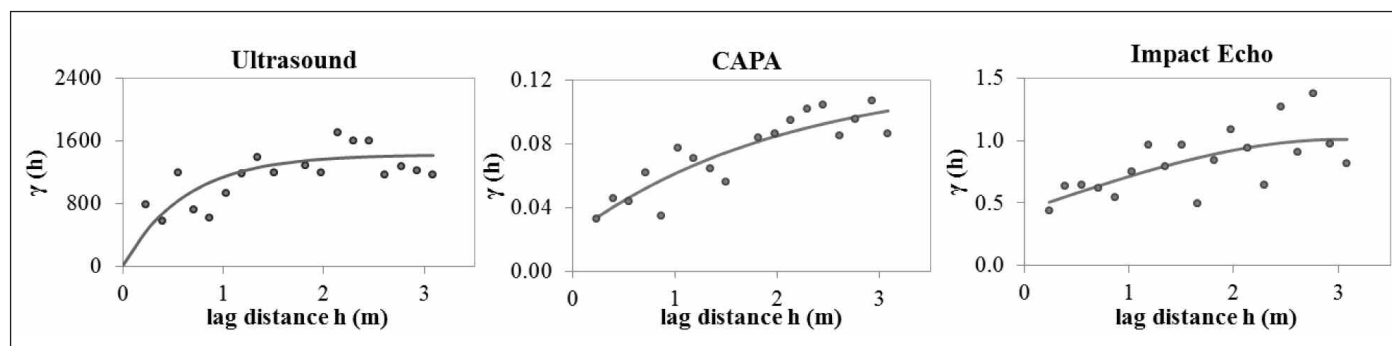


Figure 2 : Variogrammes empiriques (points) et les modèles exponentielles adaptés respectives (lignes) des CND utilisées sur le mur ausculté.

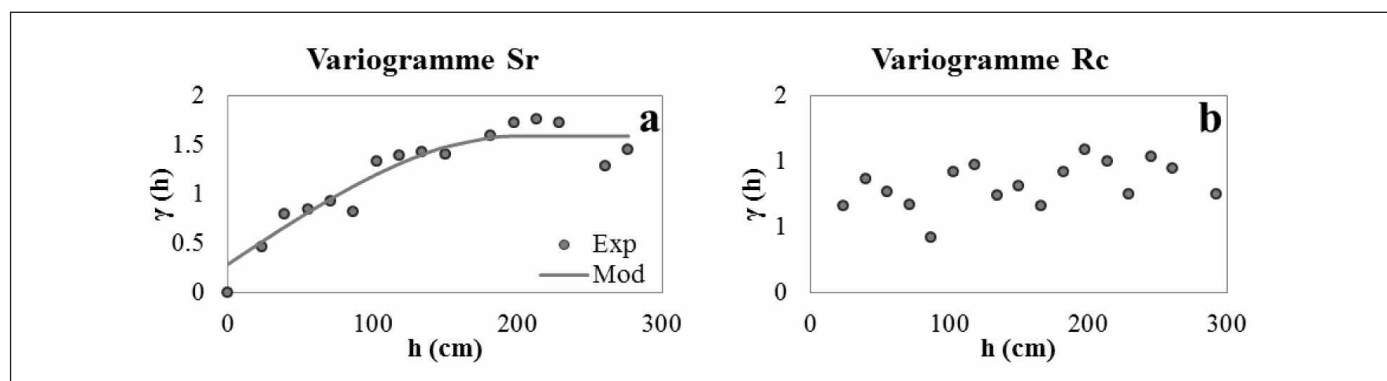


Figure 3 : (a) Variogramme empirique du degré de saturation (points) et le modèle sphérique adapté respectif (ligne) du mur étudiée. (b) Variogramme empirique de la résistance à la compression du mur étudiée.

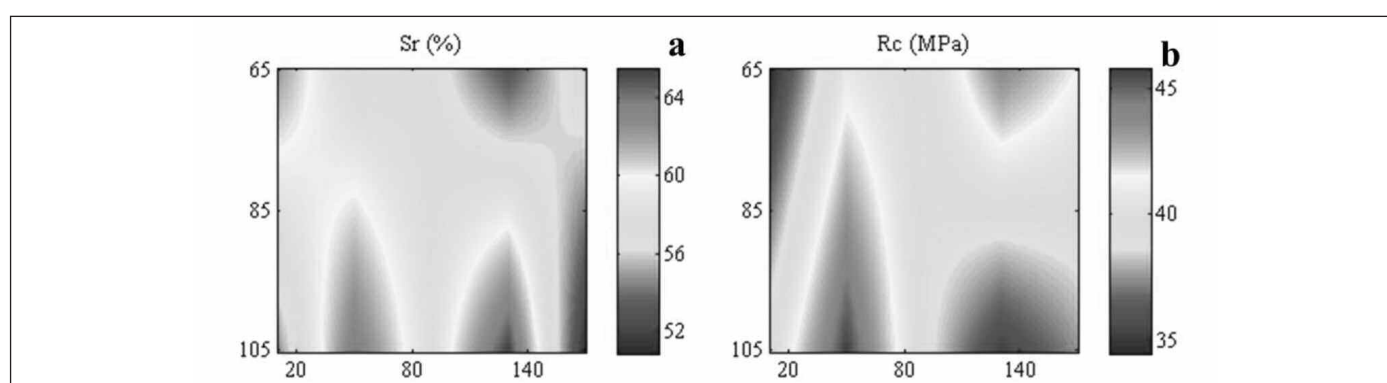


Figure 4 : (a) Degré de saturation. (b) Résistance à la compression. Dimensions en cm.

5 points espacés de 40 cm. La méthode de fusion a été également appliquée pour ces données et le degré de saturation et résistance à la compression ont été obtenus. Les figures 4 montrent les champs de degré de saturation et de résistance à la compression.

En raison du nombre de points pour le mur N (10), nous faisons donc l'hypothèse que la variabilité spatiale du mur étudiée est la même que celle du mur N. Nous utiliserons donc lors du processus d'optimisation pour le carottage les variogrammes proposés par les figures 3.

### 3.1. OSSM multi-objectif

Pour cette approche, il va être utilisé trois fonctions objectif :  $MPE_{Sr}$  et  $VEE_{Sr}$  pour le degré de saturation et  $VEE_{Rc}$  pour la résistance à la compression. Nous minimisons les trois fonctions objectif simultanément pour les deux pro-

priétés afin de placer au mieux les carottes. Nous étudions cette minimisation pour différentes valeurs du nombre de carottes. Les figures 5 montrent l'évolution de chaque fonction objectif en fonction du nombre de carotte dans le cas de points organisés en une grille régulière avant l'optimisation (courbe bleue), et dans le cas d'une grille irrégulière après optimisation OSSM (courbe rouge). L'intérêt de cette transition vers une grille irrégulière est de donner un degré de liberté supplémentaire dans la grille afin de réduire les fonctions objectif.

Comme nous pouvons le voir, toutes les valeurs des fonctions objectif pour cinq, quatre et trois carottes ont pu être réduites, mais pour deux carottes cela n'a pas été possible. Cela peut être expliqué par le petit nombre de carottes. Dans la procédure d'optimisation, nous déplaçons une seule carotte à la fois. Si la nouvelle configuration ne réduit pas les trois fonctions objectif en même temps, celle-ci

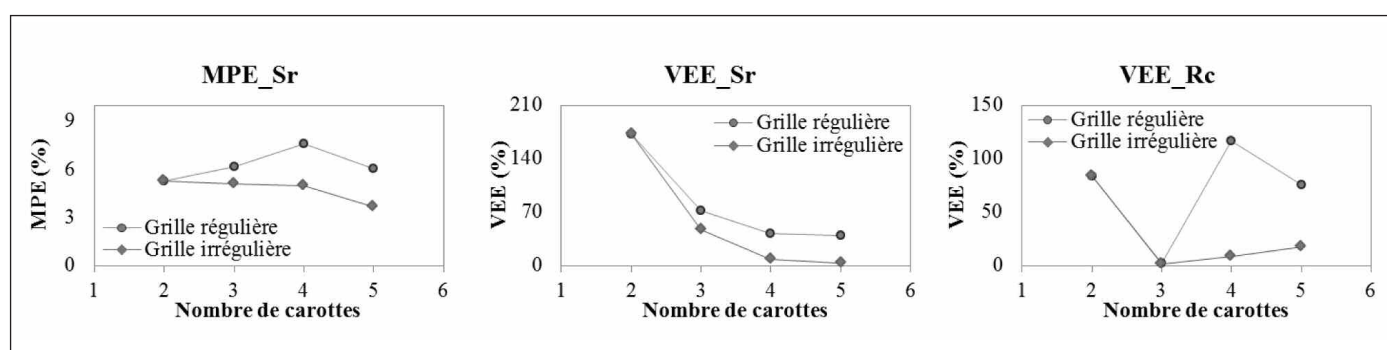


Figure 5 : Relation entre le nombre de carottes et les valeurs des fonctions objectif pour  $MPE_{Sr}$ ,  $VEE_{Sr}$  and  $VEE_{Rc}$ . Grille régulière

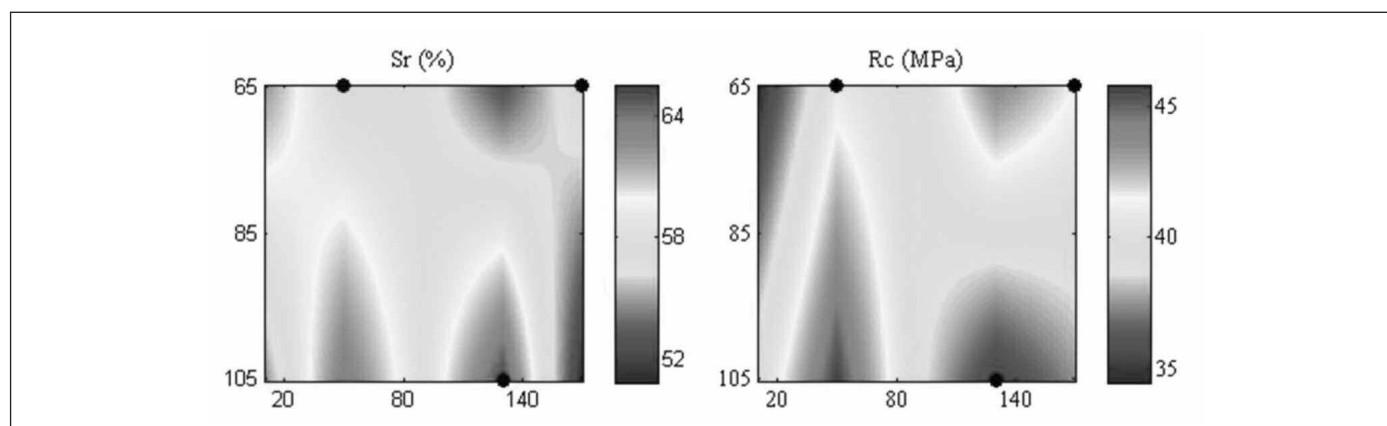


Figure 6 : Configuration des trois carottes prélevées dans les champs  $S_r$  et  $R_c$ .

n'est pas retenue. Nous constatons que lorsque le nombre de carottes diminue, les solutions obtenues sur une grille régulière ou irrégulière convergent.

Dans le cadre des essais réalisés sur ces murs, nous avons prélevé trois carottes repérées sur la figure 6 dont les positions ont été définies par des experts suite aux essais CND. Nous avons par la suite estimé les fonctions objectif pour cette configuration. La fonction  $MPE_{-S_r}$  est égal à 6,36%,  $VEE_{-S_r}$  à 1,07% et  $VEE_{-R_c}$  à 3,09%.

Dans l'ensemble, cette configuration qui va être appelé « solution des experts » est équivalente que celle trouvée par l'approche multi-objectif. Par conséquent, étant donné que la surface de l'auscultation n'est pas grande et le nombre total de positions libres possibles n'est pas important, une approche systématique tenant compte de toutes les configurations possibles pour le cas de trois et deux carottes va être utilisé.

### 3.2. L'approche systématique

Contrairement à l'optimisation précédente, l'approche systématique prend en compte toutes les configurations possibles des points. A chaque configuration, nous déterminons simultanément les trois fonctions objectif ( $MPE_{-S_r}$ ,  $VEE_{-S_r}$  et  $VEE_{-R_c}$ ). Nous faisons ensuite la somme des trois (SFF) pour chaque point et considérons la valeur minimale de cette somme comme la solution optimale. En utilisant cette approche, pour le cas de trois carottes à prélever sur le mur considéré, la meilleure solution trouvée correspond à celle proposée par les « experts ». Dans le cas de deux carottes à prélever, les valeurs minimisées des fonctions objectif sont : 6,72% pour  $MPE_{-S_r}$ , 10,15% pour  $VEE_{-S_r}$  et 0,32% pour  $VEE_{-R_c}$ . Il est important de remarquer que cette approche ne peut être utilisée que dans le cas d'un nombre limité de carottes prélevées dans une petite surface à ausculter. Dans le cas contraire, cette approche devient peu pratique en raison du temps de calcul.

## 4. CONCLUSIONS

Cette étude propose une approche qui pourrait permettre la caractérisation efficace des ouvrages d'art à partir de CND

et ceci en limitant le coût. Une étude préliminaire d'une structure en béton a été réalisée avec trois techniques d'essais non destructifs (ultrasons, capacitifs et impact écho) pour évaluer la corrélation spatiale d'un mur de rétention dans une centrale thermique au Havre - France. La fusion de trois CND est faite par la méthode de la théorie des possibilités pour obtenir les valeurs de degré de saturation et de la résistance à la compression dans un des murs étudiés. Plus tard, un variogramme pour le degré de saturation et de la résistance à la compression a été estimé, mais aucun modèle de variogramme n'a pu être adapté pour la résistance à la compression. Les variogrammes existants ont été utilisés dans l'optimisation spatiale du carottage pour le mur N voisin, vieilli dans les mêmes conditions d'exposition climatiques.

Pour cette optimisation spatiale deux approches ont été exploitées: OSSM multi-objectifs et une approche systématique. Trois fonctions objectif ont été utilisées:  $MPE_{-S_r}$ ,  $VEE_{-S_r}$  et  $VEE_{-R_c}$ . La fonction  $MPE_{-R_c}$  n'a pas pu être utilisée car aucun modèle de variogramme n'a pu pas être adapté pour le cas de la résistance à la compression. L'approche OSSM multi-objectif a été testée avec cinq, quatre, trois et deux carottes. Tous les cas ont montré une diminution des fonctions objectif avec une exception du cas de deux carottes. Ceci peut être expliqué par le nombre des restrictions sur l'algorithme. Dans le cas de trois carottes, les valeurs des fonctions objectifs globales, avec la configuration des carottes proposée par des experts et effectivement prélevés dans le mur N, sont équivalentes à celles obtenues avec la configuration trouvée par l'approche OSSM multi-objectif.

L'approche systématique a été appliquée afin de retrouver au moins la configuration proposée par les experts et afin de trouver une solution pour le cas d'un prélèvement réduit à deux carottes. Dans le cas de deux carottes, il a été trouvé une nouvelle configuration qui améliore les valeurs des fonctions objectif. Cependant, il est recommandé d'utiliser cette approche systématique pour un nombre réduit de carottes dans une petite surface à ausculter.

D'autres travaux d'amélioration de l'OSSM proposés dans cette étude comprennent une fonction de coût comme fonction objectif. Nous envisageons d'utiliser l'OSSM dans un espace à trois dimensions pour estimer la profondeur de pénétration de certaines techniques d'essais non destructifs



qui peuvent donner plus d'informations sur l'état de dégradation de la structure.

## REMERCIEMENTS

Ce travail a pu être réalisé grâce au soutien de l'ANR-Bâtiment et Villes durables (Projet EvaDéOS), du RGCU et d'EDF pour avoir mis à disposition des structures à contrôler dans le contexte industriel d'une centrale thermique. Nous tenons à les remercier.

## RÉFÉRENCES

- [1] Barnes, R., Variogram Tutorial, Global Software, Inc.
- [2] Bohling, G., Kriging, C&PE 940, 2005.
- [3] Ferreyra, R.A., Apeztegui, H.P., Sereno, R., Jones, J.W., Reduction of soil water spatial sampling density using scaled semivariograms and simulated annealing, *Geoderma*, vol. 110, 2002, p. 265-289.
- [4] Melles, S.J., Heuvelink, G.B.M., Twenhöfel C.J.W., Van Dijk, A., Hiemstra, P.H., Baume, O., Stöhlker, U., Optimizing the spatial pattern of networks for monitoring radioactive releases, *Computers & Geosciences*, vol. 37, 2011, p. 280-288.
- [5] Ploix, M.A., Garnier, V., Breysse, D., Moysan, J., NDE data fusion to improve the evaluation of concrete structures, *NDT & E International*, vol. 44, n°5, 2011, p. 442-448.
- [6] Stein, A., Ettema, C., An overview of spatial sampling procedures and experimental design of spatial studies for ecosystem comparisons, *Agriculture, Ecosystems and Environment*, vol. 94, 2003, p. 31-47.
- [7] Van Groeningen, J.W., Siderius, W., Stein, A., Constrained optimization of soil sampling for minimization of the kriging variance, *Geoderma*, vol. 87, 1998, p. 239-259.
- [8] Villain, G., Sbartaï, Z.M., Dérobert, X., Garnier, V., Balayssac, J.P., Durability diagnosis of a concrete structure in a tidal zone by combining NDT methods : Laboratory test and case study, *Construction and Building Materials*, vol. 37, 2012, p. 893-903.