



HAL
open science

Outils d'aide à l'optimisation des campagnes d'essais non destructifs sur ouvrages en béton armé

Carolina Gomez Cardenas

► **To cite this version:**

Carolina Gomez Cardenas. Outils d'aide à l'optimisation des campagnes d'essais non destructifs sur ouvrages en béton armé. Rencontres Universitaires de Génie Civil, May 2015, Bayonne, France. hal-01167615

HAL Id: hal-01167615

<https://hal.science/hal-01167615>

Submitted on 24 Jun 2015

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Outils d'aide à l'optimisation des campagnes d'essais non destructifs sur ouvrages en béton armé

Gomez-Cardenas^{1,2,3*}, Sbartai¹, Garnier², Balayssac³

¹ Institut de Mécanique et d'Ingénierie (I2M), dpt GCE, Université Bordeaux I, CNRS, INRA, 351 cours de la libération, 33405 TALENCE Cedex, zoubir-mehdi.sbartai@u-bordeaux.fr

² Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique – Aix-Marseille Université (LMA-AMU), Avenue Gaston Berger, 13 625 AIX EN PROVENCE Cedex1, vincent.garnier@univ-amu.fr

³ Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions (LMDC), INSA-UPS, INSA-GENIE CIVIL, 135 Av.de Ranguéil, 31077 TOULOUSE Cedex, jean-paul.balayssac@insa-toulouse.fr

* gomezcar@insa-toulouse.fr

Prix Jeunes Chercheurs « René Houpert »

RÉSUMÉ. Les techniques de Contrôle Non Destructif (CND) sont incontournables pour ausculter les ouvrages afin d'évaluer les propriétés du béton ou détecter des anomalies (fissures, pathologies, etc). En raison de contraintes budgétaires, une méthodologie optimale pour évaluer l'intégralité de l'ouvrage à moindre coût est donc nécessaire. Eventuellement, des Essais Destructifs (ED) pourront être nécessaires pour corroborer les informations obtenues par le CND. Cet article présente une stratégie pour établir une campagne d'essais non destructifs efficace sur les ouvrages en béton armé avec pour but de caractériser la porosité et le degré de saturation du béton. Cette stratégie consiste à positionner de façon optimale les mesures CND et les carottes à prélever en faisant une optimisation spatiale des CND et des deux propriétés du béton étudiées. Ces propriétés ont été obtenues après la fusion de trois techniques d'essais non destructifs (méthode capacitive, impact écho et résistivité électrique). Cette optimisation spatiale est effectuée par la méthode d'optimisation de l'échantillonnage spatial (MOES) et elle est fondée sur le principe de la corrélation spatiale. Des résultats obtenus sur un mur du CEA Saclay – 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 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 strategy to establish an NDT campaign for reinforced concrete structures. The aim is to assess concrete porosity and saturation degree by doing a spatial optimization of NDT measurements and cores to extract. For placing in an optimal way the cores to extract, studied properties values were used. They were obtained after the fusion of three NDT techniques (capacitive method, impact echo and electric resistivity). This spatial optimization is made by the optimization spatial sampling method (OSSM) and is based on the properties spatial correlation. Some results obtained on a wall in CEA-Saclay – France are presented.

MOTS-CLÉS: CND, surveillance, structure béton, optimisation, variabilité spatiale, fusion des données.

KEY WORDS: NDT, monitoring, concrete structure, optimization, spatial variability, data fusion.

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 fournis tels que le degré de saturation, la porosité, etc. qui sont obtenus soit par la fusion des CND ou par des essais destructifs (ED) doivent donc être optimisées afin de réduire autant que possible le nombre de mesures 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 (ex : résistance mécanique, porosité, degré de Saturation, etc.). Ensuite, une étude complémentaire avec des techniques de qualité supérieure peut être réalisée dans les zones critiques identifiées par la première étape. 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 (RSS) [VAN 98]. Même si cette procédure est régulièrement utilisée dans des applications géostatistiques [FER 02], et dans d'autres domaines tels que les rejets radioactifs [MEL 11], l'étude des écosystèmes [STE 03], etc, elle est sous exploitée dans sur des structures de génie civil. Dans cet article, une optimisation de la méthode d'optimisation de l'échantillonnage spatial (MOES) [GOM 15] originale inspirée du RSS a été testée avec deux fonctions objectifs complémentaires: l'erreur de prédiction moyenne et l'erreur d'estimation de la variance autrement dit l'erreur sur l'estimation de la variabilité. La performance de la MOES a été explorée avec des mesures non destructives prises sur un mur du CEA – Saclay, France.

2. Méthodes et outils

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, pour un nombre de mesures distribuées sur une surface, celles qui sont proches en distance auront une certaine similitude, 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 [BAR].

Chaque variogramme expérimental peut être modélisé par la méthode des moindres carrés pour obtenir des paramètres utilisés ultérieurement dans les matrices nécessaires à l'interpolation spatiale par la méthode du krigeage. La figure 1 montre un exemple d'un modèle sphérique adapté sur des mesures de la vitesse des ondes de compression fournies par la technique d'impact écho obtenues sur le Mur Nord au CEA-Saclay (description de l'ouvrage au paragraphe 3). Trois paramètres principaux peuvent être déduits de ce variogramme: 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 portée (a) qui représente la distance maximale sur laquelle les données sont corrélées (longueur de corrélation).

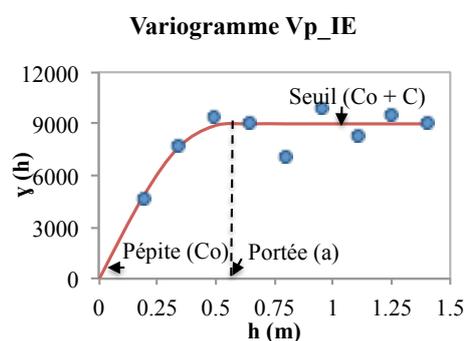


Figure 1. Variogramme empirique et modèle ajusté avec ses paramètres de la vitesse de compression de l'impact écho mesurés au Mur Nord au CEA-Saclay.

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 paramètres extraits du variogramme et en supposant une moyenne constante [BOH 05].

2.2 Méthode d'optimisation d'échantillonnage spatial (MOES)

Pour approcher au mieux la distribution spatiale des CND ou des propriétés du béton à étudier, un algorithme inspiré du recuit simulé spatial (RSS) a été développé. La méthode d'optimisation d'échantillonnage spatial développée dans la présente étude est initiée par une configuration s_0 de n points répartis sur une grille régulière dans l'espace S lequel, au même temps, est composé de N points organisés suivant une grille originale SO . Cette grille initiale s_0 est modifiée en déplaçant un point de s_0 en un point libre aléatoire dans SO . 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 . Pour résumer, la nouvelle configuration est acceptée si $P = 1$ et refusée si $P = 0$.

Deux fonctions objectif ont été explorées pour l'algorithme d'optimisation l'erreur de prédiction moyenne et la l'erreur d'estimation de la variance.

2.2.1 Erreur de prédiction moyenne (EPM)

Cette fonction est la moyenne de l'erreur de prédiction. Elle est la moyenne des différences absolues entre les valeurs mesurées (Z) et les valeurs estimées (Z^*) évaluées à travers tous les points n et normalisées par rapport à la moyenne des N points d'origine (Moy_R).

$$EPM = \frac{|Z-Z^*|}{Moy_R} (\%) \quad (2)$$

Cette fonction représente l'erreur commise quand on représente le domaine mesuré original avec un nombre de mesures réduit n .

2.2.2 Erreur de l'estimation de la variance (EEV)

Cette fonction représente l'erreur dans le calcul de la variance globale avec un nombre réduit des mesures connues (n). Zéro erreur signifie que la variance globale estimée avec n points est égale à la variance globale calculée avec N mesures initiales. La fonction EEV est un moins le rapport entre la variance de n mesures connues (V_i) et la variance de la totalité des N mesures initiales (V_N).

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

3. Validation de la MOES dans un cas d'étude: CEA-Saclay

3.1 Échantillonnage spatial optimal des mesures CND : Impact Echo et méthode Capacitive

Le CEA-Saclay est un des sites d'étude retenu pour un projet de recherche national français (EvaDéOS). L'intérêt de cet ouvrage est que le béton est assez fortement carbonaté avec des profondeurs proches de l'épaisseur d'enrobage. Le cas d'étude prend en compte deux murs : un orienté vers le nord (mur N) et l'autre orienté vers le sud (mur S). Ces murs ont été construits en 2004, leurs longueurs varient entre 20 et 40 m et son hauteur est d'approximativement 2.2 m. La figure 2 montre l'emplacement des murs inspectés dans le cadre de ce projet.

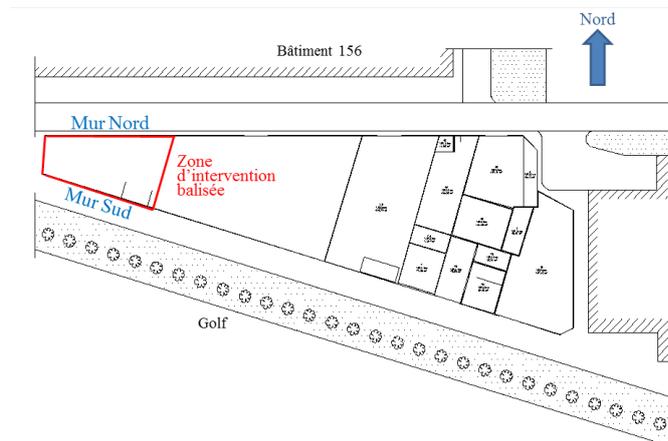


Figure 2. Emplacement des murs inspectés.

L'approche industrielle de l'évaluation du béton pour une auscultation efficace ou pour le suivi de cet ouvrage, implique de réduire le nombre des essais CND et des essais destructifs (ED) nécessaires pour le recalage afin d'optimiser le coût de l'auscultation. Pour cette étude, le mur N a été choisi. De nombreuses techniques de CND ont été utilisées dans cette campagne de mesures, mais seulement les mesures de la permittivité issues de la méthode capacitive (P_Capa) et la vitesse de compression de la technique impact écho (Vp_IE) ont été utilisées et analysées ici pour valider l'approche développée.

Pour ce faire, une série de 28 mesures capacitives et par impact écho ont été faites pour la pré-auscultation du mur N. Elles sont réparties le long de deux lignes horizontales et parallèles. Un variogramme sphérique a été ajusté aux données expérimentales de P_Capa et Vp_IE. Les courbes ajustées ont respectivement une pépité de 0.02 et 0 (m/s)², une portée de 0.6 m et 0.51 m et un seuil de 0.24 et 8894 (m/s)².

La capacité du MOES a été explorée avec différents nombres de mesures (n). La figure 3 montre la variation des deux fonctions objectif - EPM (figure 3a et figure 3c) et EEV (figure 3b et figure 3d) - avec n mesures organisées sur une grille régulière (avant l'optimisation) et avec un positionnement des mesures optimisé sur une grille irrégulière (après le MOES) pour P_Capa et Vp_IE.

Si EPM est utilisée comme fonction objectif, on peut observer une diminution significative de sa valeur pour P_Capa (figure 3a) de 49% en moyenne si l'on passe d'une grille régulière à une grille irrégulière. Dans le cas de Vp_IE (figure 3c), on a une diminution en moyenne de 55% pour EPM. D'après la figure 3b, on peut en déduire que, si n est réduit à 13, la nouvelle variance globale est égale à celle obtenue avec les 28 mesures originales de P_Capa.

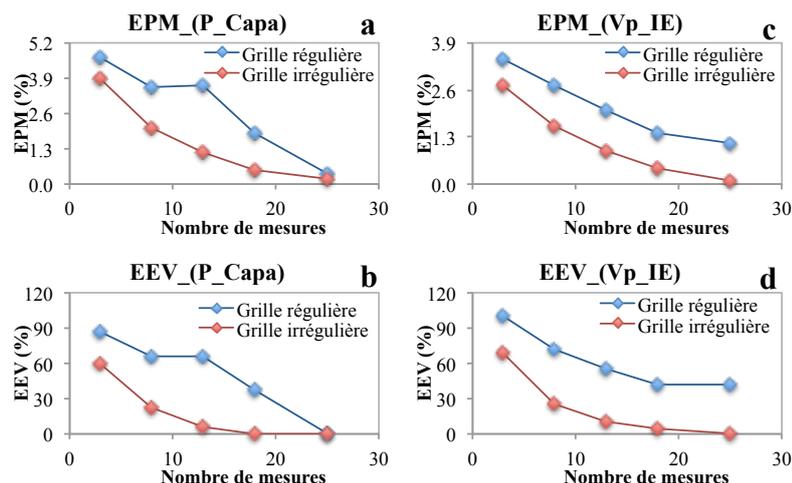


Figure 3. Relation entre le nombre de carottes et les valeurs des fonctions objectif pour a) EPM (P_{Capa}), b) EEV (P_{Capa}), c) EPM (Vp_{IE}) et d) EEV (Vp_{IE}). Grille régulière (points bleus) et grille irrégulière optimale (points rouges).

On peut mieux visualiser l'impact de l'optimisation à partir des figures 4a à 4d. La figure 4a montre la carte originale des 28 mesures de Vp_{IE} , la figure 4b montre la carte de krigeage obtenue avec 13 mesures organisées dans une grille régulière, la figure 4c montre la carte de krigeage obtenue avec 13 mesures organisées dans une grille irrégulière optimisée par l'algorithme avec EPM comme fonction objectif et finalement, la figure 4d montre la carte de krigeage obtenue avec 13 mesures organisées dans une grille irrégulière optimisée par l'algorithme avec EEV comme fonction objectif.

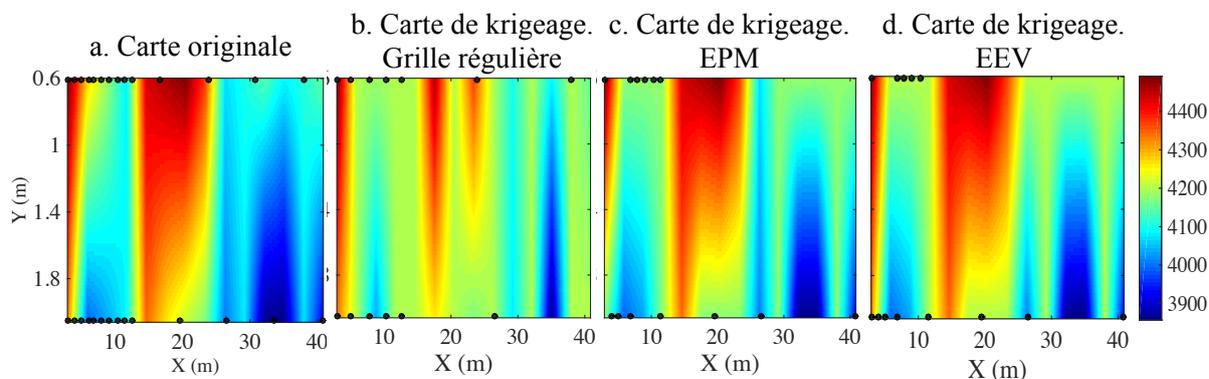


Figure 4. a) Carte originale du Vp_{IE} avec 28 mesures, b) Carte de krigeage faite avec 13 mesures organisées dans une grille régulière, c) Carte de krigeage faite avec 13 mesures organisées dans une grille irrégulière optimale obtenu après MOES avec EPM comme fonction objectif, d) carte de krigeage faite avec 13 mesures organisées dans une grille irrégulière optimale obtenu après MOES avec EEV comme fonction objectif.

EPM et EEV ont montré des performances intéressantes. Sa valeur a été réduite de 52% et 75% en moyenne pour les deux techniques de CND en passant d'une grille régulière de positionnement à une irrégulière optimale. Il convient de noter qu'EPM conduit à une erreur de prédiction moyenne plus petite dans la carte de krigeage et à une valeur moyenne plus proche de celle d'origine qu'EEV. D'autre part, EEV fournit une variance plus près de la variance globale qu'EPM. Dans ce cas EPM et EEV ont donné une carte de krigeage quasiment identique. Cependant, une attention particulière doit être accordée à ce qui est attendu avant de sélectionner la fonction objectif la plus appropriée pour analyser un ensemble de données en particulier. Par exemple, si le gestionnaire de la structure veut connaître la répartition spatiale pour optimiser les contrôles ultérieurs ou pour localiser les zones prioritaires pour planifier des opérations de maintenance, EPM doit être utilisée. Si, au contraire, il veut estimer la variabilité globale du matériau pour le calcul de fiabilité, EEV doit être préférée. L'objectif de notre travail étant d'optimiser le suivi des ouvrages par les méthodes de CND, EPM sera donc privilégiée dans la suite de cette étude.

3.2 Echantillonnage spatial pour optimiser le positionnement des essais destructifs

Dans le cadre d'une inspection complète et fiable, des essais destructifs réalisés en laboratoire sur des prélèvements de béton obtenus par carottage sont nécessaires pour confirmer et caler les résultats des propriétés obtenues par la fusion de différentes techniques de CND [VIL 12]. En raison du coût des carottages et des essais destructifs ainsi que des dégâts possibles sur la structure, il est important de bâtir un plan d'échantillonnage spatial optimal afin de prélever un nombre limité de carottes.

Dans le cadre de cette étude, l'objectif est de placer le mieux possible les carottes à prélever pour réaliser des essais destructifs et obtenir le degré de saturation et la porosité pour chaque carotte. Pour ce faire, idéalement on devrait avoir des mesures du degré de saturation et de la porosité en chaque point d'auscultation pour pouvoir utiliser la MOES. Cependant, comme mentionné avant, il n'est pas pratique de prélever 28 carottes. Par conséquent, on a combiné les méthodes capacitatives, impact écho et résistivité électrique grâce à un procédé de fusion fondé sur la théorie des possibilités [PLO 11] pour obtenir les cartes de référence du degré de saturation et de la porosité en chacun des points du mur ausculté. On fait l'hypothèse que ces cartes de référence ont une variabilité spatiale similaire aux cartes qu'on obtiendrait si l'on avait fait des essais destructifs sur 28 carottes

prélevés en chacun des points auscultés. Seuls 25 points ont été retenus pour l'application du MOES en raison des erreurs de mesure non destructives identifiées dans le processus d'inversion et de fusion.

Pour chacune des propriétés du béton (degré de saturation et porosité), un variogramme a été déterminé. Comme le montre la figure 5a, un modèle sphérique avec une portée de 0.18 m, un seuil de 38.9 % et une pépité de 0 % a pu être adapté pour les données de saturation. En revanche, pour la porosité c'est un modèle gaussien avec une longueur de corrélation de 0.18 m, un seuil de 0.35 % et une pépité de 0.14 % qui a pu être ajusté (figure 5b). Nous pouvons remarquer que si les données de CND ont un type de corrélation et de variogramme, les propriétés du béton ne montrent pas obligatoirement la même corrélation spatiale.

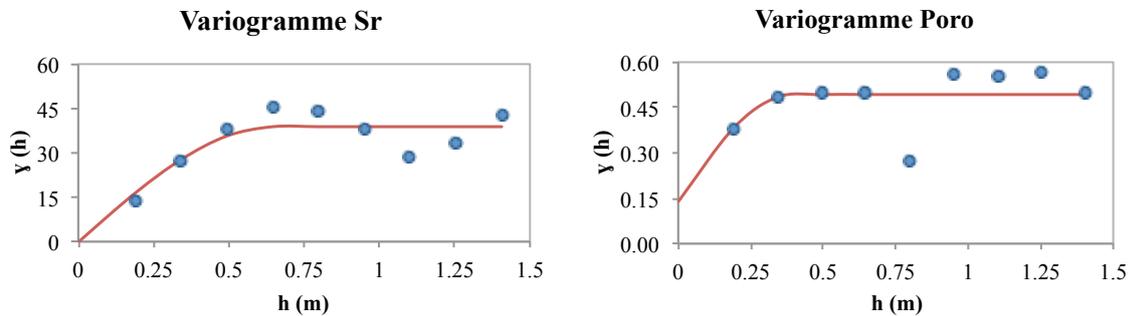


Figure 5. Variogrammes empiriques (points) et les modèles exponentiels adaptés respectives (lignes) des propriétés étudiées sur le mur ausculté. a) Variogramme du degré de saturation, b) Variogramme de la porosité.

Pour cette approche, il va être utilisé deux fonctions objectif: EPM_Sr et EPM_Poro pour le degré de saturation et la porosité respectivement. Comme premier test, on minimise chaque fonction objectif individuellement : EPM_Sr pour les données du degré de saturation et EPM_Poro pour les données de porosité dans le cas où 5 carottes sont prélevées. Le tableau 1 montre les coordonnées x et y des positions optimales des 5 prélèvements après optimisation avec chaque fonction objectif. Comme on peut le voir dans ce tableau, les positions optimales pour le degré de saturation et la porosité ne sont pas les mêmes, il faudrait donc augmenter le nombre de carottes afin de caractériser au mieux ces deux propriétés. Pour pallier ce problème, nous testons l'algorithme en minimisant les deux fonctions objectif simultanément pour les deux propriétés, afin de placer au mieux les carottes et obtenir ainsi la meilleure information des deux propriétés étudiées. Nous étudions cette minimisation pour différentes valeurs du nombre de carottes. Les figures 6a et 6b montrent l'évolution de chaque fonction objectif en fonction du nombre de carottes dans le cas de points organisés suivant une grille régulière avant l'optimisation (courbe bleue), et dans le cas d'une grille irrégulière après optimisation (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.

EPM Sr		EPM Poro	
X (m)	Y (m)	X (m)	Y (m)
7.86	0.61	2.95	2.05
9.07	0.61	7.86	0.61
19.53	2.05	10.33	0.61
26.53	2.05	19.53	2.05
40.84	2.05	40.84	2.05

Tableau 1. Positions optimales des 5 prélèvements après optimisation avec EPM_Sr et EPM_Poro.

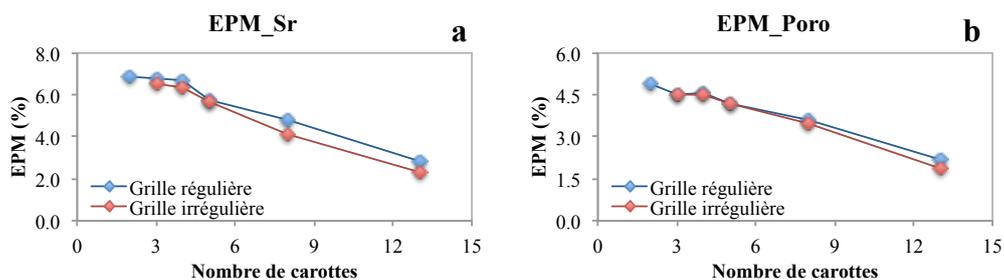


Figure 6. Relation entre le nombre de carottes et les valeurs des fonctions objectif pour a) EPM_Sr, b) EPM_Poro. Grille régulière (points bleus) et grille irrégulière optimale (points rouges).

On remarque sur les figures 6a et 6b que l'erreur diminue jusqu'à 19% avec le nombre de carottes. Toutefois, une grille irrégulière de positionnement des carottes ne diminue pas l'erreur de façon aussi significative que dans le cas de l'optimisation spatiale des CND.

Dans la procédure d'optimisation, nous déplaçons une seule carotte à la fois. Si la nouvelle configuration ne réduit pas simultanément les deux fonctions objectif, celle-ci n'est pas retenue. La figure 7 montre un exemple d'optimisation avec 5 carottes. Dans la partie gauche de la figure on a la carte de référence du degré de saturation et de la porosité obtenues après fusion et dans la partie droite on a les cartes de krigeage pour le degré de saturation et la porosité après optimisation réalisée avec 5 carottes et EPM comme fonction objectif. Comme on peut le voir, avec un nombre de carottes limité à 5, nous sommes en mesure d'obtenir une carte de krigeage assez similaire à la carte originale tant pour le degré de saturation que pour la porosité.

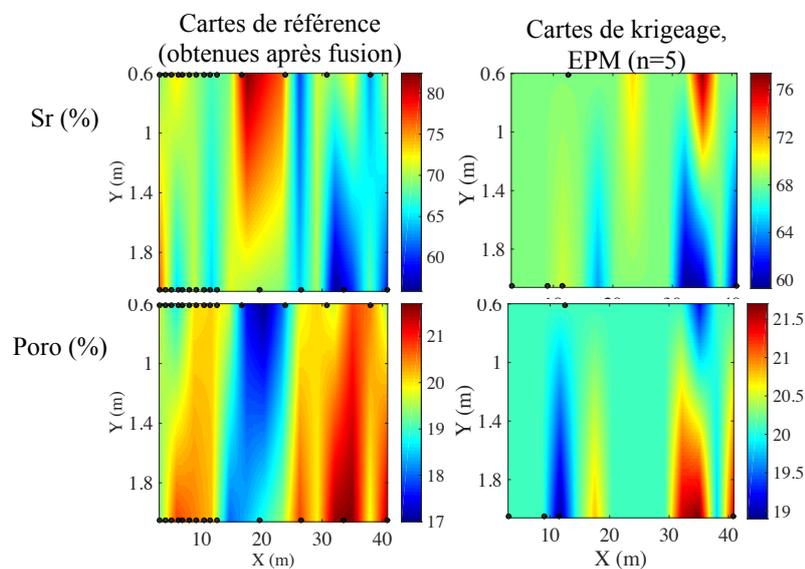


Figure 7. Cartes de référence du degré de saturation et porosité. Partie gauche: Cartes originales. Partie droite: Cartes de krigeage après optimisation réalisée avec 5 carottes et EPM comme fonction objectif.

4. Conclusions

Cette étude propose une approche qui permet de contribuer à la caractérisation efficace des ouvrages d'art en mettant en œuvre des techniques de CND avec un objectif de limitation des coûts d'inspection. Une étude préliminaire d'une structure en béton a été réalisée avec deux techniques d'essais non destructifs (capacitif et impact écho) pour évaluer la corrélation spatiale d'un mur sur le site du CEA - Saclay, France. Une première optimisation spatiale a été faite pour l'utiliser postérieurement dans une auscultation avec des CND plus raffinés ou pour le suivi de l'ouvrage. Ensuite, la fusion de trois CND (capacitif, impact écho et résistivité électrique) est faite par la méthode de la théorie des possibilités pour obtenir les valeurs de degré de saturation et de la porosité dans le mur étudié. Après avoir fusionné les mesures non destructives et estimé deux propriétés du béton que sont le degré de saturation et la porosité, des modèles de variogramme ont été adaptés sur ces deux propriétés. Ces variogrammes ont ensuite été utilisés dans l'optimisation spatiale du carottage pour le mur étudié.

Pour l'optimisation spatiale des CND, deux fonctions objectif ont été exploitées: EPM et EEV. Par contre, pour l'optimisation spatiale des carottes seulement EPM a été utilisée car l'objectif de l'auscultation était d'évaluer la résistance moyenne. L'optimisation des CND a été testée avec vingt-trois, dix-huit, treize, huit et trois points de mesure. Tous les cas ont montré une diminution des fonctions objectif. Entre une répartition spatiale régulière et irrégulière des mesures Pour l'optimisation spatiale des prélèvements pour les essais destructifs (carottes), l'optimisation a été testée avec cinq, quatre et trois carottes. Au début, l'algorithme a été fait avec EPM_Sr et EPM_Poro séparément. On a pu observer que si l'on considère individuellement chaque propriété du béton, les positions optimales des carottes sont différentes pour chaque propriété et par conséquent, on devrait augmenter le nombre de carottes au lieu de le diminuer. On a donc testé l'algorithme simultanément avec EPM_Sr et EPM_Poro pour garantir les mêmes positions optimales pour Sr et Poro. 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.

D'autres travaux d'amélioration de l'algorithme proposé dans cette étude comprennent une fonction de coût comme fonction objectif. Nous envisageons d'utiliser l'algorithme dans un espace à trois dimensions pour intégrer un nouveau paramètre qui est la profondeur de pénétration des techniques non destructives susceptible de fournir des informations sur l'état de dégradation de la structure en profondeur. En effet pour l'instant, on fait l'hypothèse que les mesures ND sont faites pour une épaisseur de béton moyenné.

5. Remerciements

Ce travail a pu être réalisé grâce au soutien financier de l'ANR Programme Bâtiment et Villes Durables (projet EvaDéOS). Le CEA-Saclay a également mis à notre disposition ses structures. Nous tenons à les remercier.

6. Références

- [BAR] BARNES, R., *Variogram Tutorial*, Global Software, Inc., p. 1-23.
- [BOH 05] BOHLING, G., *Kriging*, C&PE 940, 2005, p. 1-20.
- [FER 02] 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, pp. 265-289.
- [GOM 15] GOMEZ-CARDENAS, C. SBARTAI, Z.M., BALAYSSAC, J.P., GARNIER, V., BREYSSE, D., "New optimization algorithm for optimal spatial sampling during non-destructive testing of concrete structures", *Engineering Structures*, vol. 88, 2015, p. 92-99.
- [MEL 11] 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.
- [PLO 11] 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.
- [STE 03] 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, pp. 31-47.
- [VAN 98] VAN GROENINGEN, J.W., SIDERIUS, W., STEIN, A., "Constrained optimization of soil sampling for minimization of the kriging variance", *Geoderma*, vol. 87, 1998, pp. 239-259.
- [VIL 12] VILLAIN, G., SBARTAI, 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.