

# Thèse de Doctorat

Trung-Viet TRAN

*Mémoire présenté en vue de l'obtention du  
grade de Docteur de l'Ecole Centrale de Nantes  
sous le label de L'Université Nantes Angers Le Mans*

École doctorale : SPIGA – Sciences Pour l'Ingénieur, Géosciences, Architecture

Discipline : Sciences pour l'Ingénieur

Spécialité : Génie Civil

Unité de recherche : *Institut de Recherche en Génie Civil et Mécanique (GeM)*

Soutenue le 02 Septembre 2014

## Optimisation de la mise en œuvre de techniques de Contrôles Non Destructifs appliquées in-situ par analyse statistique

### JURY

Président :	<b>M. Alaa CHANTEAUNEUF</b>	Professeur, Université Blaise, Pascal, Clermont-Ferrand
Rapporteurs :	<b>M. Sidi Mohammed ELACHACHI,</b> <b>M. Vincent GARNIER,</b>	HDR, Maître de Conférence, Université de Bordeaux 1 HDR, Maître de Conférence, Université d'Aix-Marseille
Examineurs :	<b>M. Xavier DEROBERT,</b> <b>M. Jérôme IDIER,</b>	HDR, Directeur de recherche, IFSTTAR-Nantes Directeur de recherche, IRCCyN, Ecole Centrale de Nantes
Invité(s) :	<b>Mme. Géraldine VILLAIN,</b> <b>M. Edgar-Emilio BASTIDAS ARTEAGA,</b>	HDR, IDTPE, IFFSTAR-Nantes, UNam universitaire, Maître de Conférence, Université de Nantes
Directeur de Thèse :	<b>M. Franck SCHOEFS,</b>	Professeur, Université de Nantes



## RESUME

L'objectif de l'étude est d'optimiser des campagnes d'inspections in-situ par techniques de Contrôles Non Destructifs (CND) dans le but d'estimer les moments statistiques de la distribution d'une grandeur d'intérêt spatialement distribuée. Le sujet est abordé selon une approche numérique et une validation expérimentale. Dans la partie numérique, une extension de la théorie des intervalles de confiance a été développée dans le cas de la variabilité spatiale (champ stochastique stationnaire Gaussien 1D). Notre approche permet de proposer une position et un nombre d'inspections in-situ optimaux sous l'influence de quatre types d'incertitudes considérées. Une procédure en deux étapes est proposée dans cette étude : (i) identification des propriétés d'auto-corrélation du champ considéré comme ergodique, et (ii) estimation des premiers moments de la distribution marginale. Sur la base de cette approche, la notion de Seuil de Corrélation Spatiale (SCS) est introduite pour l'optimisation de la position des inspections. La largeur de l'intervalle de confiance et le niveau de confiance sont introduites comme deux contraintes pour l'optimisation du nombre d'inspections. En parallèle, une étude expérimentale a été réalisée sur une poutre en béton armé sur le site du laboratoire IFSTTAR de Nantes, France. Elle permet de réaliser la mesure de la teneur en eau dans le béton par la technique capacitive et de valider les résultats numériques de notre approche. L'influence de la variabilité spatiale et du bruit de mesure sont étudiés afin de quantifier les propriétés du champ stochastique. Le résultat expérimental confirme le rôle important de la variabilité spatiale dans le cadre de l'optimisation d'inspections in-situ.

**Mots clés :** *Optimisation d'inspections, Variabilité spatiale, Champ stochastique stationnaire, décomposition de Karhunen-Loève, Largeur d'intervalle confiance, Maximum de Vraisemblance, techniques de Contrôles Non Destructifs.*

## ABSTRACT

The aim of the present study is to optimize the on-site inspections by Non Destructive Testing (NDT) techniques in view of estimating the statistical parameters of the material property. Two approaches are proposed: a numerical approach and a validation through an experimental one. The numerical part presents an extension of the confidence intervals theory in the case of spatial variability: stationary Gaussian random field, 1D is considered. Our approach allows to find the minimum quantity of NDT measurements and their position for a given quality assessment under the influence of four types of uncertainties. A two stages procedure allows us (i) to quantify the properties of the ergodic, stationary field (ii) to assess the first moments of the marginal distribution of the property. On the basis of this approach, the concept of critical spatial correlation (SCS) is introduced for optimizing the inspection position. A larger confidence interval is presented in the case of spatial field with effect of correlation. In parallel, an experimental part is realized on a reinforced concrete beam at laboratory IFSTTAR-Nantes, France. It allows, not only to carry out the measurement of the water content in concrete by the capacitive technique, but also, to validate the numerical results of this approach. The influence of spatial variability and noise of measurement are studied to quantify the properties of the ergodic stochastic field. The experimental result shows the important role of spatial variability in terms of optimization of in-situ inspections.

**Keywords :** *Optimization inspections, Spatial variability, Stationary stochastic field, Karhunen-Loève Expansion, Larger confident interval, Maximal Likelihood, Non destructive Techniques.*



---

**LISTE DES PUBLICATIONS**

---

Les publications suivantes ont été préparées comme résultat de la thèse :

- **Tran T.V., Bastidas-Arteaga E., Schoefs F.** Probabilistic characterization of uncertainties and spatial variability of material properties from NDT measurements. *In: 21ème Congrès Français de Mécanique, Bordeaux, France. 2013. 6 pp.*
- **F. Schoefs, T.V. Tran.** Assessment of spatial variability of the corrosion of steel infrastructures from ultrasonic measurements: Application to coastal infrastructures. *In: 11th International Conference on Structural Safety & Reliability, ICOSSAR 11, New York, United States; 2013. p. 2697-2704.*
- **T.V. Tran, F. Schoefs, E. Bastidas-Arteaga, G. Villain, X. Derobert.** Optimization of geo-positioning of NDT measurements for modeling spatial field of defects: A two stages procedure. *In: 11th International Conference on Structural Safety & Reliability, ICOSSAR 11, New York, United States; 2013. p. 2689-2696.*
- **T.V. Tran, F. Schoefs, E. Bastidas-Arteaga.** Risk-based-optimization of geo-positioning of sensors in case of spatial fields of deterioration/properties. *In: 11th International Conference on Structural Safety & Reliability, ICOSSAR 11, New York, United States; 2013. p. 2521-2526.*
- **Tran T.V., Bastidas-Arteaga E., Schoefs F., Bonnet S., O'Connor A.J., Lanata F.** Structural reliability analysis of deteriorating RC bridges considering spatial variability. *In: 6th International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management, Stresa, Italy; 2012. 8 pp.*
- **Tran T.V., Schoefs F., Bastidas-Arteaga E., Villain G., Derobert X.** Optimisation de contrôles CND lors de l'auscultation d'un champ stationnaire de propriétés aléatoires. *In: 7èmes Journées Nationales de Fiabilité des Matériaux et des Structures JFMS, Chambéry, France, 2012. 13 pp.*
- **Tran T.V., Schoefs F., Bastidas-Arteaga E., Villain G., Derobert X.** Optimization of geo-positioning of sensors in case of spatial fields of deterioration/properties. *In: 5th European Conference on structural control, Genoa, Italy; 2012. 11 pp.*
- **Schoefs F., Tran T.V., Bastidas-Arteaga E.** Optimization of inspection and monitoring of structures in case of spatial fields of deterioration/properties. *In: 11th International Conference on Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering, ICAPS 11, Zurich, Switzerland; 2011. p. 2249-2256.*
- **Tran T.V., Bastidas-Arteaga E., Schoefs F.** Considération des champs spatiaux des propriétés du matériau dans l'optimisation de l'inspection et du contrôle des structures. *In: 20ème Congrès Français de Mécanique, Besançon, France. 2011. 6 pp.*



## TABLE DE MATIERES

RESUME .....	i
LISTE DES PUBLICATIONS.....	iii
TABLE DE MATIERES.....	v
LISTE DES FIGURES.....	ix
LISTE DES TABLEAUX.....	xviii
NOTATIONS.....	xix
INTRODUCTION GENERALE .....	1
Chapitre 1 REVUE BIBLIOGRAPHIQUE.....	7
1.1 Introduction.....	9
1.2 Sources d'incertitudes.....	9
1.2.1 Incertitude inhérente (intrinsèque).....	10
1.2.2 Incertitude de mesure .....	10
1.2.3 Incertitude naturelle.....	11
1.2.4 Incertitude de modélisation.....	11
1.3 Modélisation des incertitudes.....	12
1.3.1 Approche probabiliste.....	12
1.3.2 Champ aléatoire .....	13
1.3.2.1 Fonction de covariance .....	14
1.3.2.2 Fonction d'auto-corrélation.....	14
1.3.2.3 Champ homogène (stationnaire) .....	15
1.3.2.4 Champ aléatoire Gaussien .....	16
1.4 Intérêt d'une modélisation par un champ aléatoire.....	17
1.4.1 Méthode de représentation d'un champ aléatoire .....	18
1.4.1.1 La méthode du Midpoint (MP) .....	18
1.4.1.2 La méthode de la Moyenne Spatiale (SA).....	19
1.4.1.3 La méthode de l'Expansion Séries (SE).....	21
1.4.1.4 Remarques .....	22
1.4.2 Expansion de Karhunen-Loève .....	23
1.4.2.1 Modèle exponentiel.....	24
1.4.2.2 Modèle triangulaire : .....	25
1.4.2.3 Propriétés .....	26
1.4.2.4 Remarques .....	26
1.4.3 Approximation par Séries Orthogonales (OSE).....	27
1.4.4 Approximation EOLE .....	29



2.7.3	<i>Application numérique</i> .....	89
2.7.3.1	<i>Calibration des courbes d'optimisation du nombre d'inspections</i> .....	95
2.7.3.2	<i>Etude de sensibilité au coefficient de variation du champ (CoV)</i> .....	97
2.7.4	<i>Conclusions partielles</i> .....	99
2.8	<b>Conclusions</b> .....	99
Chapitre 3 <b>OPTIMISATION DE LA LOCALISATION ET DU NOMBRE D'INSPECTIONS : CAS</b>		
<b>D'UNE AUTOCORRELATION INCONNUE ET DE MESURES PARFAITES</b> .....		
103		
3.1	<b>Introduction</b> .....	105
3.2	<b>Problématique et hypothèses du cas d'étude 2</b> .....	106
3.3	<b>Estimation de la fonction d'auto-corrélation de la quantité d'intérêt</b> .....	108
3.3.1	<i>Pourquoi estimer la fonction d'auto-corrélation ?</i> .....	108
3.3.2	<i>L'auto-corrélation expérimentale</i> .....	108
3.3.3	<i>Estimation paramétrique d'un modèle d'auto-corrélation à partir de donnée</i> .....	109
3.3.3.1	<i>Méthode des Moindres Carrées</i> .....	109
3.3.3.2	<i>Méthode de Maximum de Vraisemblance</i> .....	111
3.3.4	<i>Conclusions partielles</i> .....	113
3.4	<b>Optimisation du paramètre d'auto-corrélation à partir de mesures in situ</b> .....	113
3.4.1	<i>Optimisation du positionnement d'inspections corrélées</i> .....	117
3.4.1.1	<i>Résultat numérique</i> .....	117
3.4.1.2	<i>Etude d'effet du paramètre d'auto-corrélation</i> .....	120
3.4.2	<i>Optimisation du nombre d'inspections pour l'estimation de la fonction d'auto-corrélation</i> .....	122
3.4.2.1	<i>Résultats numériques</i> .....	122
3.4.3	<i>Conclusions partielles</i> .....	124
3.5	<b>Optimisation du nombre d'inspections <math>N</math></b> .....	124
3.5.1	<i>Construction des simulations numériques</i> .....	125
3.5.2	<i>Etude de l'effet de <math>N_{s1}</math> sur les largeurs d'intervalles <math>\varepsilon_\mu</math> et <math>\varepsilon_\sigma</math></i> .....	126
3.5.2.1	<i>Résultats numériques</i> .....	128
3.5.2.2	<i>Etude de sensibilité de coefficient de variation du champ (CoV)</i> .....	130
3.5.3	<i>Optimisation du nombre total d'inspections <math>N</math></i> .....	131
3.5.4	<i>Conclusions partielles</i> .....	134
3.6	<b>Conclusions</b> .....	134
Chapitre 4 <b>OPTIMISATION DE LA LOCALISATION ET DU NOMBRE D'INSPECTIONS : CAS DE</b>		
<b>MESURES IMPARFAITES</b> .....		
137		
4.1	<b>Introduction</b> .....	139
4.2	<b>Configuration de la problématique et hypothèses</b> .....	140
4.3	<b>Modélisation du champ stochastique stationnaire bruité</b> .....	141
4.3.1	<i>Modélisation de bruit des mesures</i> .....	141
4.3.2	<i>Modélisation du champ stochastique stationnaire bruitée</i> .....	142
4.3.3	<i>Conclusions partielles</i> .....	144
4.4	<b>Fonction objectif pour une campagne d'inspections d'un champ stationnaire bruité</b> .....	145

4.4.1	<b>Configuration 3.1 : mesures bruités sans pré-traitement</b> .....	145
4.4.1.1	Construction des simulations numériques .....	145
4.4.1.2	Résultats numériques .....	145
4.4.1.3	Remarque.....	149
4.4.2	<b>Configuration 3.2 : pré-traitement des mesures répétées en un point (moyenne des mesures de répétitivité)</b> .....	151
4.4.2.1	Construction des simulations numériques .....	151
4.4.2.2	Résultats numériques .....	155
4.4.2.2.1	Cas d'étude avec auto-corrélation connue .....	156
4.4.2.2.2	Cas d'étude avec auto-corrélation inconnue.....	160
4.4.2.3	Remarques .....	163
4.4.3	<b>Conclusions partielles</b> .....	163
4.5	<b>Conclusions</b> .....	164
Chapitre 5 APPLICATION SUR UN CAS REEL: POUTRE EN BETON ARME.....		167
5.1	<b>Introduction</b> .....	169
5.2	<b>Organisation d'étude expérimentale</b> .....	169
5.2.1	Configuration de l'inspection <i>in-situ</i> .....	169
5.2.2	Technique Capacitive .....	170
5.2.3	Donnée expérimentales.....	172
5.3	<b>Identification du champ stochastique stationnaire de la teneur en eau (W)</b> .....	173
5.4	<b>Optimisation d'inspections</b> .....	177
5.4.1	<b>Cas de mesures parfaites</b> .....	177
5.4.1.1	Corrélation connue.....	178
5.4.1.2	Corrélation inconnue.....	181
5.4.2	<b>Cas de mesures imparfaites</b> .....	186
5.4.2.1	Mesures sans pré-traitement .....	186
5.4.2.2	Mesures avec pré-traitement .....	188
5.4.3	<b>Conclusions partielles</b> .....	192
5.5	<b>Conclusions</b> .....	192
<b>CONCLUSIONS GENERALES</b> .....		195
<b>REFERENCES</b> .....		201

## LISTE DES FIGURES

<b>Figure 0.1:</b> <i>Différentes conditions d'inspection des ouvrages de génie civil.</i> .....	3
<b>Figure 0.2:</b> <i>Illustration de l'objectif de la thèse</i> .....	5
<b>Figure 1.1:</b> <i>Les sources d'incertitudes de la propriété du sol estimé [source Kulhwy, 1992 p.101]</i> .....	10
<b>Figure 1.2:</b> <i>Schéma de la représentation du champ aléatoire.</i> .....	15
<b>Figure 1.3:</b> <i>Synthèse des fonctions d'auto-corrélation pour le champ aléatoire Gaussien.</i> .....	17
<b>Figure 1.4:</b> <i>Description de la méthode de Midpoint [Der Kiureghian et Ke, 1988]</i> .....	19
<b>Figure 1.5:</b> <i>Description de la méthode de la Moyenne Spatiale [Vanmarcke et Grigorui, 1983]</i> .....	20
<b>Figure 1.6:</b> <i>Comparaison d'erreur de la méthode MP et SA [d'après Li et Der Kiureghian, 1993] : (i) type d'exponentielle de la fonction d'auto-corrélation, (ii) type d'exponentielle carrée de la fonction d'auto-corrélation.</i> .....	23
<b>Figure 1.7:</b> <i>L'approximation de l'expansion de Karhunen-Loève (fonction d'auto-corrélation de type exponentielle : longueur de corrélation <math>b=1m</math>; <math>\mu_Z = 8.5, \sigma_Z = 1</math>).</i> .....	27
<b>Figure 1.8:</b> <i>Comparaison d'erreur de la méthode SE et EOLE [d'après Li et Der Kiureghian, 1993]</i> .....	30
<b>Figure 1.9:</b> <i>Comparaison d'erreur de la méthode KL, OSE et EOLE [d'après Li et Der Kiureghian, 1993] : (i)- estimation par expériences ponctuelles, (ii)-l'erreur de la moyenne de la variance</i> .....	31
<b>Figure 1.10:</b> <i>Illustration de l'auto-covariance en fonction de <math>\Delta x</math>.</i> .....	33
<b>Figure 1.11:</b> <i>Illustration de la fonction d'auto-covariance d'un champ aléatoire de la propriété d'intérêt sous forme de série temporelle [D'après Davis, 1986] à évolution: (i)- constante, (ii)- linéaire, (ii)- sinusoïdale, et (iv)- sinusoïdale en ajoutant le bruit.</i> .....	34
<b>Figure 1.12:</b> <i>Illustration des cas expérimentaux utilisés par Li (2004b).</i> .....	37
<b>Figure 1.13:</b> <i>Effet de la variabilité spatiale sur l'augmentation du pourcentage de la probabilité de défaillance à 50 ans [Stewart, 2004]</i> .....	38
<b>Figure 1.14:</b> <i>Effet de la variabilité spatiale sur la probabilité de défaillance à 50 ans [Stewart et Al-Harthy, 2008]</i> .....	39
<b>Figure 1.15:</b> <i>Effet de la variabilité spatiale sur la probabilité de défaillance [Darmawan and Stewart, 2007]</i> ...39	
<b>Figure 1.16:</b> <i>La fonction d'auto-corrélation à partir de mesure de teneur en eau : (i) – superficielle la couche, (ii)- profondeur du couche [Valdez-Llamas, 2003].</i> .....	43
<b>Figure 1.17:</b> <i>Effet de la variabilité spatiale sur la probabilité de défaillance du facteur sécurité [Griffiths et Fenton, 2000].</i> .....	44
<b>Figure 1.18:</b> <i>Effet de la variabilité spatiale sur la probabilité de défaillance de la facteur sécurité de la pente d'un talus [Cho, 2007]</i> .....	45

<b>Figure 1.19:</b> Effet de la variabilité spatiale sur la probabilité de défaillance capacité résistant [Cho et Park, 2009].....	45
<b>Figure 1.20:</b> Effet de la variabilité spatiale sur l'indice de la fiabilité d'un tuyau enterré [Elachachi et al, 2012].....	46
<b>Figure 1.21:</b> Effet de la variabilité spatiale sur la probabilité de défaillance du pieu [Fan et Liang, 2013]. ....	46
<b>Figure 1.22:</b> Sensibilité des largeurs d'intervalle ( $\varepsilon_{\mu}^{th}$ , $\varepsilon_{\sigma}^{th}$ ) en fonction de la taille de l'échantillon n. ....	53
<b>Figure 1.23</b> Facteurs qui influencent la qualité des inspections in-situ .....	54
<b>Figure 1.24 :</b> Configuration de l'influence de l'environnement et aléas naturels sur l'inspection sur la poutre in situ .....	55
<b>Figure 1.25 :</b> Description de la problématique générale et organisation de la thèse .....	57
<b>Figure 2.1:</b> Configuration du cas d'étude 1 (mesure parfaite, corrélation connue).....	62
<b>Figure 2.2:</b> Description problématique possibles pour le cas d'étude 1 (mesure parfaite, corrélation connue) ..	63
<b>Figure 2.3:</b> Evaluation de la fonction d'auto-corrélation de la concentration en ions chlorure [Kenshel, 2009; O'Connor et al, 2013] .....	65
<b>Figure 2.4:</b> Evaluation de la fonction d'auto-corrélation des propriétés du sol [Jaksa et al, 2000] .....	65
<b>Figure 2.5:</b> L'influence du nombre de termes n nécessaires à la convergence de la variance de l'expansion de Karhuene-Loève: (i)- d'après Huang et al, 2001 ; (ii)- d'après Stefanou et Papadrakakis, 2007 .....	66
<b>Figure 2.6:</b> (a)- détermination de la distance minimale entre inspections $L_c$ ; (b)- sensibilité du paramètre b sur le niveau de corrélation (forme d'exponentielle) [ $L=16m$ ] .....	67
<b>Figure 2.7:</b> Evaluation des paramètres du champ stochastique à partir des données très corrélées et faiblement corrélées. ....	67
<b>Figure 2.8:</b> Minimisation du nombre d'inspection [Buslov et al, 2001- structure maritime] .....	70
<b>Figure 2.9:</b> Représente de la variabilité spatiale de la quantité d'intérêt Z.....	72
<b>Figure 2.10:</b> Description d'évaluation de la probabilité de l'inspection .....	74
<b>Figure 2.11:</b> Evaluation de l'échelle de fluctuation à partir de mesures in situ de propriétés du sol [Jaksa et al, 2000].....	76
<b>Figure 2.12:</b> Description d'évaluation de la large intervalle sensibilité du $SCS_c$ .....	76
<b>Figure 2.13:</b> Description de l'évaluation de la distribution après l'inspection pour la détermination du seuil $SCS_c$ .....	77
<b>Figure 2.14:</b> La sensibilité de largeur de l'intervalle avec du $\rho_0$ .....	78
<b>Figure 2.15:</b> Sensibilité de $\varepsilon_{\mu}$ avec $\rho_0$ :(i) avec $N=60$ mesures ;(ii) avec $N=100$ mesures .....	80
<b>Figure 2.16:</b> Sensibilité de $\varepsilon_{\sigma}$ avec $\rho_0$ :(i) avec $N=60$ mesures ;(ii) avec $N=100$ mesures .....	80
<b>Figure 2.17:</b> Comparaison des résultats et choix la valeur $SCS_c$ : (i)- moyenne ; (ii)-écart-type .....	81
<b>Figure 2.18:</b> Sensibilité de $\varepsilon_{\mu}$ avec $\rho_0$ pour une structure de petite dimension ( $p_a^{\mu}=95\%$ , $N=20$ mesures) .....	82

<b>Figure 2.19:</b> Sensibilité de $\varepsilon_\sigma$ avec $\rho_0$ pour une structure de petite dimension ( $p_a^\sigma=95\%$ , $N=20$ mesures) .....	83
<b>Figure 2.20:</b> Influence du paramètre d'auto-corrélation sur $\varepsilon_\mu$ ( $p_a^\mu=95\%$ , $N=20$ mesures).....	83
<b>Figure 2.21:</b> Influence du paramètre d'auto-corrélation sur $\varepsilon_\sigma$ ( $p_a^\sigma=95\%$ , $N=20$ mesures).....	84
<b>Figure 2.22:</b> Configuration de la problématique d'optimisation du nombre d'inspections .....	86
<b>Figure 2.23:</b> Evaluation numérique de la largeur de l'intervalle avec le nombre d'inspections $N_i$ et $N_s$ assurant des mesures faiblement corrélées et le niveau confiance $p_a = 95\%$ ( $N_s=5 :80$ ; $N_i=1 :30$ ).....	87
<b>Figure 2.24:</b> Calibration de la courbe reliant les nombre d'inspections $N_i$ et $N_s$ assurant le niveau confiance $p_a^\Gamma=95\%$ à largeur d'intervalle fixée. ....	88
<b>Figure 2.25:</b> Courbe d'optimisation du nombre d'inspections $N_{opt}$ assurant le niveau confiance $p_a^\Gamma=95\%$ à largeur d'intervalle $\varepsilon_i^\alpha$ fixée. ....	88
<b>Figure 2.26:</b> Valeur de $\varepsilon_\mu$ accessibles en fonction du nombre d'inspections $N_i$ et $N_s$ .....	90
<b>Figure 2.27:</b> Valeur de $\varepsilon_\sigma$ accessibles en fonction du nombre d'inspections $N_i$ et $N_s$ .....	91
<b>Figure 2.28:</b> Comparaison de notre résultat avec la valeur théorique pour $p_a^\mu=p_a^\sigma=95\%$ : (i)- moyenne; (ii)- écart-type. ....	93
<b>Figure 2.29:</b> Influence du niveau confiance ( $p_a^\mu, p_a^\sigma$ ) sur les coefficients $\beta_1$ et $\beta_1'$ .....	94
<b>Figure 2.30:</b> Approximation numériques de la largeur de l'intervalle pour le cas de $p_a^\mu=p_a^\sigma=95\%$ : (i)- Moyenne ; (ii)-Ecart-type .....	95
<b>Figure 2.31:</b> Courbe optimale du nombre d'inspections $N_i$ et $N_s$ pour $\varepsilon_\mu=5\%$ .....	95
<b>Figure 2.32:</b> Courbe optimale du nombre d'inspections $N_i$ et $N_s$ pour $\varepsilon_\sigma=20\%$ .....	96
<b>Figure 2.33:</b> Courbe d'optimisation du nombre d'inspections $N_{opt}$ ( $p_a^\mu = p_a^\sigma = 95\%$ ) .....	96
<b>Figure 2.34:</b> Influence une CoV sur $\varepsilon_\sigma$ pour $p_a^\sigma=95\%$ (i) et 90% (ii).....	98
<b>Figure 2.35:</b> Influence une CoV sur $\varepsilon_\mu$ pour $p_a^\mu=95\%$ (i) et 90% (ii).....	98
<b>Figure 2.36:</b> Relation entre $\varepsilon_\mu$ et CoV pour (i): $p_a^\mu=95\%$ et (ii ):90%. ....	99
<b>Figure 2.37:</b> Description de l'algorithme du problème pour le cas d'étude 1 .....	101
<b>Figure 3.1:</b> Evaluation de la fonction d'auto-corrélation à partir des données.....	105
<b>Figure 3.2:</b> Configuration du cas d'étude 2 (mesure parfaite, corrélation inconnue) .....	106
<b>Figure 3.3:</b> Description des problématiques possibles pour le cas d'étude 2 (mesure parfaite, corrélation inconnue) .....	107
<b>Figure 3.4:</b> Auto-corrélation expérimentale de la teneur en eau dans le béton (IFSSTAR, France).....	109
<b>Figure 3.5:</b> Auto-corrélation expérimentale des propriétés du sol [Zhang et al, 2008].....	109
<b>Figure 3.6:</b> Evaluation de la fonction d'auto-corrélation de la porosité du sable meuble à partir des mesures in-situ par la méthode de Moindres carrés [Zhang et al, 2008]. ....	110
<b>Figure 3.7:</b> Evaluation de la fonction d'auto-corrélation de la teneur en eau dans le béton à partir des mesures in-situ par la méthode Moindres carrés.....	111

<b>Figure 3.8:</b> <i>Evaluation de la fonction d'auto-corrélation de la teneur en eau dans le béton à partir des mesures in-situ par méthode Maximum de Vraisemblance.</i> .....	113
<b>Figure 3.9:</b> <i>Effet du paramètre d'auto-corrélation sur la modélisation du champ stochastique</i> .....	114
<b>Figure 3.10:</b> <i>Effet du paramètre d'auto-corrélation sur la fiabilité de la pente d'un talus [Ji et al, 2012].</i> .....	114
<b>Figure 3.11:</b> <i>Description de l'estimation du paramètre d'auto-corrélation <math>b</math> à partir des mesures in-situ par la méthode du Maximum de Vraisemblance.</i> .....	115
<b>Figure 3.12:</b> <i>Description du problème d'évaluation de <math>b</math>.</i> .....	117
<b>Figure 3.13:</b> <i>Description du problème d'optimisation du positionnement d'inspections corrélées.</i> .....	118
<b>Figure 3.14:</b> <i>Effet de <math>\rho_0</math> sur la variabilité de <math>b_z</math> (<math>N_{s1}=100</math> mesures).</i> .....	118
<b>Figure 3.15:</b> <i>Sensibilité de la valeur moyenne du <math>b</math> estimé (<math>\mu_{\hat{b}}</math>) avec la <math>\rho_0</math>.</i> .....	119
<b>Figure 3.16:</b> <i>Sensibilité de la valeur écart-type du <math>b</math> estimé (<math>\sigma_{\hat{b}}</math>) avec la <math>\rho_0</math>.</i> .....	119
<b>Figure 3.17:</b> <i>Effet de la <math>\rho_0</math> sur la probabilité de l'intervalle confiance <math>P_{1,2}^b</math> du <math>b</math> estimé (<math>\varepsilon_a^{\mu}=10\%</math>).</i> .....	120
<b>Figure 3.18:</b> <i>Effet de la <math>\rho_0</math> sur la valeur moyenne du <math>b</math> estimé <math>\mu_{\hat{b}}</math> (sensibilité du <math>b^{th}</math>).</i> .....	121
<b>Figure 3.19:</b> <i>Effet de la <math>\rho_0</math> sur la probabilité <math>P_{1,2}^b</math> (sensibilité du <math>b^{th}</math>, <math>\varepsilon_b^{\alpha}=10\%</math>).</i> .....	121
<b>Figure 3.20:</b> <i>Description du problème optimisation du nombre d'inspections corrélée <math>N_{s1}</math>.</i> .....	123
<b>Figure 3.21:</b> <i>Effet de la <math>N_{s1}</math> sur la valeur moyenne du <math>b</math> estimé (<math>\mu_{\hat{b}}</math>).</i> .....	123
<b>Figure 3.22:</b> <i>Effet de la <math>N_{s1}</math> sur la probabilité <math>P_{1,2}^b</math> (<math>\varepsilon_a^{\mu}=10\%</math>).</i> .....	124
<b>Figure 3.23:</b> <i>Effet du <math>b</math> estimé sur la distance entre inspections <math>L_c</math> (<math>b_{th}=1m</math>, <math>SCS_b=0.5</math>, <math>N_{s1}=100</math>).</i> .....	125
<b>Figure 3.24:</b> <i>Description du problème d'évaluation de la largeur de l'intervalle dans le cas de l'auto-corrélation inconnue (<math>b</math> variable).</i> .....	127
<b>Figure 3.25:</b> <i>Evaluation numérique de la largeur de l'intervalle avec le nombre d'inspections <math>N_t</math> et <math>N_s</math> pour <math>p_a=95\%</math> (<math>N_s=5 : 80</math>; <math>N_t=1 : 30</math>; <math>N_{s1}</math> et <math>b</math> inconnue)</i> .....	127
<b>Figure 3.26:</b> <i>Description de l'analyse de l'effet de <math>N_{s1}</math> sur la largeur de l'intervalle.</i> .....	128
<b>Figure 3.27:</b> <i>Synthèse des valeurs numérique de <math>\varepsilon_{\mu}</math> dans cas les <math>b</math> connu et <math>b</math> inconnu.</i> .....	129
<b>Figure 3.28:</b> <i>Synthèse des valeurs numérique de <math>\varepsilon_{\sigma}</math> dans cas les <math>b</math> connu et <math>b</math> inconnu.</i> .....	129
<b>Figure 3.29:</b> <i>Influence de <math>N_{s1}</math> sur les largeurs d'intervalles (<math>N_s=50</math> mesures) : (i)-moyenne, (ii)-écart-type.</i> .....	129
<b>Figure 3.30:</b> <i>Influence de <math>N_{s1}</math> sur les coefficients <math>\beta_i</math> : (i)-moyenne, (i)-écart-type</i> .....	130
<b>Figure 3.31:</b> <i>Influence de CoV sur la largeur de l'intervalle <math>\varepsilon_{\mu}</math> dans le cas d'auto-corrélation inconnue.</i> .....	130
<b>Figure 3.32:</b> <i>Relation entre <math>\varepsilon_{\mu}</math> et CoV dans le cas d'auto-corrélation inconnue (<math>N_t=1</math>).</i> .....	131
<b>Figure 3.33:</b> <i>Influence de CoV sur la largeur de l'intervalle <math>\varepsilon_{\sigma}</math> dans le cas d'auto-corrélation inconnue.</i> .....	131
<b>Figure 3.34:</b> <i>Effet de <math>N_{s1}</math> sur la calibration de la relation entre le nombre d'inspection <math>N_t</math> et <math>N_s</math> : (i)- moyenne (<math>\varepsilon_{\mu}=5\%</math>), (ii)- écart-type (<math>\varepsilon_{\sigma}=20\%</math>).</i> .....	132

<b>Figure 3.35:</b> Effet de $N_{s1}$ sur le nombre d'inspections $N_s$ dans le cas $N_t=4$ : (i)- moyenne ( $\varepsilon_\mu=5\%$ ), (ii)- écart-type ( $\varepsilon_\sigma=20\%$ ).....	132
<b>Figure 3.36:</b> Effet de $N_{s1}$ sur la courbe d'optimisation du nombre d'inspections $N$ : (i)-moyenne ( $\varepsilon_\mu=5\%$ ), (ii)- écart-type ( $\varepsilon_\sigma=20\%$ ).....	133
<b>Figure 3.37:</b> Effet de $N_{s1}$ sur le nombre d'inspections $N_{opt}$ : (i)- moyenne ( $\varepsilon_\mu=5\%$ ), (ii)- écart-type ( $\varepsilon_\sigma=20\%$ ).....	133
<b>Figure 3.38:</b> Description de l'algorithme du problème pour le cas d'étude 2 .....	136
<b>Figure 4.1:</b> Description des deux problématiques possibles pour le chapitre (mesure imparfaite) .....	141
<b>Figure 4.2:</b> Distributions des signaux et bruit (erreur): (i) - à $-1m$ de profondeur; (ii)-à $+1m$ de profondeur [Adapté de Schoefs et al, 2007b]. .....	142
<b>Figure 4.3:</b> Illustration de la modélisation du champ bruitée de la quantité d'intérêt $Z^*$ .....	143
<b>Figure 4.4:</b> Reconstruction avec données bruitées ( $\sigma_\eta = 10\%$ ): évolution des champs reconstruit et de synthèse au niveau des capteurs [Nassiopoulos, 2008] .....	144
<b>Figure 4.5:</b> Description du problème de la configuration 3.1.....	147
<b>Figure 4.6:</b> Sensibilité des $\varepsilon_\mu$ et $\varepsilon_\sigma$ en fonction de $N_s$ et $N_p$ ( $N_t=1$ , $\sigma_\eta=0,75\sigma_z$ ): (i)-moyenne, (ii)- écart-type... ..	148
<b>Figure 4.7:</b> Effet de la $N_p$ sur $\varepsilon_\mu$ et $\varepsilon_\sigma$ ( $\sigma_\eta=0,75\sigma_z$ ): (i)-moyenne, (ii)- écart-type.....	150
<b>Figure 4.8:</b> Effet du bruit de mesure sur $\varepsilon_\mu$ et $\varepsilon_\sigma$ ( $N_s=5$ ): (i)-moyenne, (ii)- écart-type.....	151
<b>Figure 4.9:</b> Description de la première étape: répétition d'inspections.....	153
<b>Figure 4.10:</b> Description du problème de la configuration 3.2.....	155
<b>Figure 4.11:</b> Synthèse des valeurs numériques des largeurs d'intervalles pour les casde mesurse bruités et parfaites ( $\sigma_\eta=\sigma_z$ , $N_t=1$ , $b$ connue): (i)- moyenne et (ii)- écart-type.....	156
<b>Figure 4.12:</b> Influence du $N_p$ sur les largeurs d'intervalles ( $\sigma_\eta=\sigma_z$ , $N_t=1$ , $N_s=20$ , $b$ connue): (i)-moyenne et (ii)- écart-type.....	157
<b>Figure 4.13:</b> Synthèse des valeurs numériques des largeurs d'intervalles pour les cas inspections avec bruit de mesure et parfaite ( $N_t=1$ , $N_p=5$ , $b$ connue): (i)- moyenne et (ii)- écart-type.....	157
<b>Figure 4.14:</b> Influence de $N_p$ sur les largeurs d'intervalles ( $N_t=1$ , $N_s=20$ , $b$ connue): (i)-moyenne et (ii)- écart-type.....	158
<b>Figure 4.15:</b> Influence de $N_p$ sur l'optimisation du nombre d'inspections $N$ ( $\sigma_\eta=\sigma_z$ , $b$ connue): (i)-moyenne ( $\varepsilon_\mu=5\%$ ), (ii)- écart-type ( $\varepsilon_\sigma=20\%$ ).....	158
<b>Figure 4.16:</b> Influence de $N_p$ sur le nombre d'inspections $N_{opt}$ ( $\sigma_\eta=\sigma_z$ , $b$ connu): (i)-moyenne ( $\varepsilon_\mu=5\%$ ), (ii)- écart-type ( $\varepsilon_\sigma=20\%$ ).....	159
<b>Figure 4.17:</b> Influence de l'écart-type du bruit sur la courbe d'optimisation du nombre d'inspections $N$ ( $N_p=10$ , $b$ connue): (i)-moyenne ( $\varepsilon_\mu=5\%$ ), (ii)- écart-type ( $\varepsilon_\sigma=20\%$ ).....	159
<b>Figure 4.18:</b> Influence du bruit de mesure sur l'estimation de l'auto-corrélation ( $\sigma_\eta=\sigma_z$ , $N_t=1$ , $b$ inconnue): (i)- effet de $N_{s1}$ (ii)- effet de $N_p$ ( $N_{s1}=60$ ).....	160

<b>Figure 4.19:</b> Synthèse des valeurs numériques des $\mu_b$ pour les cas de mesure bruitées et parfaites ( $\sigma_\eta = \sigma_Z$ , $N_t = 1$ , $N_p = 10$ , $b$ inconnu): (i)- effet de $N_{s1}$ (ii)- effet de $-N_p$ ( $N_{s1} = 60$ ). .....	161
<b>Figure 4.20:</b> Synthèse des valeurs numériques des largeurs d'intervalles pour les cas de mesures bruitées et parfaites ( $\sigma_\eta = \sigma_Z$ , $N_t = 1$ , $N_{s1} = 60$ , $b$ inconnu) : (i)- moyenne et (ii)- écart-type. ....	161
<b>Figure 4.21:</b> Effet de la $N_p$ sur les largeurs d'intervalles ( $\sigma_\eta = \sigma_Z$ , $N_t = 1$ , $N_{s1} = 60$ , $b$ inconnue) : (i)-moyenne et (ii)- écart-type. ....	162
<b>Figure 4.22:</b> Influence du $N_p$ sur la courbe d'optimisation du nombre d'inspections $N$ ( $\sigma_\eta = \sigma_Z$ , $N_t = 1$ , $N_{s1} = 60$ , $b$ inconnue) : (i)-moyenne ( $\varepsilon_\mu = 5\%$ ), (i)- écart-type ( $\varepsilon_\sigma = 20\%$ ). ....	162
<b>Figure 5. 1 :</b> Configuration d'inspections de la teneur en eau dans la poutre en béton armé .....	170
<b>Figure 5.2 :</b> Matériel de la technique CAPA [Villain et al. 2012]. ....	171
<b>Figure 5.3 :</b> Courbe de calibration de la technique CAPA au niveau de petite électrode (6cm profondeur inspecté) [Villain et al. 2012]. ....	171
<b>Figure 5.4 :</b> Distribution Gaussienne de répétition sur point inspecté (à position 12m sur ligne A, date 28/11/2011). ....	172
<b>Figure 5.5 :</b> Trajectoire expérimentale de la teneur en eau ( $W$ ) dans la poutre : (i) date : 28/03/2011, (ii) date : 01/03/2012. ....	173
<b>Figure 5.6:</b> Evaluation des distributions de la teneur en eau ( $W$ ) : (i) date : 28/03/2011, (ii) date : 01/03/2012 .....	174
<b>Figure 5.7:</b> Evaluation de la fonction d'auto-corrélation de la teneur en eau ( $W$ ) : (i) date : 28/03/2011, (ii) date : 01/03/2012. ....	175
<b>Figure 5.8:</b> Variation de l'erreur de mesures en fonction de spatiale (Ligne A, date-28/11/2011). ....	176
<b>Figure 5.9:</b> Evaluation l'écart-type de bruit de la teneur en eau ( $W$ ) : (i) date : 28/03/2011, (ii) date : 01/03/2012. ....	176
<b>Figure 5.10:</b> Evaluations des largeurs d'intervalles numériques de la teneur en eau ( $\varepsilon_\mu$ , $\varepsilon_\sigma$ ) . ....	178
<b>Figure 5.11:</b> Configuration d'estimation de la moyenne et de l'écart-type de $\widehat{W}$ . ....	179
<b>Figure 5.12:</b> Estimation de la moyenne et de l'écart-type de $\widehat{W}$ ( $N_s = 13$ , et 16 mesures). ....	179
<b>Figure 5.13 :</b> Confirmation notre approche pour d'estimation des paramètres du champ $W$ : (i) Moyenne, (ii) Ecart-type. ....	181
<b>Figure 5.14:</b> Valeurs estimées du paramètre d'auto-corrélation ( $b_W$ ) du $\widehat{W}$ . ....	182
<b>Figure 5.15:</b> Confirmation notre approche pour l'estimation de paramètre d'auto-corrélation du champ $\widehat{W}$ . ....	182
<b>Figure 5.16 :</b> Effet du $N_{s1}$ sur l'estimation des paramètres du champ $W$ : (i) Moyenne, (ii) Ecart-type. ....	184
<b>Figure 5.17 :</b> Confirmation notre approche pour d'estimation des paramètres du champ $W$ dans le cas d'auto-corrélation inconnue ( $N_{s1} = 35$ , $p_a^H = p_a^G = 95\%$ ): (i) Moyenne, (ii) Ecart-type. ....	185
<b>Figure 5.18 :</b> Confirmation d'effet du $N_p$ sur notre approche de l'estimation des paramètres du champ bruité $W^*$ (cas mesures non-traitement): (i) Moyenne ( $N_s = 13$ ), (ii) Ecart-type ( $N_s = 16$ ). ....	187

<b>Figure 5.19:</b> Confirmation d'effet du $N_p$ sur notre approche de l'estimation du paramètre d'auto-corrélation du champ bruité $W^*(N_{sI}=35)$ . .....	188
<b>Figure 5.20 :</b> Confirmation l'effet du $N_p$ sur notre approche de l'estimation des paramètres du champ bruité $W^*(N_{sI}=35, p_a^\mu = p_a^\sigma = 95\%)$ : (i) Moyenne ( $N_s=13$ ), (ii) Ecart-type ( $N_s=16$ ). .....	190
<b>Figure 5.21 :</b> Confirmation notre approche pour l'estimation des paramètres du champ bruité $W^*$ ( $N_p=5, N_{sI}=35, \sigma_\eta = 0,78$ et $p_a^\mu = p_a^\sigma = 95\%$ ) : (i) Moyenne, (ii) Ecart-type. ....	191



## LIST DES TABLEAUX

<b>Tableau 1.1:</b> <i>Fonction de la masse et propre basé unifié la méthode MP, SA</i> .....	22
<b>Tableau 1.2:</b> <i>Forme de la fonction d'auto-corrélation [Vanmarcke, 1977]</i> .....	35
<b>Tableau 1.3:</b> <i>Résultats de l'échelle de fluctuation reportés dans la littérature.</i> .....	37
<b>Tableau 1.4:</b> <i>Résultats de l'échelle de fluctuation et type de la fonction d'auto-corrélation des sols reportés dans la littératures [Cité par Jaksa (1995)].</i> .....	40
<b>Tableau 1.5:</b> <i>Résultats de l'échelle de fluctuation et type de la fonction d'auto-corrélation des sols [après Phoon and Kulhawy (1996, 1999)]</i> .....	42
<b>Tableau 2.1:</b> <i>Valeurs théoriques de <math>\varepsilon_{\mu}^{th}</math> et <math>\varepsilon_{\sigma}^{th}</math>.</i> .....	79
<b>Tableau 2.2:</b> <i>Coefficients des fonctions de largeur intervalle <math>\varepsilon_{\mu}</math> et <math>\varepsilon_{\sigma}</math></i> .....	94
<b>Tableau 5.1 :</b> <i>Les paramètres du champ stochastique de la teneur en eau <math>W</math></i> .....	175
<b>Tableau 5.2 :</b> <i>La distance entre l'inspections <math>L_c</math> et <math>N_s^{max}</math></i> .....	177



## NOTATIONS

### Lettre Latines

	Français	Anglais
$C_{ZZ}(\cdot, \cdot)$	Fonction d'auto-covariance	Auto-covariance function
$COV[\cdot]$	Coefficient de variation	Coefficient of variation
$E[\cdot]$	Espérance de la variable aléatoire	Esperance of the random variable
$F_b, F_a$	Fréquence mesure obtenue directement par la technique CAPA	Measurement frequency obtain directly by CAPA technique
$F_X(x)$	Fonction de répartition de la variable aléatoire $X$	cumulative distribution function of the random variable $X$
$L_c$	Distance entre inspections	Distance between inspections
$N$	Nombre totale d'inspections	Number of inspections total
$N_p$	Nombre de répétitions de l'inspection	Number of repetition of the inspections
$N_s$	Nombre d'inspections sur un composant	Number of measurement in each component
$N_{s,l}$	Nombre d'inspections corrélées	Number of inspections correlated
$N_t$	Nombre de composants	Number of components
$N_{opt}$	Nombre totale d'inspections optimisée	Number of inspections total optimal
$N_{opt}^\mu$	Nombre d'inspections optimisés pour la moyenne	Number of inspections optimal for the mean of $\hat{Z}$
$N_{opt}^\sigma$	Nombre d'inspections optimisés pour l'écart-type	Number of inspections optimal for the standard deviation of $\hat{Z}$
$P[\cdot]$	Probabilité d'occurrence d'un évènement	Probability of event
$P_{1,2}^\Gamma$	Probabilité dans l'intervalle de $\hat{Z}$	Probability in interval of $\hat{Z}$
$P_{1,2}^b$	Probabilité dans l'intervalle de paramètre d'auto-corrélation de $\hat{Z}$	Probability in interval for the auto-correlation parameter of $\hat{Z}$
$P_{1,2}^\mu$	Probabilité dans l'intervalle de la moyenne de $\hat{Z}$	Probability in interval for the mean of $\hat{Z}$
$P_{1,2}^\sigma$	Probabilité dans l'intervalle de l'écart-type de $\hat{Z}$	Probability in interval for the standard deviation of $\hat{Z}$
$SCS_b$	Seuil de Corrélation Spatiale de mesures corrélées	Spatial correlation threshold of correlated measures

	Français	Anglais
$SCS_c$	Seuil de Corrélacion Spatiale critique	Spatial correlation threshold critical
$Var(X)$	Variance de la variable aléatoire $X$	Variance of the random variable
$W$	Teneur en eau dans le béton	Water content in concrete
$X, Y$	Variable aléatoire de réalisations possibles $x_i, y_i$	Random variable of the realization possible $x_i, y_i$
$Z(x, \theta)$	Champ stochastique	Stochastic field
$\hat{Z}$	Vecteur des $\hat{z}_i$	Vector of $\hat{z}_i$
$\hat{z}_i$	$i^{ème}$ valeur mesuré après inspections	Measurement $i^{th}$ after inspection
$Z^*(x, \theta)$	Champ stochastique bruitée	Stochastic field noise
$\hat{Z}^*$	Champ stochastique bruité d'inspections	Stochastic field noise inspection
$\hat{z}^*$	Valeur mesuré bruité d'inspections	Measurement noise inspection value
$b$	Paramètre d'auto-corrélacion	Auto-correlation parameter
$b^{th}$	Paramètre d'auto-corrélacion théorique	Auto-correlation parameter theory
$b_Z$	Estimateur du paramètre d'auto-corrélacion de $\hat{Z}$	Parameter auto-correlation estimator of $\hat{Z}$
$b_W$	Paramètre d'auto-corrélacion de $W$	Parameter auto-correlation of $W$
$f_i$	Fonction propre	Eigenfunction
$f_X(x)$	Densité de la probabilité	Probability density
$n$	Nombre de termes de l'expansion de Karhunen-Loève tronquée	Number of terms of the truncated Karhunen-Loève expansion
$p_a^f$	Probabilité minimum acceptable	Minimum acceptable probability
$p_a^\mu$	Probabilité minimum acceptable pour la moyenne	Minimum acceptable probability for the mean
$p_a^\sigma$	Probabilité minimum acceptable pour l'écart-type	Minimum acceptable probability for the standard deviation
$t_{1-\alpha/2}$	Fractile d'ordre $(1 - \alpha/2)$ de la loi Student	Critical value for the Student distribution with n-1 degrees of freedom at $(1 - \alpha/2)$ ordre
$u_{1-\alpha/2}$	Fractile d'ordre $(1 - \alpha/2)$ de la loi normale centrée	Critical value for the standard normal distribution with n-1 degrees of freedom at $(1 - \alpha/2)$ ordre

## Symboles Grecs

	Français	Anglais
$\Gamma$	Paramètre qui représente la quantité stochastique d'intérêt	Parameter represent the quality of interest stochastic
$\Phi(\cdot)$	Fonction de répartition de la loi normale centrée réduite	Cumulative distribution function of the standard normal distribution
$\Phi^{-1}(\cdot)$	Inverse de la fonction de répartition de la loi normale centrée réduite	Cumulative distribution function inverse of the standard normal distribution
$1 - \alpha$	Niveau de confiance	Confidence level
$\beta_i$ et $\beta'_i$	Coefficients en fonction du niveau confiance ( $p_a^\mu, p_a^\sigma$ )	Coefficient according to confidence level ( $p_a^\mu, p_a^\sigma$ )
$\varepsilon_\Gamma^a$	Ecart admissible du paramètre $\Gamma$	Deviation admissible of the parameter $\Gamma$
$\varepsilon_b^a$	Largeur de l'intervalle de confiance admissible pour le paramètre d'auto-corrélation	Confidence interval width admissible for the auto-correlation parameter
$\varepsilon_\mu$	Largeur d'intervalle de $\hat{Z}$ pour la moyenne	Interval width of $\hat{Z}$ for the mean
$\varepsilon_\mu^a$	Largeur de l'intervalle de confiance admissible pour la moyenne	Confidence interval width admissible for the mean
$\varepsilon_\mu^{th}$	Largeur d'intervalle théorique de la moyenne	Interval width theory of the mean
$\varepsilon_\sigma$	Largeur d'intervalle de $\hat{Z}$ pour l'écart-type	Interval width of $\hat{Z}$ for the standard deviation
$\varepsilon_\sigma^a$	Largeur de l'intervalle de confiance admissible pour l'écart-type	Confidence interval width admissible for the standard deviation
$\varepsilon_\sigma^{th}$	Largeur d'intervalle théorique de l'écart-type	Interval width theory of the standard deviation
$\eta$	Bruit de mesure	Noise measurement
$\theta$	Aléa	Hazard
$\lambda_i$	valeur propre	Eigenvalue
$\mu(X)$	Moyenne de la variable aléatoire $X$	Mean of the random variable $X$
$\mu_Z$	Moyenne de $Z$	Mean of $Z$
$\mu_{\hat{Z}^*}$	Estimateurs moyenne de $\widehat{Z}^*$	Mean estimator of $\widehat{Z}^*$
$\mu_{\hat{Z}}$	Estimateurs moyenne de $\hat{Z}$	Mean estimator of $\hat{Z}$
$\mu_{\hat{Z}}^*$	Valeur moyenne des hyper-paramètres de $\hat{Z}$	Mean of the hyper-parameter of $\hat{Z}$

	Français	Anglais
$\mu_b$	Moyenne de $b_Z$	Mean of $b_Z$
$\mu_W$	Moyenne de la teneur en eau $W$	Mean of the water content $W$
$\mu_Z$	Moyenne du champ stochastique $Z$	Mean of the stochastic field $Z$
$\xi_i(\theta)$	Variable aléatoire gaussien centrée réduite	Standard random variable
$\hat{\rho}(\Delta x)$	Fonction d'auto-corrélation expérimentale	Auto-correlation experimental function
$\rho_{ZZ}(x, x')$	Fonction d'auto-corrélation	Auto-correlation function
$\rho_0$	Coefficient d'auto-corrélation	Auto-correlation coefficient
$\sigma(X)$	Ecart-type de la variable aléatoire $X$	Standard deviation of the random variable
$\sigma_Z$	Ecart-type du champ stochastique $Z$	Standard deviation of the stochastic field $Z$
$\sigma_{Z^*}$	Estimateurs l'écart-type de $\widehat{Z^*}$	Standard deviation estimator of $\widehat{Z^*}$
$\sigma_{\hat{Z}}$	Estimateurs l'écart-type de $\hat{Z}$	Standard deviation estimator of $\hat{Z}$
$\sigma_{\hat{Z}}^*$	Valeur l'écart-type des hyper-paramètres de $\hat{Z}$	Standard deviation of the hyper-parameter of $\hat{Z}$
$\sigma_b$	Ecart-type de $b_Z$	Standard deviation of $b_Z$
$\sigma_W$	Ecart-type de la teneur en eau $W$	Standard deviation of the water content $W$
$\sigma_\eta$	Ecart-type de bruit	Standard deviation of noise
$\chi^2_{\alpha/2}$	Fractile d'ordre $\alpha/2$ de la loi $\chi^2$	Critical value for the $\chi^2$ distribution with $n-1$ degrees of freedom at $(\alpha/2)$ ordre
$\Delta\epsilon_\mu$	Erreur relative de largeur d'intervalle pour la moyenne	Relative error of the interval width for the mean of $Z$
$\Delta\epsilon_\sigma$	Erreur relative de largeur d'intervalle pour l'écart-type	Relative error of the interval width for the standard deviation of $Z$
$\Delta\epsilon_\mu^1, \Delta\epsilon_\sigma^1$	Index d'effet de la variabilité spatiale sur largeur d'intervalle	Index of the effect of the spatial variability on interval width
$\Delta\epsilon_\mu^2, \Delta\epsilon_\sigma^2$	Index d'effet de la variabilité du paramètre d'auto-corrélation sur largeur d'intervalle	Index of the effect of the variability of the parameter auto-correlation on interval width
$\Delta\epsilon_\mu^3, \Delta\epsilon_\sigma^3$	Index d'effet de la mesure imparfaite sur largeur d'intervalle	Index of the effect of the imperfect measures on interval width
$\Delta\eta$	Ecart entre les valeurs d'inspection bruitée et non bruitée	Deviation between noise inspections value and perfect inspections

*“ Je ne veux pas du chemin où se traînent les pas de la foule ”*

Callimaque [Epigrammes, XXVIII, 1-2]

