

Ecole doctorale n° 398 : Géosciences et Ressources Naturelles

## Doctorat ParisTech

# THÈSE

pour obtenir le grade de docteur délivré par

**l'École nationale supérieure des mines de Paris**

**Spécialité "Géostatistique"**

*présentée et soutenue publiquement par*

**Yvon DESNOYERS**

le 21 décembre 2010

**Approche méthodologique pour la caractérisation géostatistique des contaminations radiologiques dans les installations nucléaires**

Directeur de thèse : **Jean-Paul CHILES**

### Jury

**M. Francis MEILLIEZ**, Professeur, Université de Lille 1  
**M. Bertrand IOOSS**, Ingénieur recherche, HDR, EDF R&D  
**M. Philippe RENARD**, Professeur, Université de Neuchâtel  
**M. Jean-Paul CHILÈS**, Directeur de recherche associé, HDR, MINES ParisTech  
**Mme Hélène DEMOUGEOT-RENARD**, Consultant, Indépendant  
**M. Didier DUBOT**, Chef de la section assainissement du site, CEA  
**Mme Chantal de FOUQUET**, Maître de recherche, HDR, MINES ParisTech  
**M. Nicolas JEANNÉE**, Directeur Etudes & Formations, GEOVARIANCES

Président  
Rapporteur  
Rapporteur  
Examineur  
Examineur  
Examineur  
Examineur  
Examineur



# Table des matières

<b>INTRODUCTION .....</b>	<b>1</b>
<b>PREMIERE PARTIE : LA CATEGORISATION RADIOLOGIQUE PAR GEOSTATISTIQUE .....</b>	<b>7</b>
<b>Chapitre 1 : Mise en place d'une méthodologie de catégorisation .....</b>	<b>9</b>
I. Cadre réglementaire français du démantèlement .....	9
I.1. Cadre réglementaire des années 1990 .....	11
I.2. Autorisation unique de déclassement de 2003 .....	12
I.3. Nouveau cadre réglementaire de 2006 .....	14
I.4. Gestion des déchets .....	15
II. Méthodologie d'assainissement complet des structures de génie civil .....	16
II.1. Mise en place du « Zonage déchets » .....	16
II.2. Méthodologies d'assainissement complet acceptables .....	17
II.3. Méthodologie déployée par le CEA .....	20
II.4. Retour d'expérience des opérations d'assainissement du génie civil .....	22
III. Nouvelle approche de catégorisation .....	24
III.1. Problématique de l'échantillonnage et de la mesure .....	24
III.2. Moyens d'investigation radiologique .....	28
III.3. Méthodologie de caractérisation .....	30
<b>Chapitre 2 : Site d'étude et campagne de mesures non destructives .....</b>	<b>35</b>
I. Présentation de l'atelier D des ATUE .....	35
I.1. Analyse historique et fonctionnelle .....	36
I.2. Caractérisation radiologique réalisée par le projet .....	39
I.3. Limitations d'une telle caractérisation .....	40
I.4. Difficultés rencontrées par le projet .....	40
II. Campagne de mesures non destructives .....	42
II.1. A la recherche de l'uranium ! .....	43
II.2. Mesures par spectrométrie gamma in situ .....	45
II.3. Mesures surfaciques du signal émergent .....	47

<b>Chapitre 3 : Analyse exploratoire et variographique.....</b>	<b>49</b>
I. Analyse exploratoire de la campagne de mesures .....	49
I.1. Mesures surfaciques.....	49
I.2. Mesures par spectrométrie gamma in situ .....	54
II. Analyse variographique des mesures $\beta\gamma$ .....	57
II.1. Construction du variogramme .....	58
II.2. Mise en place de la géostatistique non linéaire.....	62
II.3. Analyse variographique des mesures par spectrométrie gamma in situ.....	68
 <b>Chapitre 4 : Cartographies et analyse de risque .....</b>	 <b>71</b>
I. Cartographies d'estimation par krigeage .....	71
I.1. Estimateurs utilisés en géostatistique .....	71
I.2. Cartographies ponctuelles d'estimation .....	75
II. Analyse de risque .....	78
II.1. Risque de dépassement par espérance conditionnelle .....	79
II.2. Utilisation des simulations géostatistiques.....	81
 <b>Chapitre 5 : Approche multivariable .....</b>	 <b>85</b>
I. Présentation de la campagne de prélèvements destructifs .....	85
I.1. Cinq zones témoins au préalable .....	86
I.2. Campagne complète de prélèvements .....	87
II. Traitement multivariable .....	89
II.1. Analyse variographique conjointe .....	89
II.2. Construction du cokrigeage.....	92
II.3. Cartographies et analyse de risque .....	93
III. Axes à poursuivre pour une approche 3D.....	99
 <b>DEUXIEME PARTIE : OPTIMISATION DE L'ECHANTILLONNAGE... 101</b>	
 <b>Chapitre 6 : Densité de l'échantillonnage.....</b>	 <b>103</b>
I. Dégradation du jeu des données $\beta\gamma$ .....	103
I.1. Présentation des sous-ensembles de données .....	103
I.2. Appréciation de la distribution statistique .....	105
I.3. Evaluation de la structure spatiale .....	106
II. Cartographies et analyse de risque .....	108
II.1. Ré-estimations aux points de mesure.....	108
II.2. Impact sur les cartographies .....	110
II.3. Impact sur l'évaluation des surfaces .....	111
III. Dégradation aléatoire .....	113
III.1. Présentation des 4 scénarios aléatoires .....	113
III.2. Analyse variographique.....	113
III.3. Cartographies et analyse de risque .....	114
IV. Vers une démarche itérative .....	115
 <b>Chapitre 7 : Inventaire des structures spatiales.....</b>	 <b>117</b>
I. Campagnes de mesures dans les ATUE .....	117
I.1. Influence de la voie de transfert dans l'atelier D.....	117
I.2. Données complémentaires dans l'atelier D .....	119

I.3. Autres ateliers de l'installation.....	122
II. Autres données disponibles .....	125
II.1. Campagnes de mesures exhaustives .....	125
II.2. Echantillonnage partiel de grandes zones.....	127
III. Synthèse des structures spatiales.....	128
III.1. Bilan des données des campagnes de cartographie .....	128
III.2. Allure générale des variogrammes.....	129
III.3. Remarques complémentaires.....	130
III.4. Réflexions sur l'optimisation de l'échantillonnage.....	132
<b>TROISIEME PARTIE : AXES DE RECHERCHE SPECIFIQUES.....</b>	<b>135</b>
<b>Chapitre 8 : Tests de sensibilité aux paramètres géostatistiques .....</b>	<b>137</b>
I. Influence des parois pour le calcul du variogramme .....	137
II. Modélisation de l'effet de pépite sur le variogramme .....	139
II.1. Ré-estimation des données surfaciques .....	139
II.2. Incidence sur les résultats d'analyse de risque .....	141
III. Modélisation par anamorphose gaussienne .....	142
III.1. Développement en polynômes d'Hermite.....	143
III.2. Utilisation préliminaire d'une transformation logarithme.....	145
III.3. Modélisation des valeurs fortes.....	145
III.4. Modélisation conjointe aux points communs de données.....	147
<b>Chapitre 9 : Structuration des valeurs extrêmes .....</b>	<b>149</b>
I. Vérification de l'hypothèse multigaussienne .....	149
I.1. Rappel du contexte.....	149
I.2. Tests de l'hypothèse bigaussienne .....	150
II. Présentation des modèles isofactoriels .....	152
II.1. Krigeage disjonctif en modèle isofactoriel .....	152
II.2. Cas particulier des facteurs polynomiaux.....	153
II.3. Structuration des valeurs extrêmes en modèle bêta.....	153
II.4. Apports des modèles isofactoriels .....	155
III. Application des modèles isofactoriels .....	156
III.1. Modèle hermitien.....	156
III.2. Modèle de Laguerre .....	159
III.3. Synthèse.....	163
<b>CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES .....</b>	<b>165</b>
<b>REFERENCES .....</b>	<b>169</b>



# Introduction

## *Des installations nucléaires à assainir*

La radioactivité naturelle a été découverte par Henri Becquerel en 1896. En 1934, ce fut le tour de la radioactivité artificielle par Irène et Frédéric Joliot-Curie. Depuis, le secteur nucléaire s'est considérablement développé dans le monde entier, avec de nombreuses applications dans la production d'électricité, la propulsion navale, la production d'isotopes radioactifs pour l'industrie et aussi la médecine, sans compter les applications militaires. Cette industrie a conduit à de multiples pollutions radiologiques dans ses installations ainsi que dans l'environnement. Nous reviennent en mémoire les bombardements d'Hiroshima et de Nagasaki en 1945, les essais nucléaires atmosphériques, l'accident de la centrale de Tchernobyl en 1986, etc. Les contaminations radiologiques dans les installations nucléaires existent et relèvent de l'exploitation industrielle « classique » d'installations : centrales de production d'électricité, installations du cycle du combustible, réacteurs expérimentaux, installations pour la production d'armes atomiques, etc.

Depuis une trentaine d'années en France, de nouvelles contraintes de reconversion de sites nucléaires et d'installations arrivées en fin de vie ainsi que le poids de l'opinion publique et les modifications de la réglementation ont fait évoluer la volonté d'assainir complètement ces installations. Un nouveau métier s'est alors développé dans le nucléaire, celui du démantèlement. De nombreuses installations sont en cours de démantèlement ou l'ont été récemment. Cela conduit à une organisation de plus en plus industrielle de ces projets notamment grâce à la forte évolution des techniques de décontamination ainsi que par la mise en application des résultats de nombreux projets de recherche associés.

L'industrie nucléaire s'était jusqu'alors principalement préoccupée de la construction de ses installations et de leur exploitation ; il lui faut désormais gérer leur fin de vie, ce qui implique leur démantèlement mais également la gestion des déchets issus des opérations d'assainissement. Cette dernière étape est incontournable pour que la filière nucléaire puisse prétendre maîtriser l'intégralité de son cycle et conserver sa crédibilité.

Les travaux d'assainissement et de démantèlement des Installations Nucléaires de Base (INB) doivent alors gérer des contaminations résiduelles présentes dans les procédés, les canalisations, les systèmes de ventilation continue ainsi que dans le reste des installations. Ce travail de recherche porte sur les structures de génie civil, principalement composées de bétons, qui ont connu divers événements contaminants : dépôts d'aérosols radioactifs, débordements de cuve, fuites, etc. Les phénomènes d'activation des bétons (des noyaux stables deviennent radioactifs sous l'effet de

rayonnements ionisants) sont en revanche écartés de cette réflexion puisque le processus de pollution diffère fortement de celui qui intervient pour les contaminations.

Les projets d'assainissement et de démantèlement requièrent la connaissance la plus précise possible de la contamination en place et doivent tenir compte d'objectifs multiples lors de l'évaluation radiologique : évaluation des niveaux d'activité moyens pour permettre la catégorisation des surfaces (classification en différentes catégories de déchets nucléaires), localisation des points chauds (zones de petite dimension avec des niveaux d'activité importants), estimation du terme source (activité totale) contenu dans l'installation ou dans les structures.

De nombreuses estimations sont donc indispensables pour la bonne conduite de ces projets. Actuellement, elles restent souvent très empiriques malgré les moyens techniques et les efforts financiers mis en œuvre. Les approximations accumulées ont trop souvent de lourdes conséquences sur la gestion des projets de démantèlement. Nombre d'entre eux doivent, par exemple, gérer des profondeurs de migration ou des niveaux d'activité largement sous-estimés, ce qui entraîne des arrêts de chantier très pénalisants en ce qui concerne les coûts et les délais, avec un risque non négligeable de dépasser largement les budgets initiaux (les coûts globaux de démantèlement de chaque installation peuvent facilement atteindre des dizaines voire des centaines de millions d'euros). Dans les cas les plus critiques, le projet dans sa globalité peut être entièrement remis en cause en cas de non respect de la date de fin des travaux imposée dans le décret de démantèlement, ce qui se traduit par l'obligation de relancer les études de faisabilité, les enquêtes publiques, les marchés d'attribution des travaux, etc.

Inversement, une connaissance trop approximative de l'étendue de la contamination conduit souvent les responsables de projets à adopter des hypothèses très conservatives pour la classification des déchets nucléaires, ce qui entraîne une sur-catégorisation très fréquente des déchets, faute de pouvoir correctement évaluer les niveaux d'activité. Cette sur-catégorisation se traduit par un surcoût important qui n'est que très rarement pris en compte pour l'optimisation globale du projet alors qu'elle en représente une large part. Il y a en effet au moins un facteur 10 en ce qui concerne les coûts entre une catégorie de déchets et la catégorie supérieure sensée accueillir des déchets plus contaminés. De plus, les exutoires (centres de stockage), qui sont désormais considérés comme une ressource rare, sont partiellement remplis de colis qui auraient pu être orientés dans la filière inférieure. Il faut alors tenir compte de tous les coûts de prise en charge des déchets et de suivi de l'entreposage dans le temps qui se rajoutent inutilement du fait de cette sur-catégorisation.

### ***Des contaminations radiologiques à caractériser***

Les contaminations radiologiques dans les installations nucléaires sont généralement complexes et les paramètres nombreux : isotopie, voie de transfert, nature du support contaminé, présence d'un revêtement imperméable intègre, etc. La modélisation s'en trouve d'autant plus difficile même si quelques tentatives pour appréhender les profils de migration ont été menées. A ce titre, des retours d'expérience ont pu être établis sur les profondeurs de migration par exemple, mais ils semblent conclure que chaque cas est vraiment particulier, ce qui nécessite une modélisation ad hoc pour chaque installation, voire plusieurs pour la même installation. La portée et l'utilisation de tels retours d'expérience s'en trouvent alors très limitées.

La caractérisation de la contamination est traditionnellement fondée sur la connaissance de l'historique de l'installation complétée par des prélèvements, souvent sous la forme de carottages.

La réalisation des inventaires historiques se heurte alors au problème de leur exhaustivité avec notamment des phases de vie oubliées ou des événements non tracés. Il se peut parfois que les informations historiques soient totalement indisponibles pour certains sites dits orphelins : c'est le cas, par exemple, des industries du début du XX<sup>e</sup> siècle autour du radium, dont les activités ont cessé depuis bien longtemps et dont certains sites contaminés ont été laissés en l'état. Se pose également la question de la représentativité des prélèvements collectés, souvent positionnés au jugé, sur la base des connaissances historiques. L'interprétation de l'ensemble de ces informations et de ces données est alors délicate et conduit souvent à des erreurs de diagnostic de la contamination.

En ce qui concerne les structures de génie civil, la maîtrise des projets de démantèlement nécessite ainsi de pouvoir déterminer des choix d'assainissement sur une description objective de l'état de la contamination. La limitation des risques, ou des « aléas » pour reprendre la terminologie employée par les projets de démantèlement, liés à une interprétation subjective et potentiellement erronée des données et de leur contexte est au cœur d'enjeux tant financiers que temporels et doit faire l'objet de la plus grande attention. Ainsi, les évaluations radiologiques sous-estiment généralement l'importance des incertitudes et des niveaux de confiance associés aux mesures comme aux estimations. Parfois quantifiés, ils le sont sur des hypothèses maximalistes ou au contraire ils sont largement sous-estimés faute de campagnes d'investigations pertinentes apportant les informations nécessaires. A une certaine époque, la gestion des travaux d'assainissement avec un « pilotage par la mesure » a pu conduire à des dérives et à de très mauvais résultats.

La problématique de la caractérisation de la contamination « sur pied » des structures de génie civil est donc l'une des étapes-clés pour le bon déroulement des projets de démantèlement des installations nucléaires. Ce besoin d'un diagnostic initial fiable et sur lequel s'appuient fortement les choix des projets d'assainissement, s'inscrit dans le cadre plus général de leur maîtrise financière ainsi que sur l'optimisation de la production des déchets nucléaires. En bref, l'objectif est d'envoyer le déchet radiologique dans la filière de traitement adaptée.

La phase de caractérisation des déchets doit ainsi être rationalisée et permettre la mise en place d'un échantillonnage pertinent. Or, les investigations ont également un coût : coût de réalisation du prélèvement avec les contraintes qu'impose la radioprotection dans les installations nucléaires, auquel s'ajoute le coût de la mesure pouvant atteindre quelques centaines d'euros en fonction du radionucléide recherché. C'est, par conséquent, toute la stratégie d'échantillonnage qui doit être réfléchie et optimisée afin de limiter les prélèvements superflus et les mesures inutiles.

### ***La géostatistique pour progresser dans la caractérisation radiologique***

L'apport de ce travail méthodologique passe par l'utilisation de la géostatistique. Ce cadre d'analyse et de traitement de données est récent, non dans son existence, mais dans son application aux contaminations radiologiques dans les installations nucléaires. En effet, cette approche est avantageusement employée depuis plus de 50 ans par l'industrie minière pour l'estimation des ressources, puis a été reprise par le secteur pétrolier pour la caractérisation des réservoirs et étendue depuis quelques dizaines d'années à des problématiques environnementales comme l'hydrogéologie, la qualité de l'air, la pédologie, l'halieutique, etc. De plus, elle a déjà fait ses preuves sur des pollutions conventionnelles (métaux lourds, hydrocarbures) comme radiologiques pour les sites et sols pollués tandis qu'elle n'a encore jamais été appliquée aux installations nucléaires.

La géostatistique s'intéresse à décrire des phénomènes structurés dans l'espace, éventuellement dans le temps, et à quantifier les incertitudes d'estimation, qu'elles soient globales ou locales. Les estimations sont faites à partir d'un échantillonnage fragmentaire et permettent de dresser différentes représentations de la contamination, la première d'entre elles étant la cartographie de la grandeur étudiée. S'arrêter à ce résultat serait cependant réducteur puisque la puissance et la valeur ajoutée de la géostatistique résident dans sa capacité à quantifier les incertitudes d'estimation et à fournir des analyses de risque permettant des prises de décision fondées sur des résultats pertinents et fiables.

La géostatistique est largement appliquée pour l'analyse et la valorisation de données, via la réalisation d'estimations et de cartographies. Elle peut également être employée pour rationaliser les données à collecter, principalement leur nombre et leur position. Il est alors envisageable de mettre en place des approches séquentielles d'investigation permettant, à chaque étape, d'optimiser et de répartir spatialement les données complémentaires à collecter dans le but d'atteindre les différents objectifs d'évaluation en fonction du degré de précision souhaité.

### ***Les objectifs de la thèse***

Les travaux présentés se proposent de vérifier la pertinence et la valeur ajoutée de l'utilisation de la géostatistique pour la caractérisation des contaminations radiologiques des structures de génie civil dans les installations nucléaires en démantèlement. Cette analyse des niveaux d'activités se fera naturellement par la mise en place d'une stratégie d'échantillonnage qui se verra la mieux adaptée possible au processus de traitement des données et qui tiendra bien évidemment compte des spécificités du phénomène étudié et de la métrologie employée. La méthodologie d'investigation ainsi élaborée se veut une approche innovante de catégorisation des déchets nucléaires en place et une démarche rationnelle et optimisée pour la réussite des projets d'assainissement dans leur ensemble.

Ainsi un partenariat fort s'est naturellement constitué pour mener à bien ce projet avec le Centre de Géostatistique de MINES ParisTech pour le volet académique, la société GEOVARIANCES, éditrice de solutions logicielles de géostatistique et qui héberge cette thèse Cifre, et le CEA (Commissariat à l'Énergie Atomique) pour ses installations en cours de démantèlement. Cette thèse de recherche possède donc une forte composante industrielle compte tenu des enjeux et des attentes des différents partenaires du projet.

### ***Organisation et esprit du mémoire***

La première partie du mémoire porte sur la mise en place d'une méthodologie de catégorisation d'une installation nucléaire en cours de démantèlement. L'approche proposée met à profit le traitement des données par géostatistique et cette démarche est principalement illustrée sur une campagne de grande envergure constituée de mesures non destructives. Cette phase est intermédiaire entre l'analyse historique et la réalisation des prélèvements destructifs et est souvent négligée ou sous-utilisée. Toutes les étapes du traitement par géostatistique sont abordées dans cette première partie, de l'analyse exploratoire et variographique des données, afin de mettre en évidence la structure spatiale de la contamination, jusqu'aux cartographies d'analyse de risque qui sont les outils d'aide à la décision proposés pour catégoriser le béton des structures de génie civil. La mise en œuvre de cette chaîne de traitement vise à illustrer la méthodologie et les outils géostatistiques sur un cas d'application spécifique et concret : la contamination radiologique de struc-

tures de génie civil. Elle propose également de tirer le maximum d'enseignements sur la manière dont doit être préparée et réfléchie une campagne d'investigations.

La seconde partie s'intéresse à l'optimisation de la stratégie d'échantillonnage pour la campagne de mesures in situ. La compréhension de la structure spatiale de la contamination est un élément clé pour le traitement de données par géostatistique. L'effet de la dégradation de la maille d'investigation sur les différents résultats est évalué. Le retour d'expérience permet alors de dresser un inventaire des structures spatiales des contaminations radiologiques présentes dans les structures de génie civil des installations nucléaires.

Enfin, la troisième partie s'intéresse plus particulièrement à différentes questions plus théoriques identifiées lors de la première partie : tests de sensibilité vis-à-vis de la modélisation des distributions statistiques et des variogrammes expérimentaux, ainsi que comparaison de modèles isofactoriels pour modéliser de manière appropriée des données très contrastées.

Ainsi, plusieurs axes thématiques de lecture sont disponibles pour le lecteur en fonction de ses intérêts. Nous espérons pouvoir donner des recommandations pertinentes d'échantillonnage aux entreprises en charge de la réalisation des mesures et des prélèvements, une méthodologie d'analyse et de traitement de données par géostatistique pour l'ingénieur chargé de réaliser l'inventaire radiologique, apporter une démarche d'investigation structurée et des outils d'aide à la décision au chef de projet quant à la catégorisation des déchets de son installation, fournir au théoricien un nouveau champ d'application de la géostatistique avec des problématiques de métrologie et une complexité de modélisation du phénomène. De plus, certaines parties introductives sont volontairement présentées dans le corps du document pour permettre une meilleure compréhension de tous, même s'il ne s'agira que de rappels pour certains.

L'application de la géostatistique à des données relatives à des contaminations radiologiques des installations nucléaires met en évidence un certain nombre d'axes de recherche. Certains sont abordés à travers ce travail, d'autres sont encore à approfondir. Cette première thèse en géostatistique appliquée à la catégorisation radiologique des installations nucléaires en phase de démantèlement se veut surtout pragmatique, en proposant une méthodologie complète de caractérisation des contaminations radiologiques et une réflexion portant sur l'optimisation de l'échantillonnage.



# Conclusions et perspectives

« Combien de mesures et de prélèvements doit-on réaliser ? » C'est en substance la question récurrente des chefs de projet d'assainissement et de démantèlement pour dresser l'état radiologique initial des structures de génie civil d'une installation nucléaire. Cette caractérisation conditionne la réussite de ces projets de grande envergure, tant d'un point de vue de la gestion et de l'optimisation des déchets nucléaires produits, que de leur bon déroulement technique, temporel, et bien évidemment financier.

Deux réponses caricaturales peuvent être apportées. La première consiste à ne faire ni mesure ni prélèvement. Le hasard décidera, pour le projet, des niveaux de contamination présents et des éventuels problèmes qui surgiront. La seconde nécessite de réaliser des prélèvements absolument partout, pour chaque gramme de béton. De ce fait, la campagne de caractérisation tient également lieu de travaux d'assainissement.

Entre ces deux stratégies caricaturales, à l'aveugle pour la première, extrêmement longue et onéreuse pour la seconde, il faut trouver un juste milieu. Dans cette optique, des bonnes pratiques sont à rechercher et ce travail explore l'apport de la géostatistique pour le dimensionnement des campagnes d'échantillonnage afin de caractériser les bétons à assainir dans les installations nucléaires en démantèlement.

## *La géostatistique au service de la caractérisation radiologique*

La structure spatiale de la contamination radiologique, mise en évidence de façon systématique, rend l'utilisation de la géostatistique utile et pertinente. Par l'analyse et l'utilisation de la corrélation spatiale entre les données pour estimer des grandeurs ponctuelles ou globales, la géostatistique peut avantageusement être déployée pour l'évaluation de la contamination en place, avant les travaux d'assainissement des structures de génie civil. Elle se distingue ainsi des statistiques classiques, utilisées en fin d'assainissement afin de valider l'atteinte d'un objectif de propreté (vérification de conformité).

La méthodologie de caractérisation mise en place repose sur une approche séquentielle organisée en trois étapes consécutives : (i) **analyse historique et fonctionnelle**, sur la base d'une analyse documentaire et de témoignages d'anciens opérateurs, (ii) **cartographie du signal émergent**, par l'emploi de mesures in situ non destructives et usuellement semi-quantitatives, qui fournit une spatialisation du signal émergent (dans le cas où celui-ci est mesurable) et (iii) **caractérisation**

**des niveaux d'activité et des profondeurs de pénétration**, grâce à la réalisation de prélèvements analysés en laboratoire.

Les trois étapes ont, bien sûr, chacune leur importance. Cependant, la méthodologie proposée vient particulièrement exploiter les données non destructives, réalisées avec des dispositifs courants de mesure, notamment utilisés pour la radioprotection. Ces cartographies du signal émergent sont souvent négligées, faute de pouvoir traiter correctement les données. S'arrêter au report des valeurs mesurées dans un tableau en fin de document, ce que l'on observe encore souvent, est totalement insuffisant : ce qui devrait être le prélude à un travail poussé d'analyse des mesures, riche d'enseignements, s'arrête à un constat brut, peu exploitable.

Le traitement géostatistique permet de valoriser les données collectées dans un cadre d'analyse rigoureux, ayant largement fait ses preuves dans d'autres domaines. Les cartographies obtenues intègrent ainsi l'ensemble des informations disponibles afin de fournir aux chefs de projet des outils pertinents d'aide à la décision, présentés en fonction de seuils d'activité, de supports d'assainissement, de niveaux de confiance. C'est le cas notamment des cartographies qui fournissent le risque de dépassement, à l'échelle d'un local, d'un seuil radiologique fixé, ou encore la quantification du terme source présent, par son estimation et l'intervalle de confiance associé.

La gamme des méthodes géostatistiques utilisées dans le cadre de cette méthodologie de caractérisation est large : *analyse exploratoire et variographique* pour identifier des points singuliers et mettre en évidence la structure spatiale, estimation par *krigeage*, *krigeage disjonctif* ou *espérance conditionnelle* pour fournir des cartographies de la grandeur étudiée, utilisation de *simulations conditionnelles* pour réaliser des analyses de risque tant locales que globales et, enfin, traitement *multivariable* pour exploiter le lien entre les mesures de signal émergent et les prélèvements destructifs. La problématique du changement de support est également un point fort, même si elle n'a été qu'entra-perçue ici avec les modèles isofactoriels et lors de l'analyse de risque avec les simulations conditionnelles.

La géostatistique peut ainsi être utilisée comme un formidable intégrateur d'informations. Faire parler les données permet alors une meilleure compréhension du phénomène. De ce fait, la géostatistique vient compléter la connaissance initiale vis-à-vis de la contamination radiologique, en fournissant des outils d'analyse et de représentation adaptés. Généralement, la géostatistique aide à répondre à de nombreuses questions et en pose autant en retour. Mais ce ne sont, bien sûr, plus les mêmes : de l'interrogation « Où est la contamination ? », l'analyse des données conduit à « Quel est le support d'assainissement ? » ou bien « Quel est le niveau de risque acceptable ? ».

### ***Optimisation de l'échantillonnage***

Concernant le nombre de mesures et de prélèvements, il est avant tout fondamental de rappeler qu'une stratégie d'échantillonnage doit être dimensionnée en rapport avec les objectifs d'évaluation. Dans le cadre de la caractérisation de contaminations radiologiques dans les installations nucléaires, une réponse simple est impossible puisque ces objectifs sont généralement multiples : évaluation du terme source, cartographies pour plusieurs seuils d'activité, pour différents supports d'évaluation, etc.

Il est nécessaire de collecter des données pour répondre, en utilisant la géostatistique ou non, à ces problématiques d'évaluation radiologique et potentiellement de quantification des incertitudes. Il est illusoire de caractériser une installation entière en utilisant seulement les résultats d'analyse de quelques prélèvements !

La structure spatiale du phénomène, observée par l'intermédiaire du variogramme, est indispensable pour la mise en œuvre de la géostatistique. Un inventaire des structures observées sur divers bétons contaminés dans des installations nucléaires a été établi pour les cartographies de signal émergent (mesures non destructives). Il permet de dresser une synthèse pouvant affecter la stratégie d'échantillonnage à mettre en œuvre et fournissant un certain nombre de recommandations. Les structures présentent généralement une faible variabilité à l'origine, puis une augmentation de la variabilité jusqu'à une distance de l'ordre de trois à cinq mètres, au-delà de laquelle elle se stabilise. C'est la dimension caractéristique des contaminations radiologiques, en surface, en cohérence avec la réalité physique du phénomène. De ce fait, la maille d'échantillonnage de la grille régulière doit, au minimum, capturer la structure spatiale et donc se situer aux alentours du mètre, voire en-dessous.

La simplicité de l'actualisation du traitement géostatistique des données permet d'employer une approche itérative au sein de chaque étape de caractérisation : utilisation d'une maille large puis resserrement des points de données dans les zones d'intérêt identifiées après le premier traitement des données, etc. Cette mise à jour des résultats et des cartographies conduit à une certaine réactivité dans le pilotage de la campagne de caractérisation dans l'optique de rationaliser et d'optimiser le nombre et la localisation des mesures pour répondre au mieux aux objectifs d'évaluation.

A cela s'ajoute la pertinence du traitement multivariable qui, en intégrant les données historiques et les mesures surfaciques, permet d'optimiser le nombre de prélèvements (et d'analyse en laboratoire) et de les répartir efficacement. Ainsi, il est nécessaire d'investiguer les points les plus contaminés pour limiter les incertitudes sur le terme source. Cependant, il faut se garder de sur-échantillonner les zones contaminées et de délaissier complètement les zones supposées sans contamination. En effet, comme le bilan coût-bénéfice porte généralement sur des niveaux d'activité relativement faibles (critère de propreté, limite entre déchets TFA et FMA), le risque est de manquer d'informations dans les zones faiblement contaminées, pourtant déterminantes pour délimiter correctement la contamination et permettre d'optimiser la production des déchets.

### ***Aspects méthodologiques***

L'utilisation de la géostatistique pour la caractérisation des installations nucléaires en démantèlement a mis en évidence différents problèmes plus théoriques liés aux spécificités des contaminations radiologiques : modélisation de la distribution statistique très dissymétrique, modélisation de l'effet de pépite du variogramme, etc.

L'utilisation de modèles isofactoriels, afin de tenir compte de la structuration des valeurs extrêmes, a montré des différences d'estimation faibles en krigeage disjonctif par rapport au cadre gaussien. Ainsi, les outils déployés en modèle multigaussien peuvent être raisonnablement utilisés, même si l'hypothèse bi-gaussienne n'est pas tout à fait respectée. Il serait cependant pertinent de poursuivre cette analyse avec des données présentant une structuration plus marquée.

### ***Perspectives***

Le support d'estimation a été partiellement abordé mais celui de la mesure n'a, pour le moment, pas été approfondi. Les aspects de métrologie et de qualité des données ont toute leur importance puisque le traitement géostatistique se base sur les mesures et les résultats d'analyse. Des comparaisons entre plusieurs sondes de surfaces différentes, également utilisées dans des configu-

rations diverses (principalement en regardant la distance à la surface mesurée, la présence d'une collimation) permettraient d'adapter les dispositifs employés. De la même manière, l'influence du support de l'échantillon destructif doit être regardée en fonction des techniques et des coûts de prélèvement : quasiment ponctuel par carottage, il peut être réalisé sur plusieurs dizaines de cm<sup>2</sup> par bouchardage.

L'atelier D des ATUE a permis de mettre en place une méthodologie de caractérisation essentiellement pour le premier centimètre de béton. En effet, la majorité de la contamination étant contenue dans cette épaisseur, les investigations se sont limitées à cette faible profondeur, conduisant à un raisonnement pouvant être simplifié à deux dimensions. Il est cependant nécessaire de réfléchir de manière plus approfondie à la caractérisation de réelles contaminations tridimensionnelles dans les bétons. Cette réflexion est à mener tant du point de vue de l'échantillonnage que de celui du traitement des données.

La méthodologie s'est principalement focalisée sur la caractérisation des contaminations situées sur les sols, en particulier dans les dalles de béton. Les surfaces verticales et les plafonds, bien que contaminés dans des proportions moindres, nécessitent des méthodologies d'échantillonnage et de traitement de données adaptées. Il en va de même pour la caractérisation des procédés : cuves, systèmes de ventilation, tuyauteries, boîtes à gants de grande dimension, etc. Les niveaux d'activité sont alors généralement plus importants et les contraintes bien plus grandes : objectifs d'évaluation spécifiques, difficultés d'accès pour les mesures ou les prélèvements, configurations géométriques complexes, etc. Cela nécessite de développer une méthodologie spécifique à ces procédés.

De plus, ce travail s'est uniquement concentré sur les contaminations radiologiques. Les phénomènes d'activation n'ont pas été abordés. Une démarche visant à concilier les informations provenant des modèles numériques d'activation, d'une part, et celles issues du traitement géostatistique des données de campagnes d'investigation, d'autre part, semble intéressante à mettre en œuvre.

Enfin, les avancées réalisées dans ce projet doivent être replacées, avec les travaux à venir, au sein d'une réflexion globale afin de mettre en place une méthodologie appropriée de caractérisation radiologique. La méthodologie proposée doit encore être éprouvée et validée afin de participer à la gestion des enjeux colossaux du démantèlement nucléaire au cours des prochaines décennies.

## Approche méthodologique pour la caractérisation géostatistique des contaminations radiologiques dans les installations nucléaires

**RESUME :** Les enjeux industriels et financiers associés au démantèlement des installations nucléaires sont considérables. Après l'enlèvement des procédés et des matières nucléaires, les bâtiments font l'objet d'un assainissement complet des structures de génie civil. Pour cela, un état radiologique initial doit être réalisé pour définir le zonage déchet opérationnel. La méthodologie développée repose sur un séquençage des étapes d'investigation : analyse historique et fonctionnelle, cartographie surfacique puis investigations en profondeur. Cette méthodologie, associée à des outils d'analyse et de traitement des données, permet d'optimiser les coûts d'investigation et les volumes de déchets produits.

Une campagne de mesures surfaciques, menée dans une installation nucléaire du CEA au début de la thèse, a permis d'éprouver la méthodologie proposée et d'exploiter la pertinence du traitement des données par géostatistique : analyse exploratoire et variographique, cartographies d'estimation, analyses de risque, comparaison de modèles isofactoriels pour modéliser les distributions statistiques très contrastées et la structuration des valeurs extrêmes.

Des prélèvements destructifs viennent compléter les différentes cartographies surfaciques et sont intégrés grâce au traitement multivariable. La catégorisation des déchets découle finalement du risque de dépassement de seuils radiologiques.

L'approche géostatistique permet également de dresser un inventaire des structures spatiales des contaminations radiologiques dans les installations nucléaires. Des recommandations d'échantillonnage sont ainsi produites afin de rationaliser la stratégie d'investigation et d'en optimiser les coûts.

**Mots clés :** installation nucléaire en démantèlement, évaluation radiologique, géostatistique, stratégie d'échantillonnage, optimisation des déchets

## A methodological approach for the geostatistical characterization of radiological contaminations in nuclear facilities

**ABSTRACT:** The decommissioning of nuclear sites represents huge industrial and financial challenges. At the end of process equipment dismantling, the complete decontamination of nuclear facilities requires the radiological assessment of residual activity levels of the building structures (waste zoning). From this point of view, the set up of an appropriate evaluation methodology is of prime importance. The developed radiological characterization is divided into three steps: historical and functional analysis, radiation mapping and in-depth investigations. Combined with relevant data analysis and processing tools, this methodology aims at optimizing the investigation costs and the radiological waste volumes.

In a former CEA nuclear facility, a substantial radiation survey was performed at the beginning of the thesis in order to try and test the methodology. The relevance of geostatistics was also illustrated: exploratory data analysis, spatial structure analysis through the variogram, mapping, risk analysis results, isofactorial modeling to take the structuring of extreme values into account.

Destructive concrete samples are then integrated to complete the characterization in addition to radiation data through the geostatistical multivariate approach. Finally, waste segregation results from the risk of exceeding given radiological thresholds.

An inventory of the spatial structures of radiological contaminations in nuclear facilities is provided within the geostatistical framework. It leads to sampling recommendations in order to improve the overall characterization strategy and optimize the investigation costs.

**Keywords:** decommissioning and dismantling, nuclear facilities, radiological characterization, geostatistics, sampling strategy, radiological waste optimization