CHAPITRE 2

Sources et caractérisation

Caroline Chabal, Didier Dubot
et Bernard Poncet

PLAN DU CHAPITRE

Introduction

- 1 Inventaires radiologiques : exemple des déchets graphites
 - 1.1. Variabilité des mesures radiochimiques inexplicable par le seul flux neutron
 - 1.2. Méthode d'assimilation mise en œuvre
 - 1.3. Résultats principaux sur quelques radionucléides
 - 1.4. Conclusion de l'étude focalisée sur le ^{36}Cl
 - 1.5. Validation de la méthode utilisée
- 2 Méthodologie pour la caractérisation des sols et des structures du génie civil
 - 2.1. Mesures radiologiques des sols en surface
 - 2.2. Plan d'échantillonnage dans les zones d'intérêt
 - 2.3. Analyses des profils de la pollution
 - 2.4. Cartographie radiologique en 3D
 - 2.5. Étude coût/avantage – Réhabilitation et impact sanitaire associé
 - 2.6. Contrôles finaux à la fin de la réhabilitation
 - 2.7. Méthode applicable aux structures de génie civil d'installations
 - 2.8. Caractérisation radiologique et perspectives
- 3 Élaboration d'un scénario de démantèlement : apport de la réalité virtuelle
 - 3.1. Principe et application au démantèlement
 - 3.2. Retour d'expérience sur l'utilisation de la réalité virtuelle pour le démantèlement
- 4 Analyse globale
- 5 Traitement de données par géostatistique
 - 5.1. Pourquoi l'analyse de risque ?
 - 5.2. Utilisation et principe de fonctionnement des simulations géostatistiques
 - 5.3. Analyses locales du risque
 - 5.4. Estimations globales

Conclusion : ne pas oublier l'essentiel...

Introduction

Les exploitants nucléaires sont confrontés à la fin de vie des premières installations construites à partir des années 1950. Les actions d'assainissement et de démantèlement sont aujourd'hui une priorité. Elles doivent permettre de démontrer la capacité de l'industrie nucléaire française à contrôler la totalité du cycle de vie des premières générations d'installations, depuis leur construction jusqu'au démantèlement et à la réhabilitation des sites.

Toute opération d'assainissement et de démantèlement doit être préparée en amont. Il est parfaitement illusoire de débiter l'assainissement d'une installation, sans connaître son état radiologique, ni maîtriser les volumes de déchets, par nature et par niveau d'activité, afin de s'assurer de l'existence des exutoires appropriés.

1 | Inventaires radiologiques : exemple des déchets graphites

Bernard Poncet

L'inventaire radiologique des déchets radioactifs est un prérequis à leur évacuation vers un stockage Andra. Il doit donc être connu en amont de la réalisation des travaux d'assainissement démantèlement. EDF a mis en place une méthode d'estimation des inventaires radiologiques sur les graphites actifs des réacteurs UNGG (uranium naturel graphite gaz) par identification calculs/mesures (assimilation) (figure 2.1).

Figure 2.1
Empilements de graphite dans un réacteur UNGG.

En tant qu'exploitant nucléaire responsable, EDF doit élaborer une déclaration d'inventaire radiologique de ses déchets radioactifs le plus précisément possible. De son côté, l'Andra a la responsabilité d'ouvrir un centre de stockage du graphite prévu à l'article 4 de la loi n° 2006-739 du 28 juin 2006 relative à la gestion durable des matières et déchets radioactifs.

Dans le cas du graphite des centrales UNGG, l'inventaire sert donc de base au dimensionnement prévisionnel de ce stockage définitif. Pour les éléments radioactifs, il est relativement facile d'atteindre des limites de détection de l'ordre du Bq/g, c'est-à-dire de l'ordre de quelques milligrammes par tonne de graphite (mg/t). Pour les éléments qui ne produisent aucun rayonnement, leur détection par des procédés chimiques classiques est souvent limitée à des niveaux de l'ordre du milligramme par kilogramme de graphite (mg/kg), lesquels dépassent ceux d'un graphite de pureté nucléaire.

À titre d'exemple, les mesures radiochimiques et les calculs d'activation ont montré qu'il restait dans les empilements les plus riches en chlore (comme Bugey 1) environ 80 mg/t (ou ppb) de chlore après cette décontamination initiale et que 25 %, c'est-à-dire 20 ppb, avait été activé en ^{36}Cl pendant l'exploitation. Le chlore est à une concentration beaucoup trop basse pour être mesurable, seul le ^{36}Cl est accessible à la mesure.

1.1. Variabilité des mesures radiochimiques inexplicable par le seul flux neutron

Sur les prélèvements d'un empilement, entre 20 et 30 carottes de graphite irradié ont été analysées par radiochimie. Par exemple, la variabilité du flux de neutrons à l'origine du ^{36}Cl ne peut pas expliquer seule la variabilité de plusieurs ordres de grandeur des mesures. Sur l'exemple de Bugey 1, la variabilité d'un facteur 1 000 de ces mesures ne correspond :

- ni à celle du flux neutronique selon la position verticale dans le cœur, comme illustré en figure 2.1 (facteur < 10 pour les carottes mesurées) ;
- ni à celle de la température qui varie de 280 °C à 530 °C entre le haut et le bas de l'empilement.

La variabilité est expliquée par la pureté élevée du graphite nucléaire, matériau finement divisé auquel le concept « d'effet de pépète » s'applique. L'absence d'autocorrélation spatiale (pour expliquer le vocable d'effet de pépète) du ^{36}Cl montre qu'il n'y a ni dépôt significatif sur la surface, ni migration dans le graphite, car ces phénomènes induiraient une autocorrélation spatiale visible du ^{36}Cl . Ainsi, ni le champ de température, ni le gainage du combustible parfois mentionnés, ne sont explicatifs des valeurs mesurées.

Une façon de mettre en évidence cet « effet de pépité » significatif consiste à relever, après broyage et mélange de la carotte, la différence maximale mesurée entre les prises d'essai, cette différence étant rapportée à la moyenne de la carotte considérée, à savoir la moyenne des mesures de ses prises d'essai.

Les carottes ont été analysées par deux laboratoires différents du CEA appliquant le même procédé d'analyse mais utilisant pour le broyage des presses de puissances différentes, à savoir 150 tonnes dans le cas du premier laboratoire et quelques tonnes dans le cas du second. En raison d'un plus faible broyage, les différences maximales de concentration en chlore par rapport à la moyenne sont plus élevées pour plus de 40 % des carottes, que la différence maximale obtenue sur les carottes broyées à 150 tonnes et peuvent même atteindre 140 % par rapport à la « moyenne de la carotte » (appelée aussi « moyenne carotte »), c'est-à-dire la moyenne de concentration en chlore des prises d'essai obtenues sur la carotte.

Ce résultat est illustré par la figure 2.2 qui montre les deux fonctions de répartition du rapport entre la prise d'essai maximale et la moyenne carotte pour deux dimensionnements de presse utilisées pour écraser le graphite (quelques tonnes et 150 tonnes respectivement). Deux fonctions de répartition des différences maximales d'activité massique des prises d'essai rapportées à la moyenne carotte pour deux dimensionnements de presse.

Figure 2.2
Preuve de l'effet de pépité.

Malgré le mélange d'une poudre obtenue avec une presse de quelques tonnes, seul un « effet de pépité » accentué peut expliquer tant de prises

d'essai éloignées de la moyenne carotte au-delà de l'erreur relative de mesure, c'est-à-dire environ 20 % pour le ^{36}Cl . Avec un plus faible broyage et donc des prises d'essai moins bien mélangées, la variabilité serait encore plus grande.

L'échantillonnage dans le graphite est donc stochastique et sa variance relative conforme à la formule de Gy : $\left[\frac{s}{a}\right]^2 \approx \frac{K}{am}$ dans le cas où a = concentration en ^{36}Cl est petit.

Cette formule fournit la variance relative d'un échantillon primaire représentant le contenu d'un lot donné (ici l'empilement de graphite, soit plus de 2 000 t) en fonction de la taille de l'échantillon primaire (ici une carotte de $m = 20$ g) et son contenu en composant d'intérêt (ici a = concentration en ^{36}Cl).

Cette formule explique également, en fonction du broyage, la variance relative d'un sous-échantillon primaire représentant le contenu d'un échantillon (ici, une carotte de $m = 20$ g) en fonction de la taille du sous-échantillon primaire (ici une prise d'essai de $m = 0,5$ g) et son contenu en le même composant d'intérêt.

Le phénomène de la variance à une échelle de « échantillon de 20 grammes et 0,5 gramme de sous-échantillon » a été montré en figure 2.2 et la variance à l'échelle de « 2 000 tonnes d'empilement entier et 20 grammes d'échantillon » est révélée en figure 2.3 dans les résultats ^{36}Cl des carottes analysées que l'activation seule ne suffit pas à expliquer.

Illustrant ce phénomène, la figure 2.3 utilise l'échelle logarithmique qui est bien sûr nécessaire, compte tenu de l'importante variabilité de la concentration en ^{36}Cl constatée entre les carottes.

L'utilisation d'une valeur moyenne garantit la division de la variance observée par le nombre de mesures, tandis que les valeurs extrêmes (minimum et maximum) peuvent représenter des valeurs très éloignées de la moyenne.

1.2. Méthode d'assimilation mise en œuvre

Face à l'absence de corrélation spatiale, le CIDEN a développé une méthode d'assimilation qui permet d'exploiter au mieux les mesures et de produire un inventaire majorant :

1. Calculer la carte « 3D » du flux de neutrons sur la géométrie de l'empilement.

Figure 2.3

Quatre distributions en échelle logarithmique des mesures ^{36}Cl des carottes pour quatre emplacements.

2. Partant de cette carte et avec l'histoire du réacteur, calculer les impuretés qui réalisent l'ajustement en moyenne des calculs d'activation et des mesures d'activités (même radionucléide, même emplacement, même date), puis calculer l'inventaire global.
3. Pour chaque radionucléide mesuré, calculer son écart-type et calculer la valeur supérieure de l'intervalle de confiance de son ratio par rapport au ^{60}Co correspondant à un risque de 2,5 % de le sous-évaluer (attention, l'intervalle de confiance n'a rien à voir avec le calcul des Min et Max).
4. Calculer la valeur supérieure de l'intervalle de confiance du ^{60}Co lui-même, ce qui consiste à prendre une autre marge correspondant à un risque de 2,5 % de sous-évaluation et à multiplier cette valeur supérieure par la valeur supérieure du ratio calculé lors de l'étape 3.

Cette caractérisation est basée sur un nombre suffisant de mesures des radionucléides et pour chaque emplacement, EDF a choisi environ 30 échantillons de graphite pour l'analyse de quelques 30 radionucléides, le retrait de l'un des points ne modifiant pas sensiblement l'estimation de la moyenne. Environ 900 analyses de prises d'essai ont ainsi été effectuées pour chacun des quatre emplacements de Chinon A3, Saint-Laurent A1, Saint-Laurent A2 et Bugey 1.

1.3. Résultats principaux sur quelques radionucléides

Tableau 2.1
Inventaire des empilements UNIGG d'EDF.

Risque de sous-évaluation de 2,5 % avec des activités en 2017 (1 TBq = 10 ¹² Bq)	Masse empilement (t)	³ H (TBq)	³⁶ Cl (TBq)	¹³⁷ Cs (TBq)
Chinon A3	2 530	82	0,018	0,07
Saint-Laurent A1	2 570	70	0,007	0,15
Saint-Laurent A2	2 440	217	0,092	0,12
Bugey 1	2 060	192	0,170	0,18

Tableau 2.2
Chlore moyen ajusté pour différents types de graphite.

Réacteurs UNGG	Puissance spécifique (W _{th} /g _U)	Coke d'origine du graphite	Chlore explicatif moyen (mg/t)
Chinon A3	3,2	Lockport L (74 %) et M (26 %)	14
Saint-Laurent A1	3,7	Lockport M	6,6
Saint-Laurent A2	3,8	Lima	83
Bugey 1	5,7	Lima	81

Le calcul indique une forte décontamination initiale appliquée au chlore, cohérente avec le relâchement de chlore qui se produit sous l'effet de la température avant même d'être activé.

Sur Bugey 1, on a pu constater l'efficacité de cette décontamination initiale (celle de la « graphitisation », laquelle, après trois à cinq semaines de cuisson entre 480 °C et 800 °C, correspond à un passage final en four pendant trois à quatre semaines à 3 000 °C environ), puisqu'elle a abouti à ne laisser que 80 ppb (mg/t) de chlore dont l'activation a transformé en moyenne le quart des 80 ppb de chlore résiduel en ³⁶Cl avec des briques dont l'activation en ³⁶Cl varie de 0,7 % à 50 % du chlore stable initial.

1.4. Conclusion de l'étude focalisée sur le ^{36}Cl

Pour les 15 000 tonnes de graphite des empilements, partant d'un estimatif ^{36}Cl antérieur de 15 TBq évalué probablement à partir des maxima mesurés à l'époque, la caractérisation CIDEN par assimilation a conduit depuis 2008, à 300 GBq (soit 50 fois moins) tout en garantissant une estimation majorante.

Notons que ces 300 GBq correspondent à 75 % de la capacité radiologique de 400 GBq du centre de stockage de surface de l'Aube (CSFMA) et à 20 Bq/g en moyenne, ce qui rappelle les valeurs du stockage TFA (très faiblement radioactif).

Compte tenu de l'enrichissement spontané du graphite froid en chlore stable environnemental à hauteur d'environ 2 ppm (c'est-à-dire 2 g/t), on a donc dans les 15 000 tonnes d'empilement environ 30 kg de chlore total dont 250 g de ^{36}Cl (0,3 TBq).

On constate un rapport isotopique initial $\text{Cl}/^{36}\text{Cl}$ supérieur à 100 avant toute migration dans le milieu, rapport isotopique $\text{Cl}/^{36}\text{Cl}$ qui ne pourra qu'augmenter ultérieurement du fait du second principe de la thermodynamique.

1.5. Validation de la méthode utilisée

Enfin, un résultat particulièrement remarquable valide la méthode utilisée par EDF, à savoir, sur huit impuretés chimiques explicatives, la redécouverte du coke à l'origine des graphites de chaque empilement. Ceci est illustré par la figure 2.4.

Figure 2.4

Intervalles de confiance de huit impuretés identifiées via des mesures de radionucléides sur carottes et des calculs d'activation. Redécouverte des coques Lima et Lockport qui ont été utilisés pour fabriquer les graphites de BUG1 et SLA2 d'une part et SLA1 et CHA3 d'autre part.

Aucun compte n'ayant été tenu de l'origine du coke dans les calculs ou les mesures, l'influence constatée du paramètre « coke » fournit une validation exogène de la pertinence de la méthode de caractérisation développée et mise en œuvre.

Les inventaires radiologiques vont permettre l'évacuation des déchets des procédés. Une fois ces déchets évacués, une caractérisation radiologique globale (ou état initial) doit être réalisée dans le but de dimensionner l'assainissement des structures, l'objectif final étant le déclassement de l'installation nucléaire.

2 | Méthodologie pour la caractérisation des sols et des structures du génie civil

Didier Dubot

En France, les objectifs de réhabilitation sont déterminés au cas par cas par les exploitants et proposés à l'Autorité de sûreté nucléaire (absence de seuil de libération). Les impacts sanitaires acceptés par l'ASN étant très bas, une parfaite connaissance de l'état radiologique des sols ou des structures de génie civil est nécessaire afin de garantir le bon déroulement des chantiers de démantèlement, d'assainissement ou de déconstruction dans le respect des coûts et des plannings.

Pour répondre aux questions qui se posent avant chaque assainissement, le CEA a développé une méthodologie permettant de quantifier le nombre de mesures et d'échantillons nécessaires à la caractérisation de la zone d'étude, de définir la profondeur à investiguer et d'optimiser le pas d'échantillonnage, dans le but d'estimer le volume des matériaux contaminés.

Les méthodologies préconisées dans le guide IRSN *Gestion des sites potentiellement pollués par des substances radioactives*, complétées par la directive « EURATOM 96-29 » ont permis d'apporter un retour d'expérience au CEA contribuant à la mise en place, dès 1999, d'une méthodologie décrite dans le logigramme ci-contre.

Le guide interexploitant (CEA/EDF/Areva) est le résultat abouti de ces méthodologies.

C'est en 2004 que le CEA a développé Kartotrak, solution à la maîtrise de l'état radiologique initial. Basé sur un système d'information géographique (SIG), il permet d'utiliser tout type de support géoréférencé, vectoriel ou non. Grâce à l'association d'un GPS avec correction différentielle, il est possible d'associer une position X, Y, Z à une mesure relevée, avec l'utilisation de tout dispositif de mesure de rayonnement (alpha, bêta, gamma).

2.1. Mesures radiologiques des sols en surface

Les surfaces à caractériser peuvent varier de quelques dizaines de mètres carrés à plusieurs hectares, voire milliers d'hectares. Dans la plupart des cas, les polluants sont des émetteurs gamma dont le flux est mesurable avec des détecteurs usuels (NaI, spectrométrie gamma, scintillateurs plastiques). Les dispositifs de mesures en temps réel, développés par CEA/FAR, (VEgAS®, KRP®, KRT®) associés à la plateforme logicielle Kartotrak industrialisée par la société Geovariances, permettent de collecter à chaque seconde les mesures des différents détecteurs. L'exploitation par géostatistique de ces données, très souvent collectées de façon exhaustive sur le site, permet la restitution d'une carte en 2D, mettant en évidence les zones d'intérêt où le flux gamma est différent. Complétées par quelques échantillons, les cartographies sont très rapidement exploitables. En cas d'impossibilité de réaliser des mesures gamma *in situ* pour certains radionucléides, des échantillons sont réalisés en utilisant un maillage approprié.

Figure 2.5

Exemple de dispositif permettant des mesures en temps réel en mode piéton (KRP®) : GPS, PC d'acquisition équipée du logiciel Kartotrak et sonde de mesure NaI.

2.2. Plan d'échantillonnage dans les zones d'intérêt

Le CEA/FAR a établi en 2008 un retour d'expérience à partir des 90 sites évalués par la Section assainissement du site. L'objectif de ce REX consistait à identifier tous les sites dont le plan d'échantillonnage permettait d'utiliser la géostatistique pour le traitement de données en remplacement des approches statistiques usuellement appliquées.

À partir de ce REX, en complément des mesures réalisées sur les sols en surface, il est désormais aussi possible de dimensionner le nombre de sondages nécessaires à une évaluation radiologique pertinente des sols en profondeur. Cette étape permet d'implanter les sondages dans les aires où l'incertitude et la variabilité sont importantes, contrairement aux pratiques du passé, où presque tous les sondages étaient implantés dans les zones qui présentaient l'activité la plus importante.

2.3. Analyses des profils de la pollution

Les sondages réalisés, le plus souvent avec des techniques n'utilisant pas l'eau de sorte à en minimiser la lixiviation, il convient de collecter des échantillons représentatifs de carotte (ou tronçon). Cette opération est généralement précédée d'une mesure de gamma scanning de la carotte par pas de 10 cm afin d'identifier la présence d'éventuels points chauds puis de prélèvements sur la carotte. En fonction du pas d'échantillonnage, la taille des carottes peut atteindre une vingtaine de mètres (pas de 20 cm pour une carotte de 2 mètres, pas de 100 cm pour une carotte de 20 mètres).

Chaque échantillon fait l'objet de mesures par spectrométrie gamma et/ou de mesures radiochimiques des émetteurs alpha et bêta purs en laboratoire. Les résultats permettent de tracer les profils des différents radionucléides. Dès lors, l'analyse fonctionnelle du site peut être validée. Ainsi l'étude des mécanismes de pénétration de chaque radionucléide dans les sols pourra commencer, selon qu'ils sont composés de remblais ou qu'ils constituent le terrain naturel.

2.4. Cartographie radiologique en 3D

Comme pour la réalisation des cartographies en 2D, la réalisation d'une cartographie tridimensionnelle utilise la géostatistique comme technique d'analyse des données et d'estimation des niveaux d'activité. Cette cartographie permet d'obtenir des épures basées notamment sur des probabilités de dépassement

de niveau d'activité. Ces résultats sont utilisés pour comparer les différents scénarios de réhabilitation de la zone d'un point de vue technique et financier.

Figure 2.6

Cartographie 3D de volumes contaminés.

2.5. Étude coût/avantage – Réhabilitation et impact sanitaire associé

Le coût évolue en fonction des profondeurs à atteindre. L'ensemble de ces données permet d'élaborer une représentation synthétique de l'approche coût/avantage. En effet, un graphe montrera quel objectif raisonnable est atteint et l'efficacité évidente d'une excavation supplémentaire en termes de réduction d'impact sanitaire. Toutefois, dès lors que la pollution est bornée et peu profonde, l'étude conclut généralement au retrait total de la contamination. Les calculs de l'impact sanitaire avant et après réhabilitation sont basés sur le guide méthodologique IRSN (*Gestion des sites potentiellement pollués par des substances radioactives*, version 2011) et sont réalisés grâce à l'outil « Impact » développé par la Section assainissement du site du CEA Fontenay-aux-Roses.

2.6. Contrôles finaux à la fin de la réhabilitation

En fin d'assainissement, les pollutions n'étant plus structurées spatialement, on utilisera des outils statistiques (méthode PESCAR, formule de Wilks, test de Student, etc.).

Il conviendra de prendre en compte l'analyse des profils et les ratios α et β existant après le traitement d'une pollution, afin d'adapter le type de contrôle et d'analyse à effectuer sur les échantillons pour en estimer l'activité résiduelle. En effet, il se peut que le ^{137}Cs ne soit plus l'élément prépondérant et que seules des traces d'émetteurs alpha et bêta purs subsistent.

2.7. Méthode applicable aux structures de génie civil d'installations

L'approche développée pour les sols a été transférée pour l'évaluation radiologique des structures de génie civil des installations. En effet, après l'enlèvement des procédés, des volumes de béton et de sols considérables sont à caractériser et, le cas échéant, à assainir.

De nouvelles méthodes d'analyse sont également développées, notamment pour caractériser les structures de génie civil d'installations. On peut citer notamment la technique d'autoradiographie qui permet, grâce à la dépose de films radiosensibles, de localiser des taches de contamination. Cette méthode peu coûteuse et sensible à tous les rayonnements peut notamment être associée à la géostatistique afin d'interpoler les zones non mesurées et d'établir des cartographies.

Figure 2.7

Film après exposition et analyse par autoradiographie montrant une tache de contamination.

2.8. Caractérisation radiologique et perspectives

Le traitement des données par géostatistique apparaît aujourd'hui comme un outil incontournable dans la réalisation d'un état initial ou d'une caractérisation radiologique complète, d'un sol ou d'une installation. Parmi ses nombreuses valeurs ajoutées, on peut citer l'aide au dimensionnement des plans d'échantillonnage, la quantification des incertitudes ou encore le calcul des volumes à excaver en fonction d'un ou plusieurs seuils.

Au niveau des perspectives possibles, on commence à envisager le pilotage des assainissements avec une mise à jour des cartographies radiologiques en temps réel (mesures et traitements de données associés à la robotique).

La caractérisation radiologique des sols et des structures, comme la réalisation des inventaires déchets, permettent d'obtenir les données d'entrées suffisantes à l'élaboration des scénarios d'assainissement/démantèlement. Le choix du scénario, notamment dans les milieux très irradiants, est décisif dans l'optimisation de la dose engagée, des déchets produits, des coûts induits. La téléopération peut être utilisée pour réduire les doses engagées. La simulation permet d'envisager différentes possibilités. Aujourd'hui, les dernières technologies de réalité virtuelle et d'interfaces haptiques (reconstituant les sensations physiques) sont au cœur de ses simulations et permettent une avancée considérable dans l'aide au choix de scénarios de démantèlement.

3 | Élaboration d'un scénario de démantèlement : apport de la réalité virtuelle

Caroline Chabal

3.1. Principe et application au démantèlement

1. La réalité virtuelle (RV), ou simulation interactive immersive, est une technologie largement utilisée dans différents domaines. En médecine, elle est appliquée à la rééducation et à la formation des chirurgiens. Dans l'industrie, la RV peut être utilisée pour la conception de nouveaux produits (automobile, fabrication, conception aérospatiale, etc.).
2. Appliquée à l'industrie nucléaire, la RV permet notamment :
 - de vérifier ou même de concevoir des scénarios d'intervention ;
 - de simuler les opérations à l'échelle 1 ;

- de former les futurs opérateurs en particulier avec le retour d'effort.

Et plus globalement d'améliorer la confiance, la fiabilité et le réalisme du scénario simulé.

Différentes technologies et matériels sont combinés afin d'utiliser la RV dans le cadre des opérations de démantèlement.

Salle immersive

Le CEA Marcoule est équipé d'une salle immersive permettant de valider les opérations de maintenance ou de démantèlement. Elle peut être utilisée pour réaliser des études d'accessibilité, d'ergonomie, ou pour la formation des agents.

Figure 2.8

Salle immersive de Marcoule.

La salle immersive est équipée d'un système de visualisation stéréoscopique doté d'un mur d'image de 3,7 m par 2,3 m, qui donne une vision 3D de l'environnement virtuel. La taille de l'écran permet de travailler confortablement sur les simulations à taille réelle. La perception de la profondeur 3D est rendue possible grâce à la technologie INFITEC, un système stéréoscopique passif reposant sur la colorimétrie.

Vient ensuite un système de capture de mouvement qui permet de naviguer au sein de l'environnement virtuel. Grâce à quatre caméras à infrarouge, la position de la manette (*flystick*) est capturée en temps réel, avec actualisation de sa position virtuelle. Il est aussi possible de suivre la position de la tête : de

ce fait, quand l'utilisateur bouge la tête, le point de vue de la simulation change comme si un mouvement réel avait eu lieu au sein de l'environnement de RV.

Une interface haptique est utilisée pour produire une immersion tactile. Elle confère des sensations de toucher et d'effort.

Un moteur physique confère une existence « matérielle » aux objets graphiques, à travers la décomposition de l'objet en éléments de volume interne (« voxel »). Le moteur physique génère les forces à appliquer pour éviter l'interpénétration des objets et envoie les informations nécessaires à l'interface haptique pour créer un retour d'effort.

La simulation sonore a été ajoutée pour reproduire le bruit reçu par un micro placé *in situ* : l'opérateur pourra entendre le bruit des collisions depuis la salle de commande. De manière générale, l'ouïe est un sens très utilisé par les opérateurs lors des opérations téléopérées. Il les aide à mieux piloter le système, grâce à ce retour sonore.

Système de téléopération

Le système de téléopération est constitué du système Maestro et d'un porteur spécifiquement conçu pour le démantèlement. Le système Maestro (figure 2.9) est un télémanipulateur avancé, utilisé lorsque l'intervention humaine n'est pas possible, dans des environnements nucléaires ou offshores, par exemple. Ce système est constitué de deux parties : le bras maître et le bras esclave. Le bras maître est un dispositif permettant de commander l'organe terminal opérationnel du bras esclave dans un mode cartésien, avec un retour d'effort efficace. Le Maestro peut recevoir différents outils : torche laser ; disqueuse hydraulique, pince...

Figure 2.9

Bras esclave Maestro (à gauche) et bras maître Maestro (à droite).

Modèle et maquette numérique 3D

Afin de vérifier l'accessibilité et la faisabilité des travaux avec le système téléopéré, il est nécessaire de modéliser l'environnement en 3D afin d'obtenir une maquette numérique.

Figure 2.10

Modèle 3D du dissolvant de MAR 200.

Simulation 3D

À partir des maquettes numériques 3D de l'environnement, il est possible d'ajouter d'autres informations utiles comme les points chauds, l'activité...

Figure 2.11

Visualisation des points chauds sur la simulation 3D.

3.2. Retour d'expérience sur l'utilisation de la réalité virtuelle pour le démantèlement

3.2.1. Démantèlement du dissolvant de MAR 200 du CEA Marcoule

Le site de Marcoule (Gard, France) est l'un des sites phares en matière de démantèlement. Parmi toutes les installations devant être démantelées, l'atelier MAR 200 (atelier de retraitement du combustible de Marcoule) a été construit et utilisé pour le développement des opérations de traitement chimique du combustible nucléaire. Cette installation comprend des cellules aveugles contenant des cuves et des circuits de tuyauterie. Du fait du taux élevé de radiation et de l'utilisation de matériaux très spéciaux, ces opérations doivent en partie être réalisées par des systèmes téléopérés, dotés d'un outil de découpe au laser.

Afin d'optimiser les futures opérations, il a été fait appel à la réalité virtuelle pour simuler la mise en œuvre des scénarios définis et vérifier leur adéquation avec l'environnement.

Cinq jours ont été nécessaires pour tester et vérifier toutes les opérations de démantèlement.

Trois principaux objectifs avaient été fixés :

- aider à la conception du système de télémanipulation ;
- valider les scénarios de démantèlement envisagés ;
- optimiser le positionnement des caméras.

Au fur et à mesure des différents tests, la conception de la torche laser a par exemple évolué pour prendre en compte les résultats des simulations. La simulation en RV a permis d'optimiser la conception et l'adéquation de l'outil à l'environnement.

Les positions des caméras ont été validées. Il a été montré que la caméra *in situ*, située dans l'enceinte était mal placée. D'autres tests ont finalement permis de valider un emplacement approprié.

La simulation a également démontré que la découpe du haut de la cuve sera plus aisée depuis l'intérieur. Ce qui implique inévitablement une inversion de l'ordre des séquences de démantèlement. En effet, seulement après avoir découpé les tuyaux internes, la découpe du haut de la cuve pourra être effectuée.

De nombreux autres scénarios ont été testés, afin d'améliorer l'ensemble du démantèlement, étape par étape.

3.2.2. Démantèlement de la cellule 414 de l'APM du CEA Marcoule

La cellule 414 est une cellule chimique utilisée pour la clarification et la dissolution du combustible usé. L'ensemble représente 5 km de tuyaux à découper et 18 tonnes d'équipements à démanteler.

La cellule est hautement radioactive avec un débit de dose ambiant compris entre 15 et 25 mGy/h.

La modélisation a permis de représenter près de 60 % des tuyaux avec une précision estimée à 3 cm.

La RV associée à l'interface haptique et au système Maestro a permis de vérifier les trajectoires opérationnelles, notamment pour les opérations de démantèlement des centrifugeuses.

Figure 2.12

Cellule et modélisation 3D correspondante permettant l'utilisation de la RV en salle immersive.

3.2.3. Réalité virtuelle et perspectives

La réalité virtuelle peut réellement contribuer à l'amélioration de la conception des scénarios et à la validation de choix techniques. Aujourd'hui, les industriels du démantèlement commencent à utiliser la RV.

L'aspect particulièrement prometteur est le temps très court qui s'avère nécessaire dans le test et la validation de l'ensemble des scénarios. Les technologies de RV sont des solutions très réactives. En effet, les changements sont gérés très rapidement et les mises à jour sont testées quasiment instantanément.

L'efficacité de cet outil n'est donc plus à démontrer. Il peut désormais être exploité durant la totalité d'un projet et il permet désormais d'optimiser les opérations par anticipation de leurs éventuels problèmes.

Les outils de RV offrent de nouvelles perspectives aux études et la gestion coût/délais de démantèlement. Il en est de même dans le domaine de la communication entre les acteurs des équipes projet, les prestataires et les autorités de sûreté nucléaire.

4 | Analyse globale

Depuis les années 1950, le développement de la filière nucléaire est considérable et une grande partie des installations nucléaires, de première génération et de seconde génération, sont démantelées ou en cours d'assainissement, tandis que d'autres le seront dans les années à venir.

Depuis une quinzaine d'années, les exploitants ont aussi débuté la réhabilitation de leurs sites qui ont, pour la plupart, souvent été utilisés pour l'entreposage de déchets. Or, les sols constituent très souvent une voie prépondérante de transfert de la contamination vers la nappe phréatique.

C'est dans ce contexte que l'approche des réhabilitations a dernièrement évolué.

Cependant, ne pas maîtriser l'état radiologique initial met en grande difficulté la conduite d'un chantier d'assainissement/démantèlement. Disposer d'un volume de déchets ne répondant à aucun exutoire dédié augmente cette difficulté et réduit inévitablement la pleine réussite de l'assainissement. Les coûts à terminaison sont ainsi remis en cause et tous les assainissements de France risquent d'en subir de lourdes conséquences.

Hormis les CNPE (centres nucléaires de production d'électricité), chaque installation, chaque site, dédié à la recherche (civile et militaire) connaîtra l'exclusivité de son assainissement. La disparité des sites implique une étude appropriée à chaque projet d'assainissement. Aujourd'hui, aucun retour d'expérience pertinent ne permet d'en optimiser (voire diminuer) les coûts et les délais.

Par ailleurs, la seconde grande difficulté rencontrée au cours d'un projet d'assainissement/démantèlement réside dans la diversité des matériaux utilisés. Les milliers de tonnes de graphite évoqués en début de chapitre restent à évacuer vers des filières appropriées qui n'existent pas. Cependant, grâce à notre maîtrise en matière de diagnostic, nous sommes aujourd'hui en mesure de diminuer les incertitudes du terme source qui nous permettent d'envisager les exutoires adéquats, afin de veiller au respect à long terme de l'environnement.

Le développement des recherches liées à la réalité virtuelle sera un atout majeur. En effet, il permet d'identifier et de quantifier, de façon optimale, tous les niveaux d'activité que renferment les déchets. Et ce, sans aucune présence humaine au contact des procédés à assainir.

En raison du manque d'exutoires, il est plus qu'indispensable, pour la filière nucléaire :

- de constituer des colis avec un niveau d'activité maîtrisé dans le but de les éliminer vers les filières existantes ;
- de réduire considérablement le volume de déchets non inscrits dans l'exutoire approprié.

La réhabilitation des sols et des structures de génie civil a été facilitée par la création du site de stockage TFA de l'Andra. Depuis sa mise en place, cette organisation offre aux producteurs de déchets de la filière nucléaire une solution simple aux réhabilitations.

Il est regrettable que des chantiers d'assainissement/démantèlement produisant des déchets de catégorie FA/MA (sols et/ou structures) soient conduits en France avec les mêmes méthodes que celles connues des années 1950 :

- pour les structures d'installation :
 - ou bien
 - on découpe les protections biologiques,
 - et on transporte les « pièces massives » vers le stockage de l'Andra,
 - ou encore
 - on déconstruit la totalité des structures par broyage ;
- pour les sols :
 - on excave,
 - puis on conditionne en GRVS,
 - et on évacue vers le stockage de l'Andra.

La démonstration est ainsi faite de la tendance à envoyer de nombreux colis de déchets (peut-être la majorité) ne contenant aucune radioactivité naturelle ajoutée ou technologiquement renforcée, ou artificielle ajoutée.

Les sols sont généralement assainis par excavation, au moyen des dispositifs techniques, uniquement capables d'une précision de l'ordre d'une vingtaine de centimètres, sans oublier la marge forfaitaire requise par la réglementation et appliquée de façon systématique à tous les sites.

Cette approche globale conduit à une dépense importante au regard d'un terme source très faible, voire pour la majeure partie des volumes, de déchets d'aucune activité.

Une des stratégies possibles consisterait à améliorer la précision des cartographies radiologiques et d'enlever le strict nécessaire des surfaces et des volumes contaminés.

Pour cela, et sans remettre en cause les stratégies globales d'assainissement/démantèlement mises en place en France, il faut utiliser les techniques existantes et abouties, développer les outils nécessaires à automatiser les assainissements des surfaces contaminées et optimiser la maîtrise des volumes de déchets par niveau d'activité.

Cette approche dispose de techniques et de méthodes de contrôle suffisamment robustes pour éliminer tous les matériaux sans radioactivité ajoutée vers des filières conventionnelles.

Depuis le milieu des années 2000, le CEA travaille sur la transposition de méthode, de caractérisation utilisant la géostatistique.

5 | Traitement de données par géostatistique

Cette technique, utilisée initialement pour la caractérisation des filons miniers, a été développée dans les années 1950 par D. Krige puis par G. Matheron.

La finalisation de leurs travaux et l'évolution de l'informatique ont ouvert le champ d'application aux données de la pollution chimique de site et plus récemment (2004) par le CEA/FAR, pour l'application dédiée aux sites et sols pollués radiologiquement.

Cette méthode consiste à prendre en compte la continuité spatiale du phénomène. La première étape, *l'analyse exploratoire des données*, permet d'obtenir un plan de position des données, capable d'identifier les zones de faibles et fortes activités et le niveau du bruit de fond. Cette analyse est associée à une *analyse statistique classique des valeurs* (activités moyennes ou médianes, dispersion autour de cette tendance centrale, quantile, etc.). Durant cette phase exploratoire, il est intéressant d'étudier les relations entre les différents paramètres considérés, comme l'activité gamma, l'irradiation ambiante ou l'activité de plusieurs radionucléides afin d'identifier des zones singulières (contaminations multiples, changement de matrice, variations de l'ambiance...).

Figure 2.13

Plan de position et histogramme des mesures.

L'étape suivante consiste en l'analyse de la structure spatiale des données (figure 2.13).

L'intérêt de l'utilisation de la géostatistique se base sur la continuité spatiale du phénomène : intuitivement pour un phénomène non aléatoire dans l'espace, deux mesures proches auront des valeurs semblables alors que l'écart entre les valeurs de deux mesures plus éloignées sera plus variable. Pour évaluer cette continuité spatiale de façon expérimentale, un variogramme est tracé à partir de la distance des points de mesure et de la variance des valeurs.

Celui-ci fait ensuite l'objet d'un ajustement à l'aide d'un modèle mathématique qui permettra de réaliser les calculs d'estimation (figure 2.14). L'ajustement du variogramme est une étape importante. Elle permet de distinguer l'importance de la variabilité à courte distance et de déterminer si des mesures complémentaires doivent être ou non réalisées.

Figure 2.14

Variogramme expérimental et ajustement.

La troisième étape concerne la réalisation de l'**interpolation des données** par la méthode de krigeage. Le krigeage se différencie des autres interpolateurs, par la prise en compte, entre les données et la cible, des distances séparant les données entre elles et de la structure spatiale du phénomène (par l'intermédiaire du variogramme).

$$\gamma^*(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [z(x_i) - z(x_i + h)]^2$$

Cet interpolateur est construit pour garantir le non-biais de l'estimation et minimiser la variance de l'erreur d'estimation.

Le variogramme peut être estimé par la variance statistique de la différence entre deux points, c'est le variogramme expérimental.

Une des valeurs ajoutées de la géostatistique est de pouvoir, à partir des cartes de krigeage, quantifier les incertitudes associées à l'interpolation mais également établir des cartes de probabilité pouvant dépasser un niveau d'activité donné.

5.1. Pourquoi l'analyse de risque ?

La cartographie d'estimation par krigeage permet d'obtenir une représentation probable du phénomène à partir de points de mesure et d'une modélisation de sa structure spatiale. Cependant, par construction, le krigeage a tendance à « lisser » la variabilité réelle. Les cartographies d'incertitudes renseignent alors la qualité de l'estimation et peuvent donc orienter des investigations complémentaires dans les zones sous-échantillonnées ou à forte variabilité. La recherche d'une estimation probable s'accompagne inévitablement de cet effet de lissage. En effet, le krigeage ne cherche pas à reproduire les fluctuations locales de la variable d'intérêt. On ne peut pas à la fois minimiser le risque d'erreur lors de la prédiction et reproduire la variabilité réelle du phénomène.

De plus, dans le cas d'une contamination radiologique que l'on cherche à caractériser, ce n'est généralement pas la valeur estimée par krigeage qui est la plus importante et la plus pertinente pour la prise de décision. En effet, ce qui oriente les choix d'assainissement, ce sont des outils d'aide à la décision qui reposent principalement sur une analyse de risque, soit au niveau ponctuel ou au niveau global. Raisonner par rapport à un dépassement de seuil (assainissement, catégorisation) devient alors plus pertinent. Appliquer directement un seuil à la cartographie d'estimation revient à ignorer l'incertitude

d'estimation associée, introduisant un biais sur les résultats. Il ne faut donc pas raisonner directement par « au-dessus » ou « en dessous » du seuil sur la cartographie d'estimation mais plutôt sur une estimation du risque de dépassement du seuil (négligeable, possible, probable, certain).

Enfin, au niveau de l'ensemble d'une parcelle, d'une installation ou d'un site, il est intéressant de réaliser des estimations globales qui peuvent avoir une incidence sur le choix de la méthodologie d'assainissement. En effet, la connaissance des surfaces dépassant un niveau fixé nécessite également une approche fondée sur une analyse de risque. Il en sera de même lorsque l'on traitera les informations massives, pour estimer le terme source présent (activité totale).

5.2. Utilisation et principe de fonctionnement des simulations géostatistiques

La géostatistique fournit une réponse tout à fait cohérente aux questions qui font appel à des opérateurs non linéaires comme l'application d'un seuil ou le calcul d'une surface exposée à un dépassement de ce seuil. Parmi les méthodes utilisables, les simulations sont les plus souples. Elles donnent la possibilité de simuler en chaque point de l'espace un scénario pour la variable étudiée de telle façon que la distribution statistique de la variable, mise en évidence par l'histogramme, et les caractéristiques de la variabilité spatiale, prises en charge par le variogramme, soient reproduites. Une simulation est ainsi vue comme une image possible du phénomène alors que le krigeage s'intéresse à fournir l'image la plus probable. Le krigeage lisse ainsi le phénomène étudié tandis qu'une simulation en reproduit toute la variabilité. La simulation est, par ailleurs, dite conditionnelle lorsqu'elle est calée aux données et retrouve les valeurs des mesures en ces points.

De nombreuses techniques de simulation ont été développées. La plupart de ces simulations travaillent dans un cadre gaussien. Cette hypothèse étant rarement observée en pratique, on réalisera au préalable une transformation sur la variable étudiée. De manière simplifiée, l'histogramme des données est « déformé » pour devenir gaussien. En fait, c'est une correspondance selon les fréquences cumulées qui est établie. La distribution des données brutes est ainsi modélisée et le passage dans un sens ou dans un autre (des données brutes aux données gaussiennes ou vice-versa) utilise cette modélisation, appelée anamorphose gaussienne. De plus, le comportement spatial des données transformées en valeurs gaussiennes est souvent plus structuré que la variable brute. C'est pour cela que le modèle gaussien est particulièrement apprécié pour ses bonnes propriétés et la simplicité de sa description.

Figure 2.15
Krigeage et simulations.

On pourra citer ici comme méthode de simulation la technique des bandes tournantes dont le nombre de bandes est le seul paramètre requis ; ce dernier doit être suffisamment grand pour garantir la bonne reproduction, sur les simulations, de la distribution de la variable et de la structure spatiale modélisée. Les simulations finales sont alors déduites des simulations gaussiennes par application de la fonction d'anamorphose inverse.

5.3. Analyses locales du risque

Tout l'intérêt des simulations consiste à calculer un grand nombre de scénarios, permettant ainsi de faire des raisonnements en probabilité. En chaque point du maillage, on a ainsi un histogramme des valeurs possibles, dont la moyenne converge vers le krigeage. En calculant point à point la proportion de réalisations dépassant en chaque point l'objectif de qualité, on obtient une carte de la probabilité de dépassement de ce seuil. De la même manière, en faisant intervenir plusieurs points simulés en même temps, la probabilité de dépassement de seuil peut être estimée sur un support de plus grande taille (contraintes techniques pour l'assainissement, surface minimale).

D'autres cartes d'analyse de risque (quantile, intervalle de confiance...) peuvent être utiles pour le positionnement de mesures complémentaires.

On notera que les estimations locales peuvent être directement obtenues à partir des propriétés théoriques de la distribution gaussienne par la méthode de l'espérance conditionnelle et donc sans passer par la mise en œuvre de simulations.

5.4. Estimations globales

Cependant les simulations apportent une information beaucoup plus riche et permettent de calculer des grandeurs globales, comme la surface totale dépassant un certain seuil, en calculant cette surface pour chaque simulation puis en estimant des caractéristiques statistiques (post-traitement) : moyenne, médiane, variance, intervalle de confiance.

De la même manière, l'activité totale (ou terme source) sera estimée par post-traitement des simulations géostatistiques en sommant les activités massiques scénario par scénario. Le calcul peut alors être mené sur l'ensemble de la zone d'étude, ou sur des zones plus réduites correspondant à un colis de déchet par exemple.

Ces deux types de résultats, analyses locales et estimations globales, sont complémentaires et interviennent, au niveau du projet d'assainissement, respectivement pour localiser les zones à assainir et pour obtenir des quantifications d'un point de vue global pour la prise de décisions en amont des travaux.

La mise en place de simulations permet donc de décider des zones à assainir en fonction des seuils retenus et des niveaux de confiance souhaités, d'estimer et de préparer la production des déchets par catégorie, et donc de prévoir la durée, le coût et la logistique associés.

| Conclusion : ne pas oublier l'essentiel...

Le traitement des données par **géostatistique** est donc une **approche incontournable** pour la caractérisation d'un phénomène qui a une structure spatiale en y associant une incertitude et en particulier des probabilités.

Dans le domaine de l'assainissement/démantèlement, la **géostatistique** permet d'envisager, dès qu'elle est utilisée en amont des projets, la

maîtrise de l'état radiologique initial définissant ainsi les différents niveaux de contamination, leurs étendues et les volumes associés selon les trois dimensions.

On peut espérer ainsi optimiser les assainissements et les productions de déchets par natures et types afin de garantir le respect des coûts et des plannings.

La maîtrise de nos coûts liés à un assainissement/démantèlement optimisé est l'unique solution pour garantir l'expansion de la filière nucléaire française dans le respect d'un développement durable.