

Avis du comité scientifique de l'ASN relatif à la métrologie en situation d'assainissement de sites (installations et sites contaminés)

Après plusieurs réunions d'échange avec les principaux exploitants et les acteurs de la recherche et du contrôle en matière d'assainissement de sites pollués radiologiquement et/ou chimiquement et de démantèlement d'installations nucléaires, le comité scientifique a élaboré l'avis et les recommandations suivantes.

Il estime qu'il n'est pas nécessaire de développer de programmes de recherche sur les techniques de mesure radiologique et chimique, y compris pour le radium. Pour autant, l'usage de produits chimiques non encore étudiés pourrait nécessiter des recherches spécifiques.

Par ailleurs, la mesure d'échantillons associant pollutions radioactive et chimique soulève des difficultés, parmi lesquelles celle de l'accès à des chaînes de mesure acceptant les contaminations croisées.

En revanche, il considère qu'il y a lieu d'encourager les développements technologiques permettant d'accroître le nombre de mesures et de réduire les délais avant l'obtention des résultats. A cet égard, le comité salue les progrès substantiels réalisés en matière d'automatisation des moyens de mesure in situ et la création de laboratoires mobiles sur les chantiers d'assainissement et de démantèlement. Il constate qu'un frein notable à ces développements est la spécificité et l'étroitesse du marché de la dépollution en milieu nucléaire, contrairement à celui de la dépollution des innombrables sites chimiquement pollués.

Le comité recommande de profiter au mieux des avancées des techniques de mesure, de manière notamment à affiner de manière itérative le maillage, la fiabilité et la précision des mesures, ainsi qu'à améliorer la complémentarité entre mesures in situ et en laboratoire.

La notion de schéma conceptuel, introduite depuis 2007 dans le contexte nucléaire et décrite dans le guide méthodologique de décembre 2011 élaboré par le MEDTL, l'IRSN et l'ASN, a notamment été mise à profit par EDF dans l'accompagnement de la dépollution de la centrale de Brennilis, qui semble à plusieurs égards avoir servi de chantier-école pour l'application du guide. Elle joue un rôle central de point de convergence de tous les savoirs. Le comité considère que l'élaboration d'un schéma conceptuel du site à dépolluer, vision partagée entre les acteurs de la dépollution, est une étape essentielle de la caractérisation de la contamination et un facteur important de la limitation des dérives de projet. Il

estime que ce schéma conceptuel devrait à terme prendre la forme d'un jumeau numérique évolutif de l'installation ou du site, dès sa création et tout au long de la collecte de données de terrain. Il devrait permettre de rendre compte de la nature et de la localisation d'éventuelles contaminations, d'en affiner la vision en cours d'exécution, de simuler leurs migrations, les voies de transfert et les impacts possibles.

La clé n'est donc pas tant dans les avancées scientifiques et techniques sur la mesure que dans les processus et les méthodes pour en tirer le meilleur bénéfice.

Le comité voudrait saluer à ce titre la publication prochaine d'un guide ASN-IRSN «relatif à la stratégie d'échantillonnage et aux mesures de la radioactivité dans la gestion des INB jusqu'à leur déclassement». Le comité a pu récemment avoir connaissance de ce document à l'état de projet et, sans prétendre en avoir fait une analyse exhaustive, constate que les principes énoncés et les prescriptions techniques apportées sont de nature à faire progresser les processus et méthodes d'assainissement vers une application de la réglementation proportionnée aux enjeux sanitaires réels, dans un véritable esprit ALARA. Les surprises en cours de chantier, les incompréhensions et les divergences d'appréciation, qui ont marqué nombre de chantiers d'assainissement passés, devraient diminuer pour les chantiers qui bénéficieront de ce nouveau guide. Un travail continu en bonne intelligence entre tous les acteurs sera bien entendu essentiel à son application fructueuse. Comme dit plus haut, le concept de schéma conceptuel évolutif fera un bon support commun de travail.

Les méthodes d'exploitation des données, notamment avec l'approche géostatistique et la prise en compte des incertitudes de mesure, semblent être pertinentes et apporter une aide importante à la décision. Elles devraient permettre d'optimiser les objectifs, la durée et les coûts d'un assainissement. Les cartes produites par les méthodes de krigeage sont aussi un bon moyen de communication avec les parties prenantes, pour peu que l'on en fasse un usage averti. Mais, actuellement, la maîtrise de l'approche géostatistique semble être encore un domaine réservé aux experts.

Des formations sont certes déjà disponibles pour que les utilisateurs comprennent et maîtrisent la puissance des outils de géostatistique, en prenant conscience de leurs limites. Le comité incite donc les acteurs opérationnels et décisionnels à devenir des utilisateurs avisés de ces méthodes, en tenant bien compte de leur apport et de leurs limites.

Afin d'augmenter la confiance dans ces méthodes et leur appropriation par les opérateurs du nucléaire, le comité préconise d'encourager les inter-comparaisons au niveau national (par le réseau GeoSiPol par exemple) et international (dans les cadres du programme Euratom et de l'AEN), en incluant, dans la mesure du possible, des acteurs de la caractérisation des sites pollués chimiquement.

Il lui semble également important de favoriser les échanges entre les acteurs sur le retour d'expérience des chantiers de démantèlement et d'assainissement en matière de caractérisation des contaminations

et d'établir ou de réviser les guides de bonnes pratiques, notamment pour l'utilisation des méthodes de géostatistiques.

De ses rencontres avec les différents acteurs de l'assainissement des sites et du démantèlement des installations nucléaires, le comité scientifique retient l'importance des enjeux technico-économiques de ces chantiers et des risques avérés de dérive, voire d'exécution insatisfaisante, tant en coût qu'en durée. Il considère que la quantification des objectifs d'assainissement ne peut faire l'impasse sur :

- la caractérisation itérative des pollutions initiales et résiduelles, en prenant en compte les meilleures techniques et méthodes disponibles et en incluant l'évaluation des incertitudes ;
- l'intégration des résultats de cette caractérisation dans un schéma conceptuel évolutif ;
- les coûts et délais prévisibles des opérations de démantèlement et d'assainissement ;
- la prise en compte de l'usage futur du site ;
- les voies et les taux de transfert de la pollution résiduelle ;
- les impacts résiduels hors site et le niveau de risque associé sur l'Homme et l'environnement ;
- la gestion des déchets secondaires des procédés de caractérisation et de dépollution.

Le comité scientifique incite à une réflexion sur l'optimisation globale des processus de dépollution et sur leur impact sociétal, dans une approche graduée, telle que recommandée au niveau international par le « Safety Guide WS-G-5.1 » de l'AIEA.

Cette réflexion pourrait s'inspirer notamment de la démarche suivie en matière de dépollution chimique, basée sur la maîtrise des risques résiduels, l'objectif étant qu'il n'y ait pas d'effet sanitaire toxique aigu et que la probabilité additionnelle de développer un cancer sur 70 ans soit inférieure à 10^{-5} . Elle est déclinée sous forme de seuils opérationnels pour chaque substance.

Une approche alternative proportionnée aux enjeux et qui mérite un examen attentif est celle proposée dans le guide canadien de caractérisation des sols pollués, basée sur des considérations statistiques.

Ces deux approches pourraient être prises en compte dans le cadre d'une réflexion visant à mettre en œuvre en France une approche graduée de l'assainissement des sites et du démantèlement des installations nucléaires.

ANNEXE

1. Introduction

La démarche de référence historique de l'ASN en matière d'assainissement d'un site potentiellement pollué par des substances radioactives et de démantèlement d'une installation nucléaire est que la totalité des substances dangereuses et des substances radioactives doit être retirée [1][2]. Dans l'hypothèse où cette démarche présenterait des difficultés de mise en œuvre, « l'ASN considère que l'exploitant doit aller aussi loin que raisonnablement possible dans le processus d'assainissement » et « apporter les éléments, d'ordre technique ou économique, justifiant que la démarche de référence ne peut être mise en œuvre ».

La caractérisation de la nature et de l'étendue de la contamination radiologique et éventuellement chimique constitue donc une étape clé qui conditionne le bon déroulement des opérations de démantèlement et d'assainissement qui sont soumises à l'autorisation de l'ASN.

A cet égard, l'ASN note que le retour d'expérience des chantiers de démantèlement et d'assainissement montre qu'une caractérisation initiale insuffisante conduit « à des choix inappropriés en matière de démarche de gestion des sites et sols pollués (sous-estimation ou surestimation du volume et sous- ou sur-catégorisation des déchets, contamination imprévue) », entraînant d'importants retards et surcoûts.

L'ASN a demandé à son comité scientifique d'examiner l'état des connaissances en matière de caractérisation de contamination radiologique et chimique, et de préciser les recherches à poursuivre ou à entreprendre afin d'en améliorer la qualité. Elle a fourni au comité sa propre vision des besoins de recherche dans ce domaine sous forme d'une fiche.

Pour mener à bien ses investigations, le comité a créé un sous-comité constitué de Jean-Marc CAVEDON, Catherine LUCCIONI, Michel SCHWARZ et Marc VANNEREM. Ce sous-comité a rencontré des experts et des responsables d'organismes exploitant des installations nucléaires en cours de démantèlement et/ou menant des recherches dans le domaine de la caractérisation de la pollution radiologique et/ou chimique : le CEA, le CNRS, ORANO, EDF, Geovariances et le BRGM. Il a également

rencontré les experts de l'IRSN, qui apportent à l'ASN leur concours technique à l'analyse des dossiers fournis par les exploitants et assurent un contrôle final de l'état de l'installation ou du site à l'issue des opérations d'assainissement et de vérification de l'état obtenu réalisées par les exploitants.

2. Les méthodes de caractérisation et de gestion de projet

Ces méthodes font l'objet de nombreux guides dans le domaine nucléaire, aussi bien au niveau national qu'international.

Sans être exhaustif, on peut citer tout d'abord les guides ASN, jugés très utiles notamment par EDF : le guide 14 relatif à l'assainissement des structures dans les installations nucléaires de base [3] et le guide 24 relatif à la gestion des sols pollués par les activités d'une installation nucléaire de base [4]. Ils sont complétés par un guide relatif à la stratégie d'échantillonnage et aux mesures de la radioactivité [5].

EDF s'appuie également sur la norme NF EN ISO 21365, relative à la définition de schémas conceptuels pour les sites potentiellement pollués [6].

Par ailleurs, le CEA et ORANO utilisent la norme NF EN ISO 18557, déclinant les principes de caractérisation des sols, bâtiments et infrastructures contaminés par des radionucléides, à des fins de réhabilitation [7].

Enfin, au niveau international, deux guides semblent faire référence. Le premier, utilisé par EDF et l'IRSN, notamment pour définir le nombre de points de mesure, est MARSSIM [8] (Multi-Agency Radiation Survey and Site Investigation Manual), élaboré aux USA en collaboration par le Department of Defense, le Department of Energy, l'Environmental Protection Agency et la Nuclear Regulatory Commission.

Le second a été cité par Geovariances, notamment au titre des critères d'acceptabilité des sites après dépollution qu'il propose, le Guidance Manual for Environmental site Characterisation in Support of Environmental and Human Health Risk Assessment, élaboré par le Conseil canadien des ministres de l'environnement [9].

Les étapes de la caractérisation décrites dans ces guides et normes sont très similaires. Elles consistent tout d'abord en une étude historique du site ou de l'installation, incluant notamment une analyse approfondie des incidents ou accidents ayant entraîné une pollution radiologique et/ou chimique, la nature des polluants et l'étendue de la pollution, ainsi que les transferts possibles de cette pollution aussi bien en surface que par pénétration dans les sols et les structures, notamment les bétons. Puis, un plan de mesures directes et indirectes sur des prélèvements est défini. Les résultats de ces mesures sont ensuite analysés en utilisant des outils de statistique et de géostatistique afin de définir une stratégie

d'assainissement permettant d'atteindre les objectifs fixés (retrait total ou partiel de la pollution si le retrait total pose des difficultés techniques ou économiques).

La plupart des guides méthodologiques recommandent d'élaborer un schéma conceptuel. Il s'agit d'une représentation synthétique sous forme de schémas et de tableaux de toutes les informations connues sur les sources de pollution et les voies de transfert de cette pollution. Il s'enrichit au fur et à mesure que les résultats des mesures sont analysés. Un tel schéma est estimé en général comme essentiel par les exploitants car il facilite les échanges d'informations entre les différents acteurs de la caractérisation, ainsi qu'avec les experts et responsables chargés du contrôle.

Hors du secteur nucléaire, les méthodes et guides de dépollution chimique en France sont confiées aux soins du BRGM. Cet organisme public a été sollicité, tant sur l'historique de la dépollution chimique que sur la R&D publique en soutien du secteur. Il a été retenu que la prise de conscience initiale d'une nécessaire intervention publique dans le secteur date de la fin du siècle passé, avec la réalisation d'états quantifiés des lieux et la mise en place de seuils interventionnels, souvent suivie d'un respect a minima de ces seuils par les organismes à la source de la pollution. Vers 2007, une approche graduée et au cas par cas a été élaborée.

Cette approche graduée repose sur l'analyse de terrain des sources de pollution sur site, de leurs voies de transfert hors site et de leur impact sur les populations et l'environnement. L'ensemble des connaissances sur le site constitue le schéma conceptuel du site à dépolluer. L'objectif n'est pas de supprimer le danger mais de maîtriser les risques en les abaissant à un risque résiduel, quantifié à une probabilité additionnelle de cancer de 10^{-5} par personne, intégrée sur 70 ans d'exposition. L'optimum technico-socio-économique de l'opération est recherché dans les trois compartiments sources/voies de transfert/cibles. Les exceptions à cette règle sont l'intervention sans délai en cas de nuisance à la population et la dépollution des zones à pollution élevée, avant la dilution de celle-ci qui ne ferait qu'aggraver l'ampleur du problème à traiter. La méthode est réglementée depuis 2017 et le guide associé est publié depuis avril de cette année 2023 [10].

3. L'élaboration du plan d'échantillonnage

Le maillage est le plus souvent déduit de l'analyse historique. Différents types de maillage sont utilisés, réguliers ou aléatoires, notamment si la pollution est homogène. Il est tridimensionnel dans le cas de migration possible de la pollution dans les sols et les structures.

Certains exploitants, comme le CEA et ORANO, réalisent au préalable une cartographie qualitative à l'aide de mesures directes avec des appareils permettant de déceler des singularités (caméra gamma, mesure de débit de dose, capteurs industriels sensibles aux rayonnements alpha et bêta).

Le nombre de mailles peut être également établi à partir de tests statistiques tels que ceux recommandés par la norme ISO 2859-1 de contrôle par lots d'une production d'usine [11] ou la norme ISO 8550 d'échantillonnage pour acceptation de produits qui sont fournis en lots [12] ou bien encore par le guide MARSSIM [9] en appliquant le test des rangs signés de Wilcoxon qui nécessite de disposer de mesures préalables dans une zone de référence.

L'analyse statistique et géostatistique des résultats de mesure peut conduire à raffiner le maillage initial ou simplement confirmer que celui-ci est suffisamment dense dans un secteur donné.

Le risque associé à un nombre insuffisant de points de mesure est celui de ne pas détecter un point chaud. De manière à réduire ce risque, Geovariances recommande de multiplier les points de mesure, même à plus faible précision.

L'optimisation du plan d'échantillonnage, avec le choix du type de maillage, du nombre de mailles ainsi que la nature (directe ou indirecte) et la précision requise des mesures, paraît donc être un sujet nécessitant encore quelques recherches, y compris en pédagogie de la mise en œuvre des techniques éprouvées.

4. Les techniques de mesure

4.1 Les mesures radiologiques

Les mesures mises en œuvre par les différents organismes rencontrés ne semblent pas poser de problème particulier.

- In situ, les exploitants utilisent :
- Pour des mesures exploratoires rapides, une gamma caméra, couplée à une caméra dans le spectre visible, la mesure de débit d'équivalent de dose gamma ambiant, un contaminamètre avec sondes surfaciques adaptées aux rayonnements gamma, alpha ou bêta, des compteurs de rayonnements alpha et bêta ;
- Pour des mesures plus précises, la spectrométrie gamma, permettant notamment par analyse du spectre d'énergie de déceler une migration en profondeur et de discriminer entre différents isotopes, l'autoradiographie numérique (dispositif MAUD utilisant des scintillateurs solides, développé par le CEA en partenariat avec l'université de Poitiers et les ateliers LAUMONIER), la spectroscopie de plasma (dispositif LIBS, Laser Induced Breakdown Spectroscopy, développé par le CEA) mise en œuvre notamment par ORANO ;
- Pour des mesures sur des sites de grande surface, des moyens mobiles (du sac à dos à l'hélicoptère, en passant par le drone).

- En laboratoire sur prélèvements effectués par frottis ou carottage, en utilisant les moyens de mesure associés aux radionucléides recherchés (spectrométrie gamma, spectrométrie alpha, scintillation liquide, spectrométrie de masse...) et à la matrice prélevée (sols, sédiments, bétons, liquides...).

Les difficultés rapportées par les exploitants concernent principalement :

- Les cas de surfaces très étendues à caractériser ;
- L'état des surfaces, dans le cas de contamination alpha ou bêta ;
- Les durées de comptage, lorsque l'activité est proche de la limite de détection ;
- La précision des référencements dans l'espace ;
- Les délais et les coûts d'analyse des prélèvements mesurés en laboratoire.

Pour y faire face, les exploitants ou leurs prestataires réalisent des développements technologiques, comme des systèmes robotisés porteurs des appareils de mesure et pouvant opérer de manière automatique en continu (projet en cours pour MAUD au CEA, porteur multi-usage d'investigation RIANA d'ORANO), des appareils permettant de projeter des maillages sur les surfaces à caractériser lorsqu'elles sont importantes (système de maillage assisté par réalité augmentée MARA d'ORANO).

Pour réduire les délais des mesures sur des prélèvements, ORANO a développé un laboratoire mobile, Labo in situ, laboratoire modulaire capable de franchir portes et monte-charges, donc d'être installé au plus près de la zone à caractériser, et permettant de réaliser des analyses radiologiques, telles que des spectrométries gamma et des spectrométries alpha.

Ces développements technologiques peuvent néanmoins être limités par des contraintes économiques, le marché étant relativement limité.

Lorsque les radionucléides recherchés sont difficiles à détecter en mesure directe, du fait du type de rayonnement qu'ils émettent (alpha ou bêta), on cherche à mesurer l'activité de « traceurs » éventuels émetteurs gamma comme le ^{137}Cs pour les actinides, les ^{60}Co , ^{133}Ba et ^{152}Eu pour la migration de polluants émetteurs bêta dans les bétons. Les résultats de ces mesures sont approfondis par des mesures en laboratoire sur des prélèvements car les « traceurs » peuvent avoir un comportement physico-chimique différent du radionucléide recherché.

Ces méthodes de mesure peuvent faire l'objet d'inter-comparaisons dans le but d'optimiser leur utilisation. Ainsi, le CEA a réalisé une inter-comparaison entre les différentes techniques de mesure sur des grandes surfaces sur le chantier-pilote d'assainissement et de démantèlement des Usines de Diffusion Gazeuses (UDG) de Pierrelatte.

4.2 Les mesures chimiques

Des mesures in situ peuvent être effectuées par la spectrométrie de fluorescence X qui permet, grâce à des analyseurs portatifs, d'identifier la composition chimique de polluants sur une surface.

Dans le cas général, des prélèvements sont effectués par les exploitants et analysés en laboratoire par la spectrométrie de masse ou la spectrométrie de fluorescence X.

EDF effectue des recherches visant à développer des techniques de mesure par spectrométrie dans le rayonnement visible, pour détecter les pollutions par hydrocarbures et les traiter. Également des études sont en cours à EDF pour développer des moyens de quantification en continu de polluants chimiques et radiologiques contenus dans la terre transportée sur un tapis roulant.

Les experts du BRGM ont mentionné la nécessité de poursuivre des recherches pour l'analyse de substances chimiques non encore étudiées.

Ils ont par ailleurs évoqué les réticences de certains laboratoires de chimie pour analyser des échantillons qui pourraient être potentiellement radioactifs.

5. Traitement des résultats

En premier lieu, l'analyse statistique des résultats de mesure (valeur moyenne, valeur médiane, variance, histogramme) et l'étude de leur cohérence (datation des mesures, référencement des points de mesure, synchronisation GPS, valeurs locales du bruit de fond) permettent de corriger la base de données. On relève en général 10% de données erronées selon Geovariances.

L'étape suivante consiste à réaliser une analyse géostatistique des données. L'analyse de leur structure spatiale, bidimensionnelle ou tridimensionnelle, par construction du variogramme, expression des écarts entre les résultats de mesure en fonction de la distance séparant les points de mesure, permet d'avoir une « signature » de la distribution de la pollution : dispersion aléatoire sous forme de pépites ou tâches de pollution plus ou moins continues. Dans ce dernier cas, l'examen de la « portée », partie croissante de la variabilité avec la distance entre points avant d'atteindre une valeur quasi-asymptotique, permet d'évaluer la qualité du maillage : un nombre très limité de points sur la portée milite pour un raffinement du maillage et la réalisation de mesures complémentaires.

L'interpolation entre les points de mesure par la technique du krigeage permet de dresser une cartographie bidimensionnelle ou tridimensionnelle de la contamination. Une analyse probabiliste tenant compte des incertitudes de mesure aide à la classification des zones et à l'identification des lieux

où il y a un risque de dépassement d'un certain niveau de contamination, nécessitant des mesures complémentaires.

L'utilisation des méthodes géostatistiques par les exploitants ne semble pas systématique. Par exemple, le CEA ne les utilise que lorsqu'il n'existe pas suffisamment de mesures et il privilégie les méthodes combinatoires.

Les exploitants qui les mettent en œuvre utilisent des logiciels en « boîte noire » fournis par des bureaux d'étude tels que Geovariances et Antea Group en France ou eOde en Suisse. Ces logiciels peuvent permettre également d'estimer les volumes de déchets à traiter et leur nature. L'IRSN pour sa part travaille en partenariat avec l'Ecole des Mines de Paris, qui est une référence internationale dans le domaine de la géostatistique.

Un réseau d'utilisateurs existe en France, GeoSiPol, comptant notamment comme membres le CEA, EDF et l'IRSN, mais aussi le BRGM, l'IFP et Total. Ce réseau élabore des fiches techniques faisant la revue, sur la base de l'expérience acquise par les membres, des applications possibles de la démarche géostatistique à la caractérisation des sites pollués.

Une synthèse du retour d'expérience sur l'utilisation des méthodes géostatistiques a été produite en 2013 par Geovariances, eOde et Antea Group [13]. Elle conclut que les méthodes géostatistiques apparaissent comme un outil utile et pertinent d'aide à la décision. Cependant, les données de pollution constituent généralement des populations très dissymétriques, présentant un petit nombre de valeurs très élevées, ce qui nécessite de transformer au préalable ces données à l'aide de fonctions mathématiques de manière à obtenir des distributions plus gaussiennes. Le rapport note que les résultats du traitement géostatistique peuvent alors être sensiblement différents selon la fonction de transformation choisie.

6. Les projets de recherche nationaux et européens

Le système de mesure par autoradiographie, MAUD, a été développé dans le cadre du Programme d'investissements d'avenir mis en place par le Secrétariat général pour l'investissement placé sous l'autorité des Services du Premier ministre et a été doté d'une subvention de près de 1 M€ en 2016.

L'AEN a publié en 2014 un document faisant une synthèse des besoins de recherche dans le domaine du démantèlement des installations nucléaires [14]. Il concluait que les domaines de collaboration possible au niveau international concernaient notamment le développement d'un standard international pour établir des stratégies d'étalonnage robustes (représentativité, densité de maillage, niveau d'incertitude acceptable), l'utilisation de traceurs pour caractériser les radionucléides difficiles à détecter, le

développement de technologies permettant les mesures in situ de contamination alpha et bêta, notamment dans les zones difficiles d'accès, la modélisation et les systèmes de mesure permettant de caractériser la migration de contaminant dans les fissures du béton.

Pour autant, aucun programme de recherche international n'a été initié dans le cadre de l'AEN pour progresser sur ces axes de recherche.

La caractérisation de la contamination radiologique a également fait partie des thèmes de recherche portés par le programme Euratom « DECOMMISSIONING AND ENVIRONMENTAL REMEDIATION », notamment sous le numéro NFRP-09: « Fostering innovation in decommissioning of nuclear facilities ». C'est essentiellement le CEA qui y participe en France comme coordonnateur ou responsable de tâches dans le domaine de la caractérisation.

Ainsi a-t-il été le coordonnateur du projet H2020 INSIDER, «Improved Nuclear Site characterisation for waste minimisation in D&D operations under constrained EnviRonment », mené de 2017 à 2021 et incluant 17 partenaires de 10 pays différents.

L'objectif principal du projet était de développer et valider une nouvelle stratégie et méthodologie intégrée de caractérisation pour les opérations d'assainissement et de démantèlement en environnements contraints, afin d'améliorer la gestion et la catégorisation des déchets générés, ainsi que de réaliser des guides méthodologiques et des recommandations.

Des inter-comparaisons ont été réalisées sur 3 cas pratiques :

- Installation du cycle : cuves d'entreposage d'effluents (ISPRA) ;
- Réacteur nucléaire : BR3 de Mol ;
- Gestion post incidentelle : sols contaminés (CEA).

Le CETAMA, qui s'appuie sur le Laboratoire de Métrologie des MATières Nucléaires (LAMMAN à Marcoule) et anime un réseau international de 300 membres, a été un contributeur important.

Selon les experts du CEA, ce projet a eu un apport significatif sur le processus d'évaluation des performances de mesure et a abouti à :

- des guides méthodologiques,
- 2 outils web :
- STRATEGIST: plan d'échantillonnage et traitement des données,
- un guide de sélection et de mise en œuvre des mesures in situ.

Les recherches actuellement soutenues par le programme Euratom (HORIZON-EURATOM-2023-NRT-01-07: Innovative technologies for safety and excellence in decommissioning, including robotics and artificial intelligence) sont principalement orientées autour de développements technologiques afin d'accroître la sûreté tout en réduisant les coûts de démantèlement. Néanmoins, un volet lié à la caractérisation apparaît dans les domaines de recherche jugés prioritaires ; il concerne les radionucléides difficiles à mesurer [15].

7. Conclusion, avis et recommandations

Après plusieurs réunions d'échange avec les principaux exploitants et les acteurs de la recherche et du contrôle en matière d'assainissement de sites pollués radiologiquement et/ou chimiquement et de démantèlement d'installations nucléaires, le comité scientifique a élaboré l'avis et les recommandations suivantes.

Il estime qu'il n'est pas nécessaire de développer de programmes de recherche sur les techniques de mesure radiologique et chimique, y compris pour le radium. Pour autant, l'usage de produits chimiques non encore étudiés pourrait nécessiter des recherches spécifiques.

Par ailleurs, la mesure d'échantillons associant pollutions radioactive et chimique soulève des difficultés, parmi lesquelles celle de l'accès à des chaînes de mesure acceptant les contaminations croisées.

En revanche, il considère qu'il y a lieu d'encourager les développements technologiques permettant d'accroître le nombre de mesures et de réduire les délais avant l'obtention des résultats. A cet égard, le comité salue les progrès substantiels réalisés en matière d'automatisation des moyens de mesure in situ et la création de laboratoires mobiles sur les chantiers d'assainissement et de démantèlement. Il constate qu'un frein notable à ces développements est la spécificité et l'étroitesse du marché de la dépollution en milieu nucléaire, contrairement à celui de la dépollution des innombrables sites chimiquement pollués.

Le comité recommande de profiter au mieux des avancées des techniques de mesure, de manière notamment à affiner de manière itérative le maillage, la fiabilité et la précision des mesures, ainsi qu'à améliorer la complémentarité entre mesures in situ et en laboratoire.

La notion de schéma conceptuel, introduite depuis 2007 dans le contexte nucléaire et décrite dans le guide méthodologique de décembre 2011 élaboré par le MEDTL, l'IRSN et l'ASN, a notamment été mise à profit par EDF dans l'accompagnement de la dépollution de la centrale de Brennilis, qui semble à plusieurs égards avoir servi de chantier-école pour l'application du guide. Elle joue un rôle central de point de convergence de tous les savoirs. Le comité considère que l'élaboration d'un schéma conceptuel

du site à dépolluer, vision partagée entre les acteurs de la dépollution, est une étape essentielle de la caractérisation de la contamination et un facteur important de la limitation des dérives de projet. Il estime que ce schéma conceptuel devrait à terme prendre la forme d'un jumeau numérique évolutif de l'installation ou du site, dès sa création et tout au long de la collecte de données de terrain. Il devrait permettre de rendre compte de la nature et de la localisation d'éventuelles contaminations, d'en affiner la vision en cours d'exécution, de simuler leurs migrations, les voies de transfert et les impacts possibles.

La clé n'est donc pas tant dans les avancées scientifiques et techniques sur la mesure que dans les processus et les méthodes pour en tirer le meilleur bénéfice.

Le comité voudrait saluer à ce titre la publication prochaine d'un guide ASN-IRSN « relatif à la stratégie d'échantillonnage et aux mesures de la radioactivité dans la gestion des INB jusqu'à leur déclassement ». Le comité a pu récemment avoir connaissance de ce document à l'état de projet et, sans prétendre en avoir fait une analyse exhaustive, constate que les principes énoncés et les prescriptions techniques apportées sont de nature à faire progresser les processus et méthodes d'assainissement vers une application de la réglementation proportionnée aux enjeux sanitaires réels, dans un véritable esprit ALARA. Les surprises en cours de chantier, les incompréhensions et les divergences d'appréciation, qui ont marqué nombre de chantiers d'assainissement passés, devraient diminuer pour les chantiers qui bénéficieront de ce nouveau guide. Un travail continu en bonne intelligence entre tous les acteurs sera bien entendu essentiel à son application fructueuse. Comme dit plus haut, le concept de schéma conceptuel évolutif fera un bon support commun de travail.

Les méthodes d'exploitation des données, notamment avec l'approche géostatistique et la prise en compte des incertitudes de mesure, semblent être pertinentes et apporter une aide importante à la décision. Elles devraient permettre d'optimiser les objectifs, la durée et les coûts d'un assainissement. Les cartes produites par les méthodes de krigeage sont aussi un bon moyen de communication avec les parties prenantes, pour peu que l'on en fasse un usage averti. Mais, actuellement, la maîtrise de l'approche géostatistique semble être encore un domaine réservé aux experts.

Des formations sont certes déjà disponibles pour que les utilisateurs comprennent et maîtrisent la puissance des outils de géostatistique, en prenant conscience de leurs limites. Le comité incite donc les acteurs opérationnels et décisionnels à devenir des utilisateurs avisés de ces méthodes, en tenant bien compte de leur apport et de leurs limites.

Afin d'augmenter la confiance dans ces méthodes et leur appropriation par les opérateurs du nucléaire, le comité préconise d'encourager les inter-comparaisons au niveau national (par le réseau GeoSiPol par exemple) et international (dans les cadres du programme Euratom et de l'AEN), en incluant, dans la mesure du possible, des acteurs de la caractérisation des sites pollués chimiquement.

Il lui semble également important de favoriser les échanges entre les acteurs sur le retour d'expérience des chantiers de démantèlement et d'assainissement en matière de caractérisation des contaminations et d'établir ou de réviser les guides de bonnes pratiques, notamment pour l'utilisation des méthodes de géostatistiques.

De ses rencontres avec les différents acteurs de l'assainissement des sites et du démantèlement des installations nucléaires, le comité scientifique retient l'importance des enjeux technico-économiques de ces chantiers et des risques avérés de dérive, voire d'exécution insatisfaisante, tant en coût qu'en durée. Il considère que la quantification des objectifs d'assainissement ne peut faire l'impasse sur :

- la caractérisation itérative des pollutions initiales et résiduelles, en prenant en compte les meilleures techniques et méthodes disponibles et en incluant l'évaluation des incertitudes ;
- l'intégration des résultats de cette caractérisation dans un schéma conceptuel évolutif ;
- les coûts et délais prévisibles des opérations de démantèlement et d'assainissement ;
- la prise en compte de l'usage futur du site ;
- les voies et les taux de transfert de la pollution résiduelle ;
- les impacts résiduels hors site et le niveau de risque associé sur l'Homme et l'environnement ;
- la gestion des déchets secondaires des procédés de caractérisation et de dépollution.

Le comité scientifique incite à une réflexion sur l'optimisation globale des processus de dépollution et sur leur impact sociétal, dans une approche graduée, telle que recommandée au niveau international par le « Safety Guide WS-G-5.1 » de l'AIEA.

Cette réflexion pourrait s'inspirer notamment de la démarche suivie en matière de dépollution chimique, basée sur la maîtrise des risques résiduels, l'objectif étant qu'il n'y ait pas d'effet sanitaire toxique aigu et que la probabilité additionnelle de développer un cancer sur 70 ans soit inférieure à 10^{-5} . Elle est déclinée sous forme de seuils opérationnels pour chaque substance.

Une approche alternative proportionnée aux enjeux et qui mérite un examen attentif est celle proposée dans le guide canadien de caractérisation des sols pollués, basée sur des considérations statistiques.

Ces deux approches pourraient être prises en compte dans le cadre d'une réflexion visant à mettre en œuvre en France une approche graduée de l'assainissement des sites et du démantèlement des installations nucléaires.

8. Références

- [1] Guide méthodologique MEDTL, IRSN, ASN. Gestion des sites potentiellement pollués par des substances radioactives. Décembre 2011.
- [2] Guide ASN n°6. Arrêt définitif, démantèlement et déclasséement des installations nucléaires de base. Version actualisée du 30 août 2016.
- [3] Guide ASN n°14. Guide relatif à l'assainissement des structures dans les installations nucléaires de base. 30 août 2016.
- [4] Guide ASN n°24. Gestion des sols pollués par les activités d'une installation nucléaire de base. 30 août 2016.
- [5] Guide ASN. Guide relatif à la stratégie d'échantillonnage et aux mesures de la radioactivité dans la gestion des INB jusqu'à leur déclasséement. A paraître.
- [6] NF EN ISO 21365. Qualité du sol - Schémas conceptuels de sites pour les sites potentiellement pollués. Juin 2020.
- [7] NF EN ISO 18557. Principes de caractérisation des sols, bâtiments et infrastructures contaminés par des radionucléides, à des fins de réhabilitation. Février 2020.
- [8] MARSSIM, Multi-Agency Radiation Survey and Site Investigation Manual. NUREG-1575, Rev. 1, EPA 402-R-97-016, Rev. 1, DOE/EH-0624, Rev. 1. Août 2000.
- [9] Guidance Manual for Environmental site Characterisation in Support of Environmental and Human Health Risk Assessment. PN 1551 ISBN 978-1-77202-026-7 PDF. Canadian Council of Ministers of the Environment. 2016.
- [10] Guide du Ministère de la transition écologique et de la cohésion des territoires. Diagnostics des sites et sols pollués - Version 1, Avril 2023 (https://ssp-infoterre.brgm.fr/sites/default/files/documents/2023-04/2023-04_18_Guide_MTECT_Diagnostics-SSP_1.pdf)
- [11] Norme ISO 2859-1. Règles d'échantillonnage pour les contrôles par attributs — Partie 1: Procédures d'échantillonnage pour les contrôles lot par lot, indexés d'après le niveau de qualité acceptable (NQA). 1999.

- [12] Norme ISO/TR 8550-1:2007. Lignes directrices pour la sélection d'un système, d'un programme ou d'un plan d'échantillonnage pour acceptation pour le contrôle d'unités discrètes en lots — Partie 1: Lignes directrices générales pour l'échantillonnage pour acceptation. 2007.
- [13] Rapport RACCORD. Retour d'expérience critique sur l'utilisation de méthodes géostatistiques pour la caractérisation des sites et sols pollués. Etude n° 11-0514/1A. Février 2013.
- [14] R&D and Innovation Needs for Decommissioning Nuclear Facilities, rédigé par le NEA Working Party on Decommissioning and Dismantling (WPDD). 2014.
- [15] Euratom Research and Training Programme. Euratom Work Programme 2023-2025 for nuclear research and training.