HAL
open science

Couplage de mesures sur site et de méthodes géostatistiques : mise en oeuvre " en temps réel " à l'aide d'un FPXRF Projet REPERAGE

Hélène Demougeot-Renard, Laurence Haouche-Belkessam, Sébastien Denys, Michel Garcia, Dimitri d'Or

To cite this version:

Hélène Demougeot-Renard, Laurence Haouche-Belkessam, Sébastien Denys, Michel Garcia, Dimitri d'Or. Couplage de mesures sur site et de méthodes géostatistiques : mise en oeuvre " en temps réel " à l'aide d'un FPXRF Projet REPERAGE. 2. Rencontres nationales de la recherche sur les sites et sols pollués, Oct 2009, Paris, France. pp.NC. ineris-00973356

HAL Id: ineris-00973356

https://ineris.hal.science/ineris-00973356

Submitted on 4 Apr 2014

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

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

Couplage de mesures sur site et de méthodes géostatistiques : mise en œuvre « en temps réel » à l'aide d'un FPXRF Projet REPERAGE

Hélène Demougeot-Renard [(1)], Laurence Haouche-Belkessam [(2)], Sébastien Denys [(3)], Michel Garcia [(1)], Dimitri D'Or [(1)]

(1) FSS International r&d (nouvellement KIDOVA), 155, avenue R. Salengro, F-92370 Chaville, demougeot.renard@kidova.com

(2) ISSeP, Zoning A. Schweitzer, Rue de la Platinerie, B-7340 Colfontaine

(3) INERIS, Unité Déchets et Sites pollués, Parc Alata, BP 2, F-60550 Verneuil-en-Halatte

Résumé

La caractérisation des sites pollués effectuée à l'aide de prélèvements de sol et d'analyses de laboratoire est une étape longue et coûteuse. De telles pratiques incitent à limiter le nombre de points de mesure et ne permettent pas facilement, dans une même campagne, d'utiliser les premiers résultats d'analyse pour ajuster la localisation de nouveaux points d'échantillonnage.

Depuis plusieurs années sont apparus sur le marché de nouveaux appareils portatifs permettant d'analyser sur le terrain la teneur en polluants dans les sols en un temps très court. Parmi ceux-ci les spectromètres portables à fluorescence de rayons X (FPXRF) sont de plus en plus utilisés pour analyser les métaux. Dans le même temps, des approches géostatistiques adaptées aux particularités des sites et sols pollués ont été développées en Europe et sont de plus en plus utilisées pour cartographier les sols en fonction de seuils réglementaires ou estimer des quantités de matériaux contaminés, tout en en quantifiant les incertitudes locales ou globales associées. Le couplage des deux outils, mesures sur site et méthodes géostatistiques, permet d'envisager des campagnes de reconnaissance optimisées où le nombre et la localisation de nouveaux points de mesure sont déterminés au fur et à mesure de l'acquisition des données dans l'objectif de réduire l'incertitude affectant la modélisation de la contamination.

Le projet de recherche REPERAGE vise à concevoir une démarche associant mesures sur site et traitement géostatistique pour conduire de façon rationnelle des campagnes de reconnaissance par rapport à des scénarios et des objectifs classiques de gestion de sites contaminés (par ex. classification des sols par rapport à des seuils, estimation de tonnages, estimation de coûts de dépollution). Le travail réalisé inclut le développement théorique de la démarche et d'un code permettant de la mettre en œuvre, la validation de la démarche à partir des données d'un site réel bien renseigné, les environs de l'ancienne usine MétalEurop (Nord de la France), et sa mise en œuvre « en temps réel » sur le site d'une ancienne usine sidérurgique (Henricot II, Belgique).

La communication aura pour objet de présenter les principaux résultats obtenus dans le cadre de ce projet.

1 La démarche de couplage mesures sur site-géostatistique et sa validation

La démarche s'inscrit dans le contexte d'étude suivant : les sols doivent être classés par rapport à des seuils dans les catégories « contaminé » ou « sain », les seuils pouvant être des seuils de risque (indices de risque ou excès de risque individuel) ou bien des seuils de réhabilitation (teneurs limites au-delà desquelles les sols doivent être valorisés, traités ou mis en décharge). La collecte des données a pour objectif de réduire l'incertitude sur la classification des sols, dans des contraintes financières (budget limité), temporelles (délais de réalisation de l'étude) et géographiques (zones inaccessibles à l'échantillonnage en présence de bâtiments, câbles, etc.) propres à l'étude.

La classification et l'incertitude sur sa classification sont modélisées sur la base d'un ensemble de cosimulations colocalisées des teneurs en polluants, conditionnées par l'ensemble des données disponibles.

La démarche consiste à collecter un ensemble de données en plusieurs jours, les données étant utilisées d'un jour à l'autre pour mettre à jour la classification des sols et l'incertitude associée, et proposer un positionnement de nouvelles données dans les zones classées comme « incertaines ». Elle comprend une étape préliminaire et un ensemble d'étapes itératives.

L'étape préliminaire est destinée à établir les lois de régression entre mesures sur site et analyses de laboratoire, lois qui sont spécifiques à chaque site et aux conditions d'étude (ex. protocole de prélèvement, méthode analytique). Ces lois de régression sont essentielles puisque, bien que ce soient les mesures sur site qui sont multipliées ici, ce sont actuellement des analyses de laboratoire qui seules peuvent être comparées à des valeurs réglementaires ou bien utilisées pour le calcul des niveaux de risque. Les lois de régression constituent donc le moyen de déduire des valeurs de laboratoire à partir de valeurs obtenues par les outils de terrain. Cette étape préliminaire vise aussi à établir un premier modèle de corrélation spatiale pour les polluants d'intérêt.

Les étapes itératives consistent à mettre à jour la classification des sols avec les données collectées le jour j, puis à proposer un positionnement des points de mesure pour le jour suivant j+1, selon un schéma régulier, dans la zone des mailles « incertaines » de la classification. Bien que certaines étapes-clés restent sous l'expertise du géostatisticien, une grande partie des étapes de calculs ont été automatisées pour que la modélisation puisse être finalisée en quelques heures.

La démarche a été testée et validée en constituant un état de référence d'une contamination des sols (couche 0-20 cm). Un secteur des environs du site MetalEurop a fait l'objet d'une campagne de terrain intensive, de sorte qu'une simulation 2D des teneurs en Pb, polluant principal de la zone dispersé sur de grandes distances par voie aérienne, puisse être générée et constituer un état réaliste et quasi-exhaustif de la contamination. Une simulation séquentielle gaussienne des teneurs en Pb de laboratoire constitue la *référence-labo*, tandis qu'une cosimulation colocalisée des teneurs en Pb mesurées par FPXRF constitue la *référence-FPXRF*. Les deux simulations reproduisent la corrélation de 0.70 observée entre les deux types de données sur échantillons dupliqués.

A partir de ces solutions de référence, la démarche de reconnaissance a été mise en œuvre de manière virtuelle, en collectant les deux types de données, FPXRF et laboratoire, selon le schéma dicté par la démarche, et la classification finale des sols en fin de reconnaissance a été comparée à la *référence-labo*. La modélisation finale après 7 jours de campagne fictive retrouve avec une très bonne précision la classification « vraie » des sols fournie par la *référence-labo* : le modèle classe correctement 87% du volume total de la zone dans les catégories « contaminé » et « sain ».

2 Application dans des conditions réelles sur le site Henricot II

L'application de la démarche sur le site Henricot II a consisté en une étape préliminaire d'une journée (établissement des lois de régression entre mesures sur site et analyses de laboratoire) suivie de 5 jours de reconnaissance itérative. La cartographie 3D de la classification des sols par rapport aux seuils de teneurs réglementaires porte sur plusieurs métaux et concerne 2 m de remblais. Au terme de la reconnaissance, la modélisation fait apparaître une répartition de la contamination en nombreux « spots » de très petites dimensions, avec une incertitude résiduelle liée à l'hétérogénéité du phénomène (contamination constitutive des remblais). Au terme d'une semaine de campagne, dans des délais qui ne pourraient être tenus avec une procédure de reconnaissance classique, le gestionnaire du site dispose ainsi d'une cartographie le renseignant sur la complexité de la contamination et sur lequel il peut s'appuyer pour définir des mesures de gestion.

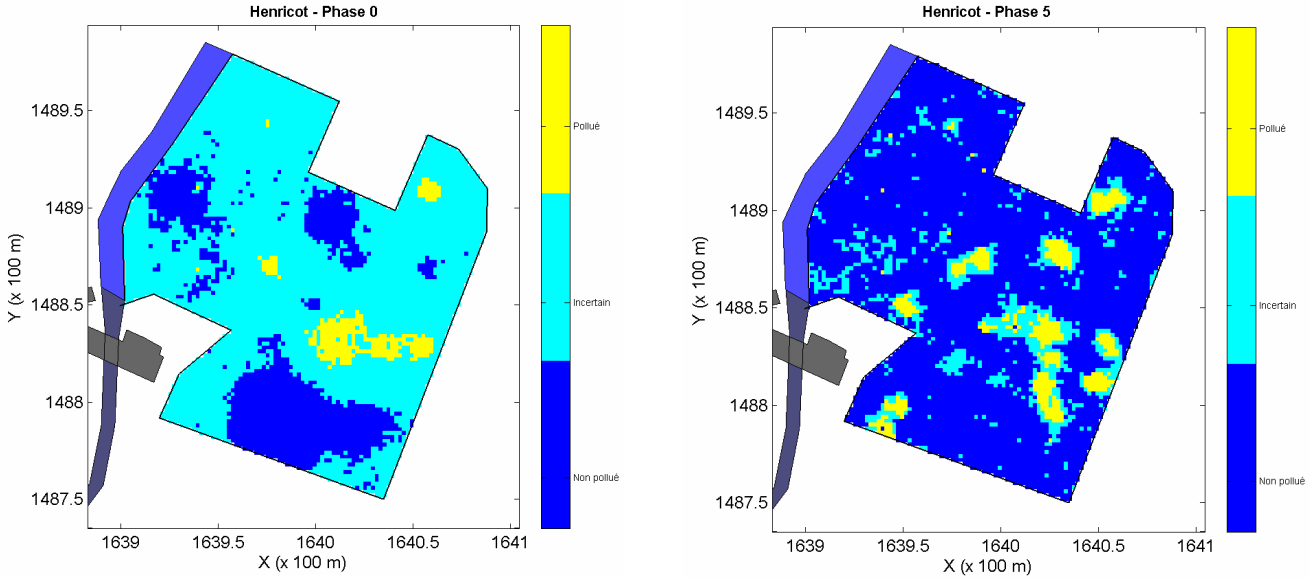

Figure 1 Henricot II - Carte de classification des sols de surface (0-0.25 m) en fin d'étape préliminaire (gauche) et au bout du 5ème jour d'étape itérative (droite)

1. INTRODUCTION

La caractérisation des sites pollués effectuée à l'aide de prélèvements de sol et d'analyses de laboratoire est une étape longue et coûteuse. De telles pratiques incitent à limiter le nombre de points de mesure et ne permettent pas facilement, dans une même campagne, d'utiliser les premiers résultats d'analyse pour ajuster « en temps réel » la localisation de nouveaux points d'échantillonnage.

Depuis plusieurs années sont apparus sur le marché de nouveaux appareils portatifs permettant d'analyser sur le terrain la teneur en polluants dans les sols en un temps très court. Parmi ceux-ci les spectromètres portables à fluorescence de rayons X (FPXRF) sont de plus en plus utilisés pour analyser les métaux. Dans le même temps, des approches géostatistiques adaptées aux particularités des sites et sols pollués ont été développées en France et ailleurs pour cartographier les sols, en fonction de seuils réglementaires, ou pour estimer des quantités de matériaux pollués, tout en quantifiant les incertitudes locales ou globales associées. Le couplage des deux outils, mesures sur site et méthodes géostatistiques, permet d'envisager des campagnes de reconnaissance plus optimales où le nombre et la localisation de nouveaux points de mesure sont déterminés au fur et à mesure de l'acquisition des données dans l'objectif de réduire l'incertitude sur les estimations de l'état de pollution des sols.

Ayant débuté en décembre 2006 pour une durée de 26 mois, le projet de recherche REPERAGE [1] a permis de concevoir une démarche associant mesures sur site et traitement géostatistique pour conduire de façon rapide et rationnelle des campagnes de reconnaissance par rapport à des scénarios et des objectifs classiques de gestion de sites pollués (par ex. classification des sols par rapport à des seuils, estimation de tonnages, estimation de coûts de dépollution). Le projet incluait le développement théorique de la démarche, le développement d'un code pour la mettre en œuvre, la validation de la démarche à partir des données d'un site réel bien renseigné (environs de l'ancienne usine MétalEurop, Nord de la France) et sa mise en œuvre « en temps réel » sur le site d'une ancienne usine sidérurgique (Henricot II, Belgique).

Cette communication présente une partie des résultats obtenus dans ce projet.

2. PRINCIPE ET VALIDATION DE LA DEMARCHE DE COUPLAGE ENTRE MESURES SUR SITE-ET GEOSTATISTIQUE

2.1. Principes généraux

La démarche de couplage s'inscrit dans le contexte d'étude suivant. La caractérisation d'un site pollué doit être menée pour classer les sols[1] dans les catégories « pollué » ou « sain » par rapport à des seuils de teneur réglementaires ou de risque. Les premiers correspondent à des teneurs limites en polluant au-delà desquelles les sols doivent être traités, mis en décharge ou valorisés. Les seconds résultent d'une analyse de risque sanitaire, par rapport à une exposition exprimée en indices de risque ou en excès de risque individuel, et déterminent des limites au-delà desquelles les sols sont considérés comme susceptibles de nuire à l'homme ou à son environnement. La collecte de données a pour objectif de réduire l'incertitude sur la classification des sols en tenant compte de contraintes financières (budget limité), temporelles (délais de réalisation du diagnostic) ou géographiques (zones inaccessibles à l'échantillonnage en présence de bâtiments, infrastructures, etc.).

La démarche proposée (**Figure 1**) consiste ainsi à collecter un ensemble de données sur plusieurs jours, les données étant utilisées d'un jour à l'autre (phase de la démarche) pour mettre à jour la classification des sols et proposer un positionnement convenable des nouvelles données dans les zones identifiées comme trop incertaines.

Les seuils de teneur doivent être comparés à des analyses de laboratoire, alors que les données acquises en cours de campagne de reconnaissance, et qui servent à améliorer la classification des sols, sont des mesures sur site qui présentent en général un écart avec les analyses de laboratoire. La démarche comporte donc une première étape, dite préliminaire,

[1] Par mailles ou blocs de dépollution.

destinée à établir une loi de régression entre mesures sur site et analyses de laboratoire pour chacun des polluants d'intérêt pour le site d'étude. Pour cela, un ensemble de mesures sur site et d'analyses de laboratoire sont effectuées sur les mêmes échantillons en veillant à disposer de données représentatives de toute la gamme de teneurs en polluants présente sur le site. Cette étape préliminaire vise aussi à modéliser la variabilité spatiale des polluants d'intérêt (modèles de variogrammes croisés entre mesures sur site et analyses de laboratoire). Les modèles statistiques de corrélation ainsi obtenus sont ceux à utiliser ensuite pour simuler la pollution par une méthode géostatistique et pour mettre à jour la classification des sols au cours de la campagne de reconnaissance en prenant en compte l'ensemble des données disponibles, c'est-à-dire les analyses de laboratoire effectuées en phase préliminaire et les mesures sur site en nombre croissant.

En théorie, la rationalisation de la reconnaissance consiste à définir de façon optimale le nombre et la localisation de points d'échantillonnage ou de mesure. En pratique, le nombre de données qu'il est possible de collecter sur une journée dépend des moyens mis en œuvre (matériel et personnel) et des contraintes de terrain. Augmenter ou diminuer le nombre de données collectées au cours d'une phase de reconnaissance revient alors à augmenter ou diminuer la durée des phases ou les moyens de reconnaissance. Bien qu'il soit aussi possible d'optimiser la durée des phases, nous supposons ici qu'elle est imposée.

L'approche proposée pour conduire la reconnaissance consiste ainsi à positionner les données de la phase de reconnaissance j+1 dans la ou les zones du modèle classées comme « incertaines »[2] en fin de phase j. Pour une pollution de surface (modèle 2D), les points sont placés selon un schéma régulier[3] adapté à la géométrie qui peut être complexe dans la zone incertaine. Pour une pollution en profondeur (modèle 3D), de la même façon il est possible de répartir au mieux un nombre fixé de données dans la zone incertaine. Ce mode de positionnement peut cependant conduire à placer un échantillon unique en profondeur sur un sondage. Le coût d'un sondage étant très supérieur à celui de la mesure, il a été choisi de se fixer a priori le nombre et la position des échantillons collectés dans chaque sondage et de développer un algorithme qui optimise uniquement la position des sondages dans la zone incertaine. Les échantillons peuvent alors être répartis régulièrement (systématiquement) sur un sondage ou bien en fonction de la lithologie ou de tout autre critère.

Compte-tenu des ressources informatiques et des capacités des outils de terrain actuels, il a été jugé raisonnable de pouvoir mettre à jour la modélisation géostatistique à la fin de chaque journée de terrain. Nous considérons donc qu'une <u>étape de reconnaissance itérative</u> correspond à <u>un jour de terrain</u>. Le traitement géostatistique des données est assuré en quelques heures, de sorte que la position des données du jour suivant peut être envoyée par courriel à l'équipe de terrain, le soir même ou le lendemain matin avant le démarrage des travaux.

Un budget et un délai limitent en général l'ampleur de la reconnaissance des sites. Pour en tenir compte, le module de positionnement des nouvelles données comporte des compteurs qui permettent d'alerter le géostatisticien en cas de dépassement des coûts et des délais imposés. Le nombre de données qu'il est encore possible de collecter est alors ajusté automatiquement. Ce module peut aussi prendre en compte les zones inaccessibles à l'échantillonnage pour positionner les nouveaux points de sondages en dehors de ces zones.

2.2. Code de calcul

Le code développé pour recevoir et traiter les données et pour calculer les positions des points de mesure d'une étape à l'autre est constitué d'un ensemble de modules (scripts) développés en langage Matlab (The Mathworks™). Le code a été conçu le plus général possible pour être adaptable à la grande variété des situations rencontrées, que ce soit en termes de pollution ou de cadre réglementaire. Pour que le traitement géostatistique des données puisse être réalisé en quelques heures, les différentes étapes de calcul ont en outre

[2]Zones ou le risque est trop élevé de classer les mailles comme « contaminées » ou « saines ».
[3] Avec dans certains cas quelques resserrements locaux pour capturer la structure spatiale à petite distance.

été automatisées au mieux. Ceci inclut la production et la sauvegarde automatique de résultats sous forme de fichiers Matlab, de tableaux Excel (Microsoft™) ou de figures dans un format standard (png). Les étapes qui nécessitent l'expertise du géostatisticien (ex. variographie) restent cependant non automatisées.

2.3. Aspects pratiques

Plusieurs conditions doivent être remplies pour que la démarche soit mise en œuvre correctement. La campagne de terrain et les conditions de traitement des données doivent être soigneusement préparées pour limiter les imprévus. Ces tâches préparatoires rentrent dans l'étape préliminaire qui n'est pas soumise aux mêmes contraintes de temps que les étapes itératives. Elles incluent l'élaboration d'un protocole opératoire d'échantillonnage et de mesure, la définition des identifiants des prélèvements, le format et le type de fichier à transmettre en fin de journée au modélisateur et en début de journée à l'équipe de terrain.

Les données doivent être collectées, sauvegardées et transmises dans des délais très courts au modélisateur qui n'est pas forcément sur place. Le positionnement des points de mesure s'effectue par DGPS et les mesures par un appareil de terrain portable permettant l'acquisition et la sauvegarde des données. L'équipe de terrain doit aussi avoir la possibilité de transmettre les données par internet.

Il est conseillé de munir toute l'équipe de téléphones portables pendant la durée de la reconnaissance, y compris le soir généralement après 18h00 pendant que les données sont traitées, car, malgré tout le soin apporté à la préparation de la campagne, des imprévus peuvent en effet survenir : sondage localisé sur un terrain trop dur pour être foré, erreurs de sauvegarde des positions des sondages, etc.

Le code de calcul permet de proposer un positionnement des points de mesure optimisé, compte-tenu des données disponibles sur l'état de pollution des sols à la fin d'une phase. L'équipe de terrain détient cependant un outil de mesure qui, en quelques minutes, fournit une évaluation de la teneur en polluants. Cette connaissance immédiate offre à l'opérateur la possibilité d'adapter la reconnaissance, par exemple en prolongeant un sondage si des teneurs élevées continuent d'être mesurées en profondeur, ou en forant de nouveaux sondages si la pollution atteint des zones initialement prédites comme non polluées. Nous suggérons donc de laisser au libre arbitre de l'équipe de terrain un petite partie des mesures qu'il est possible de réaliser en une phase de reconnaissance (ex. 80% des mesures positionnées par le code de calcul, 20% positionnées au jugé sur le terrain).

La démarche proposée permet de rationaliser l'échantillonnage d'un site dont la pollution présente une certaine continuité spatiale. Elle sera inefficace si le phénomène de pollution n'est pas structuré (répartition purement aléatoire des teneurs).

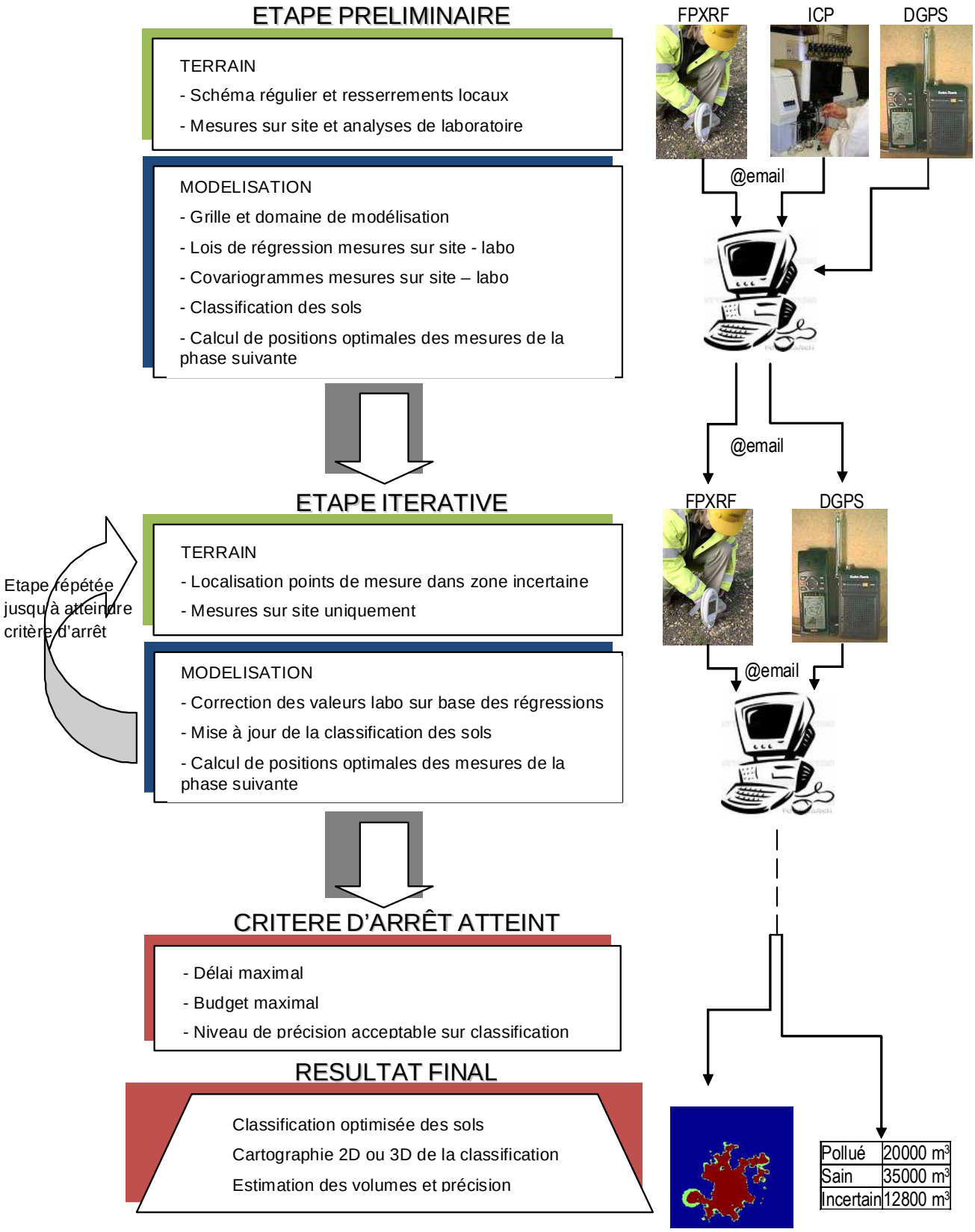

Figure 1 - Schéma de la démarche de couplage de mesures sur site et d'un traitement géostatistique

3. APPLICATION DE LA DEMARCHE DANS DES CONDITIONS REELLES AU SITE HENRICOT II

3.1. Conditions de mise en œuvre

Le site sélectionné pour mettre en œuvre la démarche de couplage « en temps réel » est une partie de l'ancienne usine sidérurgique Henricot II de Court Saint Etienne en Belgique (5.6 ha). En se plaçant dans une perspective de dépollution, la modélisation géostatistique de la pollution vise à classer les sols par rapport à des seuils de teneurs au-delà desquels ils doivent être assainis. Les métaux et les seuils retenus pour les besoins de la démonstration sont le Cu, le Ni et le Pb (seuils : 100 mg/kg ms), ainsi que le Zn (seuil : 150 mg/kg ms).

L'objectif de la reconnaissance était de réduire au mieux l'incertitude sur la classification des sols, cette classification intervenant avec un niveau de confiance qui permet de contrôler l'étendue des zones incertaines à échantillonner. Le budget de la reconnaissance était limité à celui fixé dans la convention de recherche liant l'ADEME et les partenaires du projet.

3.2. Campagne de terrain

La campagne de terrain a consisté en une très longue journée d'étape préliminaire où 18 sondages ont été foncés pour prélèvements et mesures sur 52 échantillons de remblais, et en 5 jours d'étapes itératives de reconnaissance durant lesquels 216 mesures sur site ont été réalisées sur 47 sondages différents. En moyenne, 43 mesures FPXRF ont pu être réalisées chaque jour (voir colonne « Nombre de données FPXRF/labo » du **Tableau 1**).

Etape	Nombre de sondages	Nombre de données FPXRF / labo	Niveau de confiance classification	Volume classé « Pollué »	Volume classé « Sain »	Volume classé « Incertain «
0	18	52 / 52	70%	3616 m^3	17813 m^3	23525 m^3
1	8	40 / -	60%	3186 m^3	27428 m^3	14340 m^3
2	9	40 / -	57.5%	1796 m^3	34596 m^3	8562 m^3
3	10	50 / -	55%	2060 m^3	38760 m^3	4134 m^3
4	10	44 / -	55%	2996 m^3	36542 m^3	5416 m^3
5	10	42 / -	55%	3384 m^3	36523 m^3	5047 m^3

Tableau 1 – Résultats de l'application réelle de la démarche de couplage au site Henricot Volumes de sols « pollués », « sains » et « incertains » à chaque nouvelle étape de reconnaissance.

Durant la phase de reconnaissance itérative, les opérations effectuées chaque jour ont été organisées de la façon suivante, la journée de terrain commençant à 08h00.

1. Positionnement à l'aide d'un DGPS des sondages indiquée sur le plan et dans le tableau fournis par les géostatisticiens la veille au soir.
2. Réalisation des sondages, prélèvements et mesures sur site aux emplacements prévus (équipe de trois personnes).
3. Envoi entre 17h00 et 18h00 des résultats des mesures DGPS et FPXRF aux géostatisticiens par courriel sous forme de tableaux Excel.
4. Traitement géostatistique des données durant la soirée puis envoi des positions des nouveaux sondages et des points de mesure pour la journée suivante à l'équipe de terrain par courriel sous forme de tableaux et de carte.

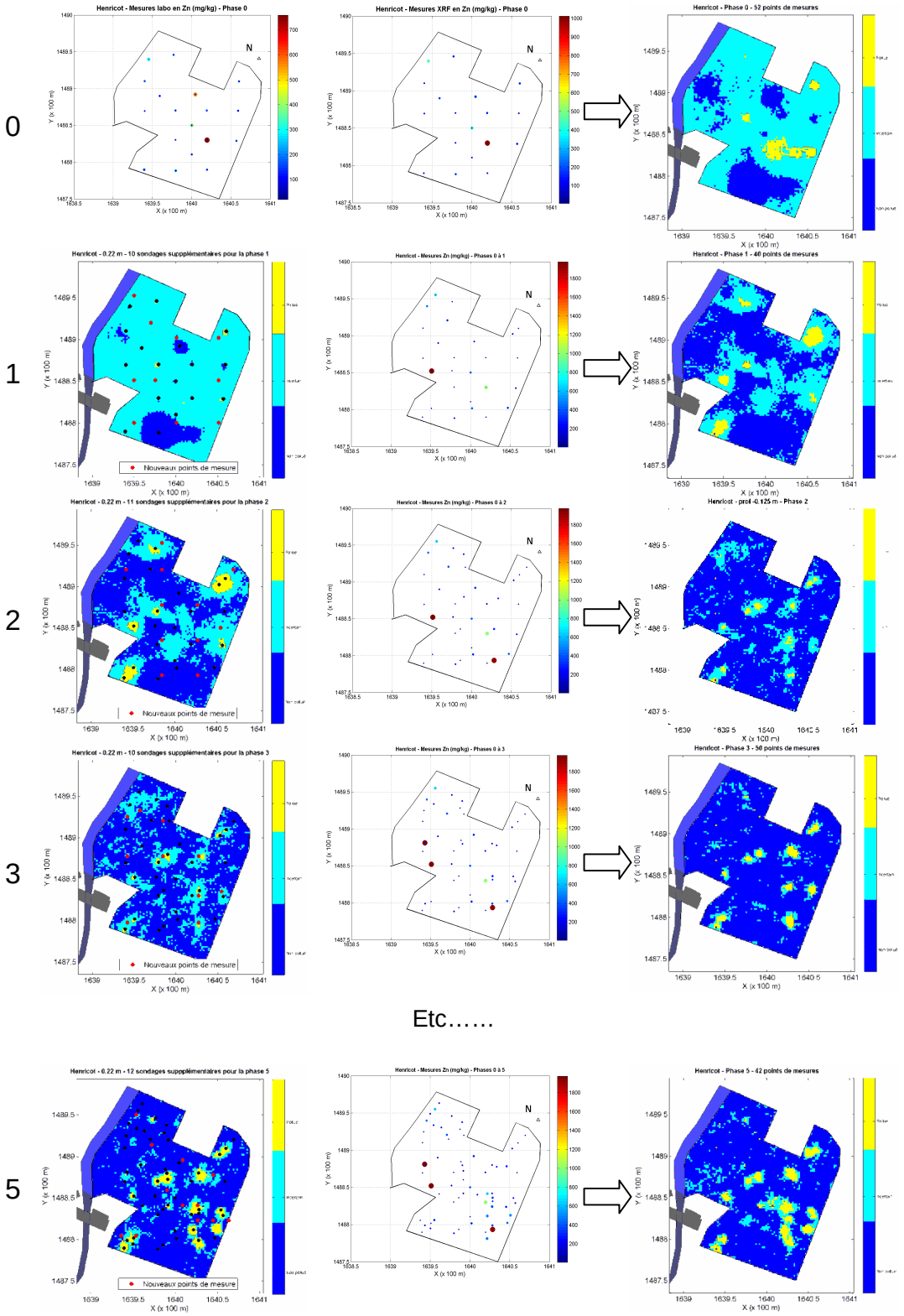

Figure 2 – Résultats de l'application réelle de la démarche de couplage au site Henricot II. Evolution de la classification des sols avec l'acquisition de nouvelles mesures FPXRF.

3.3. Traitement des données

3.3.1. Etape préliminaire (étape 0)

Les données de terrain et de laboratoire de l'étape préliminaire ont été traitées en 3-4 jours et ont servi à définir les conditions de modélisation.

L'analyse exploratoire des données a mis en évidence une corrélation entre les éléments Cu, Ni, Pb et Zn (coefficients de corrélation de rang de Spearman variant de 0.61 à 0.80). De même, une corrélation a été observée entre les mesures FPXRF et les analyses ICP-OES de laboratoire (coefficients de corrélation de Spearman variant de 0.55 à 0.95). L'analyse variographique a mis en évidence une structure spatiale sur les 4 éléments, avec une moindre continuité sur les éléments Cu et Ni que sur les éléments Pb et Zn, et une portée plus courte sur la verticale que dans le plan horizontal. Les teneurs en métaux ont donc été simulées conjointement par simulation séquentielle gaussienne en utilisant les modèles de variogrammes croisés tirés des données.

Une loi de régression a été ajustée aux données de laboratoire et de terrain et la relation entre l'écart-type du résidu [1] et les mesures FPXRF a été modélisée pour chacun des 4 métaux.

A partir des simulations conjointes des teneurs en métaux, une classification globale des sols, par rapport aux seuils définis pour les 4 métaux, a été calculée pour un niveau de confiance de 70%. Pour le positionnement des 10 premiers nouveaux sondages, il a cependant été choisi de relever le niveau de confiance à 80% pour étendre la zone incertaine et permettre une couverture plus large des nouveaux sondages.

3.3.2. Etapes itératives (étapes 1 à 5)

Les données des étapes itératives ont été traitées en 7h le premier soir, 5h en fin d'étapes 2 et 3, 3h en fin d'étape 4 et 2h en fin d'étape 5. Le traitement des données a été principalement marqué par la nécessité d'adapter les conditions de modélisation et de positionnement des nouveaux sondages au fur et à mesure de leur acquisition.

- L'apport de données complémentaires a conduit en effet à corriger les modèles de variogrammes croisés. Les portées horizontales et verticales des modèles se sont révélées nettement plus courtes que ce qui avait pu être déduit des données de la campagne de terrain préliminaire. Dans le plan horizontal, selon le polluant, les portées ont être réduites de 33-46 m à 9-15 m ; sur la verticale, les portées ont été réduites de 1-6 m à 0.8-1.2 m.
- La pollution a progressivement montré une forte variabilité à petite échelle, de fortes teneurs pouvant jouxter de faibles teneurs à courtes distances. Cette variabilité à petite échelle a rendu difficile la classification des sols avec un niveau de confiance élevé, sauf à augmenter considérablement le nombre de données à collecter. Le niveau de confiance sur la classification des sols a donc dû être revu à la baisse au fur et à mesure de l'acquisition des données pour se fixer à 55% (colonne « niveau de confiance classification » du **Tableau 1**).
- Le phénomène apparaît cependant structuré, avec plusieurs petits « spots » de fortes teneurs répartis dans l'ensemble du domaine d'étude (**Figure 2**). Il est apparu alors nécessaire d'adapter l'algorithme de positionnement des sondages. L'algorithme initial détermine en effet l'enveloppe incluant toutes les mailles de la grille de classification classées « incertaines » et place les sondages à l'intérieur de cette enveloppe selon un schéma régulier. Cette enveloppe est très grande lorsque les mailles « incertaines » se répartissent sur tout le domaine d'étude, ce qui est le cas du site Henricot II. Les nouveaux points de mesures sont alors positionnés dans cette grande enveloppe sans qu'ils puissent aider à préciser la délimitation des « spots ». L'algorithme de calcul des positions de sondage a donc été modifié à partir de l'étape itérative 4 pour favoriser le positionnement des nouveaux sondages dans les zones incertaines situées autour des « spots » de pollution. Cette modification a porté sur la façon de définir la répartition régulière des sondages dans la zone incertaine (utilisation d'une grille fine régulière).

4. CONCLUSION

La démarche de couplage permet d'acquérir un grand nombre de mesures sur site en un temps très court tout en optimisant leur positionnement. Sur le cas d'étude Henricot II, 65 sondages, 52 analyses de laboratoire et 268 mesures FPXRF ont été réalisés en 6 jours de campagne si l'on y inclut l'étape de reconnaissance préliminaire. Ces données permettent de classer 89% du volume du domaine d'étude dans les catégories « pollué » ou « sain » avec un niveau de confiance de 55% en rapport avec l'objectif de délimiter les spots de pollution reconnus. Au terme de cette reconnaissance itérative, le volume de sol classé « pollué » est égal à 3 384 m^3 (8% du volume total du domaine d'étude), le volume de sol classé « sain » est égal à 36 523 m^3 (81% du volume total du domaine d'étude) et le volume de sol classé « incertain » est égal à 5 047 m^3 (11% du volume total) (**Tableau 1**).

La démarche permet d'acquérir une bonne connaissance de la répartition spatiale de la pollution dans les différentes couches de sol (7 couches de 0 à 1.75 m de profondeur). Cet apport est très net sur le cas Henricot II où la pollution révèle une répartition en « spots » de petite taille au fur et à mesure de l'acquisition des données (voir par exemple les cartes de classification de la couche 0-0.25 m des étapes 0 à 5 présentées à la **Figure 2**).

Les tests réalisés dans le cadre du projet REPERAGE mettent en évidence la nécessité d'adapter les exigences sur la précision d'estimation à la situation rencontrée. Ainsi, il est possible d'atteindre un niveau de confiance de 80% sur la cartographie et les volumes de sols du cas d'étude MétalEurop (phénomène de pollution très continu) [1] alors qu'il est illusoire de vouloir atteindre un tel niveau sauf effort démesuré de reconnaissance sur le cas Henricot II. Le niveau de confiance à atteindre a finalement été fixé à 55% pour ce dernier site.

Alors que la réduction des risques d'erreurs de classification des sols au fur et à mesure de l'acquisition de données a pu être vérifiée sur le cas d'étude MétalEurop [1], elle ne peut l'être clairement prouvée sur le cas d'étude Henricot II, puisque les niveaux de confiance recherchés ont dû être revus à la baisse au fur et à mesure de l'acquisition des données.

La démarche de couplage de mesures sur site et d'une analyse géostatistique peut être appliquée à différents stades des méthodologies française et wallonne de gestion des sites pollués : en France, la démarche permettrait de réaliser des **diagnostics de site** en des temps plus courts que ne le permettent des campagnes classiques. Lors **du plan de gestion**, une telle démarche permettrait d'estimer les volumes de terres contaminées, et par suite les coûts de réhabilitation. Les méthodes géostatistiques offrent en outre la possibilité de **quantifier les incertitudes** et d'en avoir une représentation spatialisée. En Wallonie, la démarche de couplage pourrait être intégrée à une **étude d'orientation** ou à une **étude de caractérisation**. Elle apparaît également comme un bon moyen pour faciliter la **communication** entre les différentes parties prenantes.

5. REFERENCE

[1] Demougeot-Renard, H. ; Haouche-Belkessam, L. ; Denys, S. Reconnaissance assistée de sites pollués par l'utilisation conjointe de mesures rapides sur site et de traitements géostatistiques – partie 2. Conception et validation d'une démarche itérative de reconnaissance. Rapport final REPERAGE. Rapport FSSADEME2007002; 2008.

6. REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient l'ADEME pour avoir soutenu financièrement les projets OUTRAGE et REPERAGE et adressent une pensée particulière à Martine Louvrier (ADEME), Pascal Oustrière (Agence régionale de l'innovation Picardie) et Agnès Laboudigue (Ecole des Mines de Douai) dont l'intérêt et la persévérance ont permis d'aller au bout de cette aventure !