

SYNTHESE / EXTENDED ABSTRACT
FRANÇAIS / ENGLISH

**METHODES D'ESTIMATION ET D'OPTIMISATION
DES QUANTITES DE TERRES POLLUEES A TRAITER**

**RETOUR D'EXPERIENCE SUR LA VALIDITE
DES ESTIMATIONS A PARTIR DE DONNEES REELLES**

***ESTIMATION AND OPTIMIZATION METHODS FOR ASSESSING
QUANTITIES OF SOILS TO BE REMEDIATED***

***FEEDBACK FROM REAL CASES ABOUT THE VALIDITY OF ESTIMATED
CONTAMINATED SOIL VOLUMES / POLLUTANT MASSES***

mai 2016

N. JEANNEE, C. FAUCHEUX – GEOVARIANCES
H. DEMOUGEOT-RENARD – eOde



Créée en 1989 à l'initiative du Ministère en charge de l'Environnement, l'association RECORD – REseau COopératif de Recherche sur les Déchets et l'Environnement – est le fruit d'une triple coopération entre industriels, pouvoirs publics et chercheurs. L'objectif principal de RECORD est le financement et la réalisation d'études et de recherches dans le domaine des déchets et des pollutions industrielles.

Les membres de ce réseau (groupes industriels et organismes publics) définissent collégalement des programmes d'études et de recherche adaptés à leurs besoins. Ces programmes sont ensuite confiés à des laboratoires publics ou privés.

Avertissement :

Les rapports ont été établis au vu des données scientifiques et techniques et d'un cadre réglementaire et normatif en vigueur à la date de l'édition des documents.

Ces documents comprennent des propositions ou des recommandations qui n'engagent que leurs auteurs. Sauf mention contraire, ils n'ont pas vocation à représenter l'avis des membres de RECORD.

- ✓ Pour toute reprise d'informations contenues dans ce document, l'utilisateur aura l'obligation de citer le rapport sous la référence :
RECORD, Méthodes d'estimation et d'optimisation des quantités de terres polluées à traiter. Retour d'expérience sur la validité des estimations à partir de données réelles, 2016, 162 p, n°14-0515/1A
- ✓ Ces travaux ont reçu le soutien de l'ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie)
www.ademe.fr

© RECORD, 2016

RESUME

L'estimation des quantités de terres à dépolluer est une préoccupation majeure des acteurs de la gestion des sites et sols pollués. En effet, les écarts avec les quantités réellement dépolluées ont des conséquences importantes en termes financiers (p.ex. dépassement de budget), temporels (p.ex. retards pris sur les travaux de reconversion de sites), sanitaires et environnementaux (p.ex. risque d'exposition en cas de pollution résiduelle). Or de nombreux facteurs conduisent à des écarts parfois significatifs entre diagnostic et dépollution : complexité du contexte de pollution, caractérisation insuffisante, méthode d'estimation des quantités inappropriée, etc.

Par rapport à ce contexte, l'étude identifie, sur la base d'un retour d'expérience sur 23 jeux de données industrielles et d'une enquête préalable auprès de professionnels des sites et sols pollués, les méthodologies les plus pertinentes pour optimiser les estimations des quantités de terres à dépolluer. L'étude fournit de plus des résultats chiffrés des écarts observés en situation réelle, qui viennent conforter les impressions ressenties par les professionnels dans le cadre de leur activité.

Les résultats obtenus conduisent à des recommandations opérationnelles visant à améliorer la qualité des prédictions de quantités de terres/polluants en phase diagnostic. Elles concernent les conditions d'investigation, les méthodes d'estimation et leurs conditions de mise en œuvre, l'influence de la complexité des situations de pollution et l'intensité des contrôles en cours de dépollution. La pertinence de ces recommandations a été assurée par l'implication d'une quinzaine d'acteurs reconnus pour leur expertise dans le domaine des sites et sols pollués.

MOTS CLES

Sites et sols pollués, diagnostic, estimation de quantités, erreurs de prédiction, réconciliation, retour d'expérience, méthodes empiriques, interpolation déterministe, géostatistique, excavation, traitement sur site / *in situ*.

SUMMARY

Assessing soil quantities to be remediated is a major concern in contaminated land management. Indeed, discrepancies between estimates obtained during the characterization stage and the quantities actually remediated have important implications in financial terms (e.g. on budget), scheduling (e.g. delays) or health and environmental aspects (e.g. exposure risk in case of residual pollution). However, many factors lead to potentially significant differences between characterization and remediation results: complexity of pollution, inadequate characterization methodology, improper approach for estimating contaminated quantities, etc.

Within this framework, the project aims at identifying the most appropriate methodologies to optimize the estimation of contaminated soils. It relies on a feedback derived from industrial data sets and a qualitative survey among professionals involved in contaminated land management. The study further provides quantitative results on the differences observed in real situations, which clearly reinforce the impressions felt by the professionals.

The results lead to operational recommendations in order to improve the quality of predictions of contaminated quantities at characterization stage. They are related to the investigation conditions/requirements, the estimation methods and their conditions of use, the influence of the complexity of pollution and finally the intensity of controls performed during the remediation itself. The relevance of these recommendations has been ensured by the involvement of fifteen actors recognized for their expertise in the area of contaminated land management.

KEYWORDS

Contaminated sites, characterization, pollutant mass, soil volume, prediction error, reconciliation, experience feedback, empirical methods, deterministic interpolation, geostatistics, excavation, *in situ* / on site treatment.

Contexte et objectifs

L'économie globale d'une opération de dépollution de site est fortement impactée par la quantité de sol qui sera excavée, traitée, puis valorisée ou éliminée. L'estimation de ces quantités est ainsi une préoccupation majeure des acteurs de la gestion des sites et sols pollués, car les écarts avec les quantités réellement dépolluées ont des conséquences importantes en termes financiers (p.ex. dépassement de budget), temporels (p.ex. retards pris sur les travaux de reconversion de sites), sanitaires et environnementaux (p.ex. risque d'exposition en cas de pollution résiduelle).

De nombreux facteurs conduisent à des écarts parfois significatifs entre les volumes de sols ou masses de polluants prédits en phase diagnostic et ceux réellement dépollués en phase chantier : complexité du contexte de pollution, caractérisation insuffisante, méthode d'estimation des quantités inappropriée, etc. Avec l'acquisition de l'expérience, les professionnels de la dépollution ont établi des règles de bonnes pratiques pour la réalisation des diagnostics ; pour autant, des écarts significatifs persistent entre la phase d'estimation en diagnostic et la phase de dépollution et peuvent conduire à l'insatisfaction des donneurs d'ordre. Dans le même temps, les professionnels peinent auprès des mêmes donneurs d'ordre à justifier de l'importance de certaines pratiques en diagnostic (p.ex. multiplication du nombre de points d'échantillonnage pour réduire l'incertitude d'estimation), pour éviter les mauvaises surprises en dépollution.

Dans ce contexte, l'objectif de l'étude est de **déterminer, sur la base d'un retour d'expérience sur des jeux de données industrielles, les méthodologies les plus pertinentes** pour optimiser les estimations des quantités de terres à dépolluer. L'étude fournit de plus des **résultats chiffrés** des écarts observés en situation réelle, qui viennent conforter les impressions ressenties par les professionnels dans le cadre de leur activité.

Dans le détail, l'étude a comporté les étapes de travail suivantes :

- Enquête auprès de professionnels des sites et sols pollués pour recueillir leur expérience des écarts observés entre estimations de diagnostic et résultats de dépollution,
- Collecte et sélection de jeux de données industrielles auprès d'acteurs du domaine,
- Etablissement d'une méthodologie d'analyse des cas,
- Analyse des cas à proprement parler, aboutissant à des recommandations opérationnelles.

La pertinence des recommandations proposées a été assurée par deux comités d'experts : le comité de suivi du projet, complété en fin de projet par un second comité, indépendant et qui a pu fournir un regard extérieur sur les résultats obtenus.

Méthodologie et résultats

Enquête par questionnaire qualitatif

L'enquête menée au moyen d'un questionnaire est un préalable qui permet de définir le cadre général dans lequel s'insèrent les cas d'étude rassemblés. Elle permet notamment d'apprécier dans quelle mesure ceux-ci sont représentatifs des situations les plus fréquemment rencontrées par les professionnels des sites et sols pollués. Bien que par nature subjective et qualitative, la perception des professionnels permet d'identifier les principaux obstacles à la bonne concordance entre diagnostics et chantiers de dépollution.

Le questionnaire électronique a été envoyé à une base d'environ 80 contacts, essentiellement en France, Suisse et Belgique. Il a en outre été relayé par les associations UPDS et

Context and objectives

The global economy of a remediation project is greatly impacted by the amount of soil to be excavated, treated and then valorized or eliminated. The estimation of these quantities is thus a major concern for contaminated land management actors; indeed, discrepancies between estimates obtained during the characterization stage and the quantities actually remediated have important implications in financial terms (e.g. on budget), scheduling (e.g. delays) or health and environmental aspects (e.g. exposure risk in case of residual pollution).

Many factors lead to potentially significant differences between characterization and remediation results: complexity of pollution, inadequate characterization methodology, improper approach for assessing contaminated quantities, etc. Increasing experience has conducted remediation actors to establish rules of good practice for the characterization stage. However, "significant" gaps are still observed between the estimation of contaminated quantities at characterization stage and the remediation itself; these gaps lead to potential dissatisfaction of customers. In the same time, professionals are struggling with the same customers to justify the importance of adequate characterization practices (e.g. increasing the number of sampling points to reduce uncertainties) in order to avoid unpleasant discoveries during remediation.

*Within this framework, the project aims at **identifying the most appropriate methodologies to optimize the estimation of contaminated soils**. It relies on a **feedback derived from industrial data sets and a qualitative survey amongst professionals involved in contaminated land management**. The study further provides **quantitative results** of the differences observed in real situations, which clearly reinforce the impressions felt by the professionals.*

The results lead to operational recommendations in order to improve the quality of predictions of contaminated quantities at characterization stage. They are related to the investigation conditions/requirements, the prediction methods and their conditions of use, the influence of the complexity of pollution and finally the intensity of controls performed during the remediation itself. The relevance of these recommendations has been ensured by the involvement of fifteen actors recognized for their expertise in the area of contaminated land management.

In detail, the project has included the following work:

- *qualitative survey amongst professionals involved in contaminated land management to collect their impression about factors explaining discrepancies between characterization and remediation stages,*
- *Collection of industrial data sets among contaminated land actors,*
- *Setup of a methodology for the analysis of these datasets,*
- *The analysis itself, leading to operational recommendations.*

The relevance of these recommendations has been ensured by the involvement of fifteen actors recognized for their expertise in the area of contaminated land management. Half of these experts have been involved at the end of the project, ensuring an independent opinion about the accomplished work.

L'UCIE auprès de leurs membres. Au total 17 personnes y ont répondu : 10 proviennent de bureaux d'études, 6 de sociétés de dépollution tandis qu'un répondant intervient notamment en tant qu'expert de justice et un autre en tant qu'autorité.

Les paragraphes suivant reprennent les questions posées tout en synthétisant les principales réponses obtenues.

Quelles sont selon vous les raisons qui peuvent conduire à des incohérences significatives entre diagnostic et dépollution ? (nombre de données de diagnostic ou de paramètres suivis, zones inaccessibles en dépollution, etc.)

Parmi les nombreuses raisons avancées, la quantité de données disponibles est citée quasiment par l'ensemble des répondants, suivie de l'importance de la qualité des données. Comme l'indique un des répondants, « Nos clients n'ont pas toujours le budget et/ou le délai nécessaire pour établir des diagnostics "approfondis" ». De nombreux problèmes d'échantillonnage et de saisie/copie d'analyses sont également cités. Certains problèmes découlent également d'une prise en compte insuffisante des besoins pour le dimensionnement des travaux de dépollution.

Finalement, l'hétérogénéité de la pollution et/ou du terrain est plusieurs fois mentionnée comme source d'incohérence, tout comme la mauvaise appréciation de l'origine ou du comportement des polluants.

Quelle est la nature de ces incohérences ? (erreurs de localisation des zones polluées, niveaux de concentration erronés, nature des polluants, etc.)

La délimitation erronée de l'emprise de la zone polluée est la principale incohérence constatée. Ici encore, plusieurs témoignages soulignent l'existence d'incohérences entre les phases diagnostic et de travaux, pouvant conduire en phase travaux à des découvertes de pollutions non diagnostiquées ou à une mauvaise appréciation de la nature des polluants. L'estimation d'une masse de polluants à traiter requiert en outre une bonne quantification des niveaux de concentration en polluants présents sur le site ; plusieurs répondants identifient comme nature d'incohérences des erreurs d'appréciation de ces niveaux. Notons que ces erreurs peuvent également découler d'un contrôle inadéquat en cours de dépollution.

Quel en est l'ordre de grandeur ? (sur/sous-estimation de x% en phase travaux)

Il ressort des questionnaires que l'on peut légitimement distinguer deux types d'écart entre estimation en phase diagnostic et réalité de la dépollution :

- Des écarts usuels, considérés comme « acceptables » par les répondants, de 10 à 30% et en moyenne 20%, car comme l'indique un répondant : « Il faut systématiquement avertir le client qu'une définition à 10% près relève de la chance plutôt que de la science... » ;
- Des écarts élevés, jugés significatifs, allant de 50 à 100% ; plusieurs répondants vont même jusqu'à mentionner des écarts allant jusqu'à 1000%, qui correspondent à des cas particuliers réellement inacceptables.

Il faut noter que plusieurs répondants soulignent la qualité d'un bon nombre de dossiers de dépollution, ainsi qu'une amélioration notable des pratiques de diagnostic ; un répondant attribue cette amélioration à une caractérisation plus complète des sites (plus grand nombre de données) et à une meilleure maîtrise des conditions d'investigation.

A quelle fréquence êtes-vous confronté à des incohérences que vous qualifieriez de "significatives" en termes d'ampleur ou de conséquences ? (1 cas sur xx ?)

La fréquence d'écarts significatifs varie de 1 cas sur 2 à 1 cas sur 10 (1 répondant mentionnant néanmoins 1 cas sur 100).

Methodology and results

Qualitative survey

The survey conducted by means of a questionnaire has been a prerequisite in order to define the general framework in which the case studies lie. It allows assessing to which extent these case studies are representative of situations frequently encountered by contaminated land management professionals. Although intrinsically subjective and qualitative, the perception of professional allows identifying the main obstacles to the consistency between characterization and remediation stages.

The electronic questionnaire has been sent to a database of about 80 contacts, mainly in France, Switzerland and Belgium. It has also been relayed by the French associations UDPS and UCIE to their members. In total 17 people responded: 10 from consulting firms, 6 from remediation companies while one particular acts as a court expert and another as an authority.

The following paragraphs summarize the main outcomes of the survey:

According to you, which reasons lead to inconsistencies between characterization and remediation estimates of contaminated quantities?

Among numerous other reasons, data quantity at characterization stage is cited by almost all participants, followed by the importance of data quality. As stated by a respondent: "Our customers do not always have the required budget or time for a detailed characterization approach". Numerous issues related to sampling or the entry/copy of analytical results are also mentioned. Other problems come from the fact that some elements, that are crucial to dimension remediation works, are sometimes insufficiently appreciated during characterization. Finally, the heterogeneity of pollution and/or geology is mentioned several times as a difficulty, as well as an inadequate appraisal or the pollutant origin/behavior.

What is the nature of these inconsistencies?

A wrong delineation of the polluted zone extension seems to be the main source of inconsistency. Here also, inconsistencies between practices at characterization and remediation stages may lead to unexpected problems during remediation or to a wrong appraisal of the pollutant behavior.

In addition, estimating pollutant masses requires a good assessment of concentration levels while the latter are sometimes poorly estimated in practice. Inappropriate controls during remediation may also lead to wrong or biased concentration estimates.

What is the order of magnitude of the differences in the estimation of contaminated quantities? (over/under estimation of x% during remediation stage)

Given the obtained answers, it seems legitimate to distinguish two situations in terms of difference between the estimation at characterization stage and the remediation reality:

- Differences ranging from 10 to 30%, in average equal to 20%, are considered as being usual and "acceptable" by the respondents. As stated by one of them: "One should systematically inform the client that an estimation with an error lower than 10% is pure luck";
- Higher differences, considered as "significant", are sometimes observed and can reach 50 to 100%; some respondents even mention errors up to 1000% that seem to correspond to really unacceptable situations.

On peut estimer qu'en moyenne des écarts significatifs (supérieurs à 25% environ) sont observés dans 25% des cas.

Quelles en sont les conséquences ? (budget, délais, litiges...)

Les conséquences d'écarts significatifs entre volumes de terres polluées prévus (ou masses de polluants) et volumes dépollués sont essentiellement de trois ordres, cités de manière relativement équilibrée par 1 sur 2 à 1 sur 3 répondants : conséquences financières, délais et litiges. Notions que la notion de « litige » est ambiguë, car pouvant aller d'un simple problème avec le donneur d'ordre au dépôt de plainte devant un tribunal. L'ampleur des conséquences va souvent de pair avec l'ampleur du projet lui-même.

Il est en outre intéressant de relever que ces conséquences sont génératrices de problèmes entre le donneur d'ordre et l'entreprise de travaux, le bureau d'étude n'étant en général plus impliqué sur le projet à ce stade bien qu'il soit à l'origine des prévisions réalisées.

Méthodologie d'analyse des cas d'étude

DONNEES DISPONIBLES

- 23 jeux de données industrielles
- 28 comparaisons possibles diagnostic-dépollution
- 83% de dépollutions par excavation
- Estimations à 46% par méthode empirique, 36% par géostatistique, 18% par interpolation déterministe
- Grande variété et complexité des situations de pollution rassemblées

L'étude porte sur l'analyse de **23 jeux de données industrielles** issus de sites diagnostiqués et dépollués, pour lesquels on dispose d'informations suffisamment précises quant aux :

- volumes de terres (ou masses de polluants) estimés en phase diagnostic et réellement dépollués,
- conditions d'estimation de ces volumes / masses : type et nombre de données en diagnostic, méthode d'estimation, contrôles en dépollution.

Les jeux de données ont été mis à disposition par des professionnels des sites et sols pollués, avec l'accord des responsables des sites, ou bien par les responsables des sites eux-mêmes, puis anonymisés. L'étude se base sur une analyse des informations rassemblées sur chacun des jeux de données industrielles et ne comporte **en aucun cas de jugement de valeur** sur la qualité du travail de diagnostic et de dépollution réalisé sur chacun des sites.

Certains jeux de données ont donné lieu à plusieurs calculs des quantités en phase de diagnostic, par différentes méthodes d'estimation (empirique, déterministe, géostatistique). D'autres ont subi plusieurs dépollutions, du fait de la présence de plusieurs types de substances et, par conséquent, conduisant à plusieurs estimations de quantités (volumes ou masses). Au final, il est possible de mener **28 comparaisons** entre estimations de diagnostic et calculs de dépollution.

Les jeux de données présentent une **grande diversité** à la fois en taille, en type d'activités et donc en types de pollutions :

- exclusivement des hydrocarbures pétroliers pour 8 cas d'étude,
- exclusivement des COHV pour 3 sites,
- exclusivement des HAP pour 2 sites, et

Several respondents underline the quality of the majority of remediation projects together with a noticeable improvement of characterization practices over the years.

At which frequency are you confronted to "significant" differences, both in terms of magnitude and consequences?

The frequency of significant differences varies between 1 in 2 and 1 in 10 cases.

In average, it can be estimated that significant differences (higher than roughly 25%) are observed in 25% of cases.

What are the consequences of such significant differences?

Significant differences between the estimation of contaminated quantities at characterization stage and the remediation reality lead to three types of consequences: financial issues, time delays and "litigation" (although the ambiguity of the latter should be noted as it can be interpreted in different ways ranging from a simple problem/difficulty with the client to the prosecution of a legal action). These different types of consequences are evenly mentioned by 1 in 2 to 1 in 3 respondents.

It is worth mentioning that in most cases these consequences lead to problems between the final client and the soil remediation company; indeed, despite being at the origin of the estimation of contaminated quantities during the characterization stage, the consultancy is usually not involved anymore at this later stage.

Analysis of industrial case studies

AVAILABLE DATA

- 23 industrial datasets
- 28 possible characterization-remediation comparisons
- 83% remediation involving soil excavation
- Prediction : 46% using an empirical method, 36% geostatistics, 18% deterministic interpolation
- Great diversity and complexity of the gathered contamination situations

The study is based on **23 industrial datasets** coming from characterized and remediated sites for which the following information was sufficiently precise:

- Soil volumes (or pollutant masses) estimated at characterization stage;
- Soil volumes (or pollutant masses) actually remediated;
- Estimation conditions: type and amount of data during characterization, estimation method, remediation controls.

Datasets have been provided by site owners or consultancies / remediation companies involved on the projects, then anonymized. The study is based on a factual analysis of the information retrieved from the data providers and do not contain **any value judgment about the quality of work** accomplished during characterization or remediation.

Some datasets have led to various estimates of contaminated quantities, using different approaches (empirical, deterministic, geostatistics). Consequently, **28 comparisons** can be made between characterization and remediation results.

- un mélange de substances organiques et inorganiques pour 9 cas (38%).

La dépollution s'est accompagnée d'une **excavation des terres pour 19 cas (83%), d'un traitement *in situ* pour 4 cas (17%)**. Ces proportions sont proches de celles estimées sur l'ensemble de l'Union Européenne. Deux sites ont donné lieu à la fois à une excavation et un traitement *in situ*. Un seul cas concerne un traitement de nappe *in situ*.

Les cas d'étude ont été comparés au moyen des critères décrits ci-après, une note étant attribuée à chacun des cas en fonction du respect de ces critères. Ces derniers ont été établis et les notes attribuées dans un souci d'objectivité et de représentativité des différents types de situations rencontrées. La codification de certaines caractéristiques se révèle néanmoins délicate : comment, par exemple, classer la complexité des situations de pollution rencontrées ? On ne peut donc exclure une part d'arbitraire dans les choix des auteurs.

- **Description des situations de pollution** : 6 critères reprenant notamment le type de substances polluantes, la taille de la zone d'intérêt concernée par la comparaison entre diagnostic et dépollution, le mode de dépollution, etc.
- **Critères d'évaluation de la complexité des situations de pollution** : nombre d'activités ayant siégé sur le site, nombre de groupes différents de substances et complexité attachée à leur caractérisation et élimination, nature et nombre des terrains atteints par la pollution.
- **Critères d'évaluation de l'ancienneté des investigations** : nombre de phases d'investigation, durée totale de l'intervention, année de fin de travaux.
- **Critères d'évaluation des conditions d'investigation en diagnostic** : nombre total et densité de sondages, nombre d'échantillons par mètre sur la verticale, répartition spatiale des données (régulière, homogène ou lacunaire), homogénéité du protocole de prélèvement, etc. La note obtenue pour la qualité globale d'échantillonnage dépend du nombre de critères satisfaits.
- **Critères d'évaluation des conditions d'estimation des volumes de terres (ou masses de polluants) en diagnostic** : nature de la méthode mise en œuvre et, dans le cas de la géostatistique, validation de la pertinence des conditions de mise en œuvre. Trois principaux types de méthodes, qui sont par ailleurs décrits sous forme de boîte à outils dans le rapport UPDS 2014 de synthèse des travaux du groupe de travail « Pollution concentrées », sont utilisés dans la pratique :
 - Des méthodes empiriques, ou encore basées sur un jugement d'expert :
L'évaluation des zones sources ou des zones à excaver repose ici exclusivement sur l'expertise de la personne en charge de la caractérisation. Par comparaison empirique des résultats analytiques obtenus avec les seuils de réhabilitation et en intégrant l'ensemble des informations indirectes disponibles (constats de terrain, type de pollution, historique du site), le professionnel réalise une délimitation manuelle des zones sources, ou des zones à excaver, qui sert ensuite de base au calcul de volumes de terres à excaver (ou de masses de polluants). En dépit d'une subjectivité inéluctable, ces approches sont couramment mises en pratique.
 - **Des méthodes d'interpolation déterministes** :
Ces méthodes sont disponibles dans de nombreux logiciels de cartographie (SIG, Surfer...) et permettent, en complément du jugement d'expert, de tracer des cartes d'isolignes (ou isosurfaces) de concentrations. Les techniques consistent à attribuer au point à estimer une moyenne pondérée des données disponibles les plus

Collected datasets exhibit a **great diversity of situations in terms of size, activity type and pollution nature**:

- Exclusively with petroleum hydrocarbons on 8 cases,
- Exclusively with Halogenated Volatile Organic Compounds on 3 cases,
- Exclusively with PAH on 2 cases, and
- A mixture of organic and inorganic compounds on 9 cases (38%).

Remediation involved **soil excavation in 19 cases (83%) and an *in situ* treatment in 4 cases (17%)**. These ratios are close to the ones observed at the European Union scale. Two sites involved both an excavation phase and an *in situ* treatment. One case deals with a groundwater *in situ* treatment.

Several comparison criteria have been developed, each site being rated according to the respect of these criteria. Objectivity and representativeness of the different types of situations as been as far as possible ensured. However, some criteria appeared to be quite difficult to assess, as for instance the complexity of the pollution situation; it is therefore difficult to ensure the absence of some arbitrary choices.

- **Description of the pollution situation**: 6 criteria corresponding to the type of pollutants, the size of the area being targeted by the remediation, the remediation mode, etc.
- **Criteria related to the complexity of the pollution situation**: number of industrial activities that occurred on the site, number of groups of chemical compounds, complexity of their characterization and treatment, type and number of geological layers hit by the pollution.
- **Criteria related to the seniority of the characterization**: number of characterization phases, total duration of the remediation project and year of finalization.
- **Criteria related to characterization conditions**: number and density of boreholes, vertical density of samples along boreholes, spatial coverage of data (regular, homogeneous, scarce), homogeneity of the sampling protocol, etc. The score obtained for the overall characterization quality depends on the number of criteria met.
- **Criteria related to the methodology applied to assess contaminated quantities**: type of the method and, in the case of a geostatistical approach, validation of the relevance of its application. Three main types of methods have been used in practice, consistently with the ones described for instance in the 2014 report of the French association UPDS dedicated to "Concentrated pollutions":
 - **Empirical method, also called expert judgment**:
The assessment of source areas or areas to be excavated is only based on the expertise of the professional in charge of the characterization. By comparing empirically analytical results obtained with remediation thresholds and taking into account auxiliary information (rapid site measurements, pollution type and site history), the expert manually delineates the area to be excavated. The latter is then used to estimate contaminated soil volumes or pollutant masses. Although subjective by nature, these approaches are frequently applied in practice.
 - **Deterministic interpolations**:
These methods are available in most mapping software (GIS systems, Surfer...) and allow computing isoconcentration maps. The basic principle consists in

proches (p.ex. plus proche voisin, inverse des distances, triangulation de Kolmogorov). Ces méthodes sont fréquemment utilisées pour leur simplicité, ne nécessitant pas forcément une formation préalable ou la manipulation de concepts probabilistes.

- **Des méthodes géostatistiques :**

Les méthodes géostatistiques reposent sur l'exploitation de la continuité spatiale de la pollution ; leur formalisme probabiliste permet de quantifier l'incertitude associée aux estimations. Parmi ces méthodes, on distingue les techniques classiques de krigeage qui permettent de cartographier une pollution, mais ne sont pas adaptées à l'estimation de zones de dépassement de seuils, et les techniques de simulations conditionnelles, qui permettent de modéliser les quantités de matériaux dont les teneurs dépassent des seuils (estimations globales) et de les localiser dans l'espace (estimations locales), avec une quantification de l'incertitude. Cette approche s'appuie systématiquement sur un jugement d'expert afin d'assurer la plausibilité des résultats obtenus. La mise en œuvre de la géostatistique est considérée comme incorrecte lorsqu'une erreur méthodologique a pu être identifiée : application de seuils à une carte obtenue par krigeage pour estimer des volumes, absence de prise en compte de l'effet de support dans l'estimation de volume de terres à excaver, estimation de volumes à partir de cartes de probabilités de dépassement de seuils, etc.

- **Critères d'évaluation des conditions de calcul des volumes (ou masses) en dépollution (fiabilité du résultat de dépollution) :** échantillonnage et analyses de contrôle en fond et parois de fouilles, à l'intérieur de la zone polluée, en dehors, présence éventuelle et ampleur d'une pollution résiduelle. Notons qu'outre ces contrôles, le mode de constitution des échantillons, les méthodes analytiques, les méthodes d'estimation sont autant de sources d'incertitudes qu'il conviendrait de prendre en compte, comme cela est réalisé pour les estimations de diagnostic. Des informations précises à ce sujet sont néanmoins rarement disponibles.

Synthèse et recommandations

Synthèse des résultats obtenus

Quelques limites inhérentes à la méthodologie développée dans le cadre du projet doivent préalablement être relevées. Tout d'abord, bien que leur nombre soit déjà conséquent, les 23 cas recensés ne permettent pas d'évaluer précisément de manière significative et irréfutable l'impact de l'ensemble des critères pouvant jouer un rôle sur la qualité des prédictions de volumes/masses, tant ces derniers sont nombreux. Ensuite, l'évaluation elle-même de ces facteurs contient une part d'arbitraire inéluctable.

Les estimations des quantités de terres ou masses de polluants ont été menées dans 13 situations sur base exclusive d'une méthode empirique (46%). Ce jugement a été complété dans 5 situations par des méthodes déterministes (18%) et dans 10 cas par une approche géostatistique (36%). La proportion de sites traités avec des méthodes géostatistiques est plus importante que celle qui pourrait être trouvée sur l'ensemble des cas traités en France (chiffres non disponibles dans la littérature consultée, information recueillie auprès des professionnels des sites et sols pollués impliqués dans l'étude), puisque l'accent a été mis sur ces méthodes dans la présente étude.

Les critères destinés à évaluer la complexité de la situation de pollution montrent que **tous les cas rassemblés sont plutôt complexes** ; notons en outre que les cas « pathologiques »

attributing to the target point to be estimated a weighted average of neighboring data, the weighting varying with the chosen algorithm (nearest neighbor, inverse distance, natural neighbor...). These methods are frequently used due to their simplicity which do not require specific trainings.

- **Geostatistical methods:**

Geostatistics is based on the use of the spatial continuity of the pollution; its probabilistic framework allows quantifying the uncertainty related the concentrations estimated at unsampled locations. Kriging-like techniques, dedicated to pollution mapping, are however not suited to the estimation of the risk to exceed remediation thresholds. Conditional simulations should be preferred instead to this end in order to quantify soil volumes exceeding a given threshold (global estimation) or to locate these volumes spatially (local estimation) while quantifying the related uncertainty. This approach is systematically combined with an expert judgment to ensure the plausibility of the results. Due to the higher complexity of the approach, some methodological mistakes are sometimes observed: application of a threshold on a kriged map in order to compute volumes, ignorance of the support effect in case of an excavation, estimation of contaminated volumes from a probability map, etc.

- **Criteria related to the conditions of estimation of contaminated quantities during remediation:** *sampling and analysis on the borders and at the bottom of excavated areas, analysis of excavated material and assessment of potential residual pollution. Apart from these controls, the way samples are collected, analyzed and used to estimate contaminated quantities is also subject to uncertainties which should be taken into account. However, precise information about these practices is usually not available.*

Recommendations

Summary of results

Some limitations to the methodology developed in the project must first be mentioned. First, although their number is already significant, the 23 case studies are not enough to allow assessing in an accurate and conclusive way the impact of some of the numerous criteria that can play a role on the quality of the estimation of contaminated quantities. The assessment itself of these criteria also contains some part of unavoidable arbitrariness.

Estimates of contaminated quantities have been obtained in 13 cases exclusively on the basis of an empirical method (46%). This judgment was completed in 5 situations by deterministic methods (18%) and in 10 cases by a geostatistical approach (36%). *The proportion of sites subject to a geostatistical approach in our study is much greater than what can be found in reality, precisely to obtain as far as possible conclusive results on this topic.*

*Criteria for assessing the complexity of the pollution situation show that **all collected cases are rather complex**; it should be noted that « pathological » cases (almost non-existent characterization) have been deliberately excluded from the study. The latter does not contain neither simple cases where the pollution is linked to a single activity that generated only one type of polluting substance, easy to characterize and in a homogeneous geological layer. The following findings and*

(reconnaissance quasi-inexistante) ont été volontairement exclus. On ne relève pas de cas simple où la pollution serait liée à une seule activité ayant généré un seul type de substances facile à diagnostiquer, dans un terrain de constitution homogène. Les constats et recommandations suivants ont donc été formulés pour un certain niveau de complexité.

ERREURS D'ESTIMATION RELATIVES

- Définition : valeur absolue de la différence entre quantités (volumes, masses) estimées au stade diagnostic et quantités calculées en fin de dépollution, normalisé par le calcul de dépollution (pris comme référence).
- Erreurs de 26% en moyenne, 1% au minimum, 84% au maximum
- 57% de sous-estimations, 43% de sur-estimations

L'erreur d'estimation relative est notre principal critère de comparaison entre volumes (ou masses) diagnostiqués et dépollués. Cette erreur correspond à la valeur absolue de l'écart entre l'estimation de diagnostic et le calcul de dépollution, normalisé par le calcul de dépollution qui est pris comme référence. Bien entendu, les calculs des volumes de terres dépolluées comme la masse de polluants extraite après traitement *in situ* restent entachés d'erreurs et d'incertitudes. Pour autant, étant évalués à partir d'informations plus nombreuses, ces volumes et masses se rapprochent vraisemblablement plus de la réalité du terrain que ceux estimés en phase diagnostic. La fiabilité de l'estimation faite en dépollution est néanmoins appréciée et prise en compte dans notre analyse des écarts.

L'erreur d'estimation relative est égale, en moyenne, à 26%, sur les 28 situations de comparaison possibles. L'erreur varie entre 1% et 84%. Un cas particulier présente une erreur extrême, égale à 436%, dont il n'a pas été tenu compte dans les statistiques. L'origine de cet écart extrême est clairement liée à un manque de données pour estimer la masse de polluants à traiter *in situ*.

Par rapport au questionnaire, nous constatons que les cas se répartissent relativement bien entre d'une part des cas pour lesquels des erreurs usuelles/acceptables sont observés et, d'autre part, un certain nombre de cas présentant des niveaux d'écarts jugés significatifs ; à titre d'exemple, plus du tiers des situations a fait l'objet d'écarts supérieurs à 30%. Ce pourcentage de cas est légèrement plus élevé que ce qui ressort du questionnaire, mais reste néanmoins proche et cohérent.

L'impact des différents critères de comparaison sur l'erreur relative de prédiction a été évalué par une analyse statistique des données. Les calculs ont été réalisés sur l'ensemble des cas, ou bien en écartant les cas de dépollution *in situ*, ou bien en écartant les cas où la fiabilité du calcul de dépollution est jugée médiocre. Les résultats obtenus sont les suivants :

- Ordre de grandeur des écarts entre diagnostic et dépollution
A l'issue du questionnaire, on pouvait avancer que **des écarts significatifs entre diagnostic et dépollution, supérieurs à 25%, sont observés dans approximativement 25% des cas.** Cela montre qu'une majorité de chantiers se passe bien, sans que de mauvaises surprises puissent prêter à des conséquences lourdes, que ce soit en termes de délais, de budgets ou allant jusqu'à des litiges. Par rapport à cette proportion d'écarts significatifs formulée par les acteurs des

recommendations are therefore valid for sites that exhibit a certain level of complexity.

RELATIVE ESTIMATION ERRORS

- Definition: absolute value of the difference between the quantity (volume, mass) estimated at the characterization stage and the remediation calculation, normalized by the remediation calculation (taken as reference).
- Errors of 26% in average, ranging from 1% to 84%
- 57% of under-estimations, 43% of over-estimations

The relative estimation error is our main criterion for comparison between volumes (or masses) characterized and remediated. This error corresponds to the absolute value of the difference between the estimate during characterization and the remediation calculation, normalized by the remediation calculation which is taken as reference. Of course, contaminated quantities estimated during the remediation, especially with *in situ* treatment cases, are affected by errors and uncertainties. However, being derived from an increase knowledge of the situation and a larger amount of data, these volumes and masses are likely to be closer to the reality than those estimated during characterization. The reliability of the contaminated quantity estimate computed during remediation is nevertheless appreciated and taken into account in our analysis.

The average relative estimation error is equal to 26%, on the 28 possible comparisons. The error varies between 1% and 84%. A special case presents an extreme error, equal to 436%, which is clearly linked to a lack of data to estimate the mass of pollutants to be treated *in situ*; therefore this case has not been included in the statistics.

Compared to the questionnaire, it has been found that the case studies are distributed fairly well between cases:

- where conventional / acceptable errors are observed,
- with significant differences in estimated contaminated quantities; for instance, more than one third of situations exhibit differences greater than 30%, a value which is slightly higher although consistent with the qualitative survey.

The impact of the different comparison criteria on the prediction relative error has been statistically analyzed. The calculations were carried out in different ways: on all cases, on cases with excavation only, then finally excluding cases for which the contaminated quantities estimated during remediation are not reliable. The results are summarized hereafter.

- Order of magnitude of the differences between characterization and remediation

Using the qualitative survey results, it has been estimated that **differences larger than 25% were observed in approximately 25% of cases.** This highlights the fact that most remediation projects are performed without significant problems or surprises that might lead to financial consequences or time delays. Compared to the qualitative survey, the 23 case studies exhibit situations that are slightly less favorable, differences larger than 30% being observed on one third of cases. This is not surprising, several case studies being precisely chosen because of the problems they generated.

sites et sols pollués via le questionnaire, les 23 cas recensés correspondent à des situations légèrement plus défavorables, 1/3 des cas conduisant à plus de 30% d'écart. Ceci n'est pas étonnant, plusieurs cas ayant été mis à disposition de l'étude justement en raison de problèmes qu'ils avaient pu soulever.

L'estimation de diagnostic a sous-estimé la quantité à extraire en dépollution dans 16 situations (57%), surestimé dans les 12 autres (43%). Cela signifie que les erreurs de prédiction se traduisent davantage en phase de dépollution par une aggravation de la situation, une augmentation des volumes impactés ou la découverte de pollutions imprévues.

- Comparabilité des volumes de terres (ou masses de polluants) entre diagnostic et dépollution

Il est rapidement apparu que la comparaison entre la prédiction de volumes en phase diagnostic et les volumes finalement dépollués constitue déjà en soi un exercice délicat. En effet, toute estimation est entachée d'incertitudes et d'erreurs, même en phase de dépollution; **le calcul réalisé en phase dépollution ne peut donc être considéré comme la référence absolue.** En outre, de nombreux facteurs viennent entacher la fiabilité d'une telle comparaison : différence de périmètre entre diagnostic et travaux, changement d'objectifs ou prise en compte de nouveaux polluants, mise en évidence de pollution résiduelle lors de la dépollution ou, au contraire, volonté explicite de ne pas dépolluer l'ensemble du site, notamment au droit d'infrastructures dans le cas de sites en activité, variabilité dans la nature et l'exhaustivité des contrôles réalisés en cours de dépollution, etc. Cette comparaison s'avère encore plus délicate dans le cas de traitements *in situ* ; en effet, dans ces situations, les masses de polluants ne peuvent être estimées que de manière indirecte, par suivi de l'évolution dans le temps des concentrations dans l'air ou l'eau extraits par exemple (bilan de masse).

Cette situation nous a conduit à définir un **critère de fiabilité des résultats de dépollution, en fonction de l'intensité des contrôles effectués en cours et en phase de réception des travaux**, et à mener les comparaisons avec la totalité des cas, ou bien les seuls cas dont les résultats de dépollution sont jugés fiables. Une attention particulière a également été portée à la définition de la zone d'intérêt de chacun des cas.

- Facteurs favorables/défavorables pour la prédiction

La complexité de la situation de pollution joue un rôle primordial sur la qualité des prédictions menées en phase diagnostic. En effet, les erreurs d'estimation apparaissent en moyenne plus fortes (32%) dans des situations très complexes liées au nombre de polluants et à la lithologie, que dans des situations relativement peu complexes (erreurs en moyenne égales à 21%). A ce titre, il est notable que **les cas ayant donné lieu aux écarts les plus significatifs correspondent tous à des pollutions par des hydrocarbures lourds et des HAP sous forme de bitumes, par nature délicats à caractériser.** Parmi les 4 critères qui ont été initialement identifiés comme facteurs de complexité, il est de plus intéressant de constater que ce ne sont pas le nombre d'activités ayant conduit à la pollution ni la nature des substances polluantes (hormis le cas précité des hydrocarbures lourds) qui constituent des critères déterminants ayant une influence significative sur les erreurs d'estimation, mais **la diversité des pollutions et la complexité de la lithologie** (nombre et hétérogénéité des terrains).

Outre cette complexité qui ne peut qu'être anticipée ou à défaut constatée, **il a été montré que l'échantillonnage est le premier facteur permettant de limiter le risque d'erreur de prédiction de volumes de terres ou de masses de polluants.** De fait, l'erreur moyenne observée est de 18% sur les 11 cas présentant des conditions d'investigation favorables,

Characterization leads to under-estimate contaminated quantities in 16 cases (57%) and over-estimate in the 12 other cases (43%). This means that differences tend to lead to slightly higher estimates of contaminated quantities during remediation.

- Comparability of contaminated quantities between characterization and remediation

It appeared quickly that the comparison between the estimation of contaminated quantities at characterization and remediation is in itself challenging. Indeed, every estimate is affected by uncertainties and errors, even during remediation. **Therefore, estimated contaminated quantities at remediation stage cannot be considered as an absolute reference or the reality.**

Furthermore, numerous factors complicate the comparison: differences in the delineation of the target area between characterization and remediation stages, changes in the remediation objectives, integration or new pollutants, discovery of residual pollution or decision to willingly leave in place a residual pollution when it occurs beneath existing buildings, lack of completeness in remediation controls, etc. The comparison is even harder in the case of *in situ* treatment; indeed, in such cases the pollutant mass can only be estimated in an indirect way through the monitoring of concentrations in extracted air/water for instance (mass balance).

This led us to define a **reliability criterion of the estimated contaminated quantities during remediation.** This reliability criterion depends on the intensity of controls performed during remediation. Comparisons with characterization results were therefore performed both on all cases and on "reliable" cases only. Also, particular attention has been paid on each case to the definition of the area of interest.

- Factors influencing the quality of the prediction of contaminated quantities

The complexity of the pollution situation plays a key role on the quality of predictions conducted at characterization stage. Indeed, the estimation errors appear on average higher (32%) in highly complex situations (due to the number of pollutants and/or the heterogeneity of the geology) than in slightly less complex situations (average difference equal to 21%). As such, **it is notable that the cases which gave rise to the most significant differences all correspond to pollutions by heavy hydrocarbons and PAHs in bitumen form, by nature difficult to characterize.** Even more, among the 4 criteria that were initially identified as complicating factors, it is interesting to notice that the number of activities that led to the pollution and the nature of pollutants (except the aforementioned case of heavy hydrocarbons) are less influencing the estimation differences, than **the diversity of contaminations and complexity of lithology** (number and heterogeneity of the soils).

Besides this complexity, that can only be anticipated or noted, it has been shown **that sampling is the first factor that allows improving the consistency when estimating contaminated quantities.** Actually, the average difference observed is 18% for the 11 cases with favorable investigation conditions, compared to an average difference of 32% for the 16 other cases.

Regarding the estimation methods, very good predictions have been observed on some case studies regardless of the estimation approach: empirical approach (or expert judgment) alone, deterministic approach or geostatistical estimation. However, **predictions based only on expert**

à comparer aux 32% d'erreur moyenne obtenus sur les 16 autres cas.

S'agissant des méthodes d'estimation, de très bonnes prédictions ont été identifiées quelle que soit la méthode d'estimation mise en œuvre : méthode empirique (ou par jugement d'expert) seule, approche déterministe ou estimation géostatistique. Pour autant, **les prédictions basées sur les jugements d'expert donnent lieu à la plus grande dispersion des écarts entre diagnostic et dépollution. A contrario, l'estimation géostatistique semble conduire aux écarts à la fois les plus faibles et les moins dispersés, surtout lorsqu'elle est menée dans les règles de l'art** en respectant quelques recommandations méthodologiques objectives.

Finalement, trois cas ont donné lieu à la mise en œuvre de plusieurs méthodes d'estimation. Les erreurs d'estimation calculées pour ces différentes méthodes confirment que, **pour un même niveau de complexité de la pollution et une même qualité d'investigation (plutôt bonne sur ces cas), les méthodes géostatistiques constituent la meilleure alternative**, parmi les méthodes d'estimation à disposition. L'efficacité de la méthode est particulièrement élevée lorsqu'elle est appliquée dans les règles de l'art et avec des jeux de données adaptés. Notons que l'on peut également argumenter que le jugement d'expert peut également fournir d'excellents résultats lorsqu'il est bien réalisé, ce qui est indubitable. Cependant, ces critères de jugement restent parfois difficilement quantifiables. Aussi, un des avantages, néanmoins dans le cas présent, est que les critères permettant d'assurer le respect des règles de l'art lors d'une approche géostatistique sont objectifs et clairement identifiés.

ESTIMATION DES QUANTITES AU STADE DIAGNOSTIC

FACTEURS FAVORABLES

- Conditions d'investigation : erreur d'estimation de 18% en moyenne en conditions favorables, 32% sinon
- Erreurs plus faibles et moins dispersées avec des méthodes géostatistiques appliquées dans les règles de l'art

FACTEURS DEFAVORABLES

- Complexité liée à la diversité de la pollution et à la lithologie (nombre et hétérogénéité des terrains)
- Ecarts les plus significatifs avec les pollutions aux hydrocarbures lourds et HAP sous forme de bitumes
- Incertitude affectant les résultats de dépollution

Recommandations

L'analyse des cas rassemblés a permis de tirer un certain nombre d'enseignements et de dégager des **recommandations opérationnelles pour améliorer la cohérence entre les estimations en phase diagnostic et la dépollution**. Les facteurs ayant une influence sur la qualité des estimations sont hiérarchisés ci-dessous par ordre d'importance décroissante afin d'identifier les points sur lesquels l'effort doit porter en priorité pour améliorer la qualité des décisions prises à l'issue des diagnostics.

- Ces recommandations sont à considérer en gardant à l'esprit :
- d'une part qu'il est toujours possible d'avoir de la chance en réalisant une bonne prédiction en dépit de conditions défavorables et de pratiques critiquables (situation complexe ou caractérisation insuffisante) ;
 - d'autre part, que malgré des pratiques exemplaires, le risque d'une « erreur radicale » n'est jamais exclus et inhérent à tout exercice de prédiction ou d'estimation.

judgment lead to a greater dispersion of differences between characterization and remediation. Conversely, geostatistical estimation seems to lead to both lower and less dispersed differences, especially when the approach is conducted in the state of the art, honoring a few known and objective methodological recommendations.

Finally, three cases led to the implementation of several estimation methods. The estimation errors computed for these methods confirm that, **for the same level of complexity of the pollution and the same sampling quality (rather good on these cases), the geostatistical approach provides the best results.** The effectiveness of the method is particularly marked when it is correctly applied and with suitable datasets. It is legitimate to argue that the expert judgment can also provide excellent results when properly done. However, criteria ensuring the quality of the expert judgment are much more difficult to quantify. Finally, one of the benefits, at least in this case, is that the criteria ensuring the compliance of a geostatistical approach with the state of the art are objective and known

ESTIMATION AT THE CHARACTERIZATION STAGE

FAVORABLE FACTORS

- Characterization conditions : estimation error of 18% in average in favourable conditions, 32% if not
- Smallest and less dispersed errors when applying geostatistical methods in the rules of art

UNFAVORABLE FACTORS

- Complexity due to the diversity of contamination and lithology (number and heterogeneity of soils)
- More significant differences with heavy hydrocarbons and PAHs in the form of bitumen
- Uncertainty in the remediation results

Recommendations

The analysis of the collected case studies helped in drawing a number of lessons and clear **operational recommendations in order to improve the consistency between contaminated quantity estimates at characterization and remediation stages.** Factors influencing the quality of the estimates are ranked below in decreasing order of importance, in order to identify the points where the effort should be put in priority to improve the quality of the decisions taken at the end of the characterization.

A few points should be kept in mind while considering these recommendations:

- On one hand, it is possible to be really lucky and obtain a good prediction of contaminated quantities even in unfavorable situations or with inappropriate sampling practices;
- On the other hand, despite excellent practices, the risk of making a "radical error" during the estimation of contaminated quantities can never be fully excluded, being inherent to every prediction exercise.

Complexity of the pollution situation

The study shows that the level of complexity of the pollution situation has a significant influence on differences that can be expected between prediction at characterization stage and the remediation result. **Significant estimation**

Complexité de la situation de pollution

L'étude montre que le niveau de complexité de la situation de pollution a une influence déterminante sur les écarts qui peuvent être attendus entre prédiction en phase diagnostic et résultat de dépollution. **Des erreurs d'estimation significatives sont inévitables dans les contextes de pollution les plus complexes. Le risque d'observer de telles erreurs peut être limité sous certaines conditions d'investigation, mais il ne peut pas être réduit de la même façon que dans des contextes de pollution plus simples.** Etant entendu qu'il n'est pas possible d'influer sur cette complexité, il est crucial de se prémunir contre un risque élevé d'erreur par un **effort d'investigation** raisonnable en phase de diagnostic et des **moyens de contrôle accrus** lors des travaux de dépollution.

Les situations sont particulièrement complexes, et donc difficiles à estimer, lorsque plusieurs types de substances et/ou des terrains hétérogènes doivent être dépollués. La nature des substances à traiter et le nombre d'activités à l'origine de la contamination apparaissent comme des facteurs moins déterminants. Néanmoins, les situations les plus difficiles à estimer révélées par l'étude sont les cas de pollution aux hydrocarbures lourds (HAP), présents sous forme de « boulettes » dans le sol (pollutions « pépitiqes »).

Conditions d'investigation en diagnostic

Plusieurs guides méthodologiques et normes recensent déjà un certain nombre de bonnes pratiques liées aux investigations et ce travail n'a pas vocation à s'y substituer. Pour autant, l'étude permet de dégager des **conditions d'investigation favorisant la réduction des erreurs d'estimation** en diagnostic en vue du dimensionnement de la zone à dépolluer au sein des zones à risque (pas forcément sur l'ensemble du site) :

- Le protocole d'investigation est homogène,
- Les sondages sont répartis selon un maillage ou de manière homogène,
- La densité de sondages doit idéalement être d'au moins 1 sondage pour 100 m² de terrain,
- Les échantillons sont prélevés systématiquement sur la verticale, en évitant de mélanger différentes longueurs pour les prélèvements,

Le nombre d'échantillons prélevés verticalement par sondage est au minimum de 1 par mètre.

RECOMMANDATIONS : INVESTIGATIONS DE DIAGNOSTIC

- Protocole d'investigation homogène
- Sondages répartis selon un maillage ou recouvrant de manière homogène la zone d'intérêt
- Au moins 1 sondage pour 100 m² de terrain
- Prélèvement systématique d'échantillons sur la verticale
- Au moins 1 échantillon par mètre sur la verticale

Méthode d'estimation en diagnostic

La qualité des investigations qui auront pu être menées en phase de diagnostic a une influence prioritaire sur le résultat d'estimation : celui-ci sera de faible qualité quelle que soit la méthode d'estimation choisie si les conditions d'investigation le sont aussi, en particulier lorsque la situation de pollution est complexe.

L'étude révèle néanmoins l'avantage de certaines pratiques d'estimation. **Si les approches empiriques** (par jugement d'expert) **donnent dans certains cas de très bons résultats, on note une dispersion très forte des écarts relevés pour ces méthodes ; il est en outre illusoire de vouloir identifier**

differences are inevitable in highly complex pollution contexts. The risk of observing such differences can be compensated with relevant investigation conditions, but it cannot be reduced in the same manner as in simpler pollution contexts. Having in mind that it is obviously not possible to influence this complexity, it is crucial to limit a high risk of error with an **adequate characterization effort and increased controls during remediation.**

The situations are particularly complex and therefore difficult to estimate when several types of chemical compounds and / or heterogeneous geology have to be remediated. The nature of substances to be remediated and the number of historical industrial activities appear to be less critical factors. However, the most difficult situations revealed by the study are heterogeneous pollutions by heavy hydrocarbons (PAHs), which are contained in the soil in the form of pellets.

Characterization conditions

Several methodological guides and standards inventory a certain number of good practices related to site characterization, and the present work does not aim to replace them. However, the study allows defining characterization conditions favouring the reduction of the estimation errors at the investigation stage, in order to dimension the area that requires remediation (not necessarily the whole site):

- *The sampling procedure is homogeneous,*
- *The boreholes are distributed homogeneously in the investigation area,*
- *There is at least one borehole per 100 m² of land,*
- *Samples are collected systematically along the borehole, There is at least one sample per meter in each borehole.*

RECOMMENDATIONS: CHARACTERIZATION CONDITIONS

- *Homogeneity of the sampling procedure*
- *Homogeneous spatial distribution of the boreholes in the investigation area*
- *At least one borehole per 100 m²*
- *Systematic sampling along the borehole*
- *At least one sample per meter in each borehole*

Estimation methods for contaminated quantities

The quality of the investigations conducted during characterization has a key influence on the estimation result: the latter will be of poor quality regardless the chosen estimation method if investigation conditions are weak or insufficient, especially when the pollution situation is complex.

*Nevertheless, the study reveals the advantage of some estimation approaches. **Empirical approaches (expert judgment) provide very good results in some cases. However, a strong dispersion has been observed on the differences obtained with these methods. Identifying the success factors of such expert judgment approach, which is intrinsically subjective, is also tricky.***

The implementation of a geostatistical approach, complemented by an expert judgment, contributes to improve the consistency between the contaminated quantities estimated at characterization and remediation stages; this is even more the case when such approach is implemented in the state of the art.

les facteurs de réussite d'un tel jugement d'expert, par nature subjectif.

La mise en œuvre d'une approche géostatistique, en complément du jugement d'expert, contribue à une amélioration de la cohérence entre diagnostic et dépollution sous réserve qu'elle soit appliquée dans les règles de l'art.

Les facteurs de succès d'une estimation géostatistique identifiés par l'étude sont :

- Le choix d'une méthode adaptée au problème posé. Le krigeage, classique pour la cartographie des concentrations, n'est pas adapté au problème de l'estimation de volumes de terres dépassant des seuils. La génération de simulations conditionnelles et leur post-traitement doit lui être préféré.
- La modélisation du changement de support survenant entre la phase de diagnostic et la phase de dépollution, notamment en cas d'excavation. L'estimation des volumes à extraire doit prendre en compte la taille des mailles d'excavation, bien que les échantillons de diagnostic soient de plus petite taille.

Les méthodes déterministes associées au jugement d'expert apparaissent ici moins favorables qu'un jugement d'expert seul ou associé à un traitement géostatistique. Les cas recensés sont cependant trop peu nombreux pour généraliser ce constat à l'ensemble des sites pollués.

Le tableau ci-dessous affine la pertinence des différentes méthodes d'estimation envisageables en fonction de la complexité de la situation de pollution et des conditions d'investigation. S'agissant de la complexité, rappelons que les 23 situations de pollutions étudiées sont dans leur grande majorité complexes à très complexes. Pour les situations simples et des conditions d'investigations favorables, l'approche empirique par jugement d'expert sera vraisemblablement adaptée et pourra éventuellement être enrichie par une approche géostatistique si les données sont en nombre suffisant. Lorsque les conditions d'investigation de tels cas simples sont défavorables, toute approche quantitative (déterministe ou géostatistique) ne pourra être envisagée qu'avec prudence et le jugement d'expert permettra de pallier partiellement les médiocres conditions d'investigation.

Key factors for a successful geostatistical approach are the following:

- The choice of a suited approach. Indeed, kriging-like techniques, although classically applied for concentration mapping, are not suited for the computation of soil volumes exceeding remediation thresholds. Conditional simulations should definitely be preferred to this end.
- If an excavation of contaminated soil is planned, the change of support that occurs between point boreholes (characterization) and excavation blocks (remediation) should be taken into account.

Deterministic methods associated to an expert judgment provide prediction results that are poorer than the expert judgment alone or a geostatistical approach. The number of cases available is however too limited to generalize this finding.

The table below details the relevance of the different estimation methods depending on the complexity of the situation and the investigation conditions. It has to be kept in mind that the 23 cases correspond to average to highly complex situations. For the less complex situations and in the case of favorable investigation conditions, an empirical approach (or expert judgment) is generally adapted; this approach might be complemented with geostatistics in presence of enough data. In the case of unfavorable investigation conditions for such cases that are not too complex, quantitative approaches (deterministic or geostatistical) should be considered with great care and an expert judgment may partially compensate the poor investigation conditions.

Finally, if the complexity of the pollution situation is expected to be high, great effort should be developed to ensure that favorable investigation conditions are deployed in order to really avoid an almost inevitable risk of significant error in the estimation of the contaminated quantities.

RECOMMANDATIONS : METHODE D'ESTIMATION EN DIAGNOSTIC

Tableau : Pertinence des méthodes d'estimation en fonction de la complexité de la situation et des conditions d'investigation ; vert : adaptée, jaune : moyennement adaptée, rouge : à proscrire.

		Complexité de la situation de pollution	
		Moyenne	Forte
Conditions d'investigation	Favorables	Empirique	Empirique
		+Déterministe	+Déterministe
		+Géostatistique	+Géostatistique
	Défavorables	Empirique	Situation à éviter absolument Risque important d'écart très significatif entre diagnostic et dépollution, et ce quelle que soit la méthode d'estimation mise en œuvre.
		+Déterministe	
		+Géostatistique	

RECOMMENDATIONS: ESTIMATION METHOD AT THE CHARACTERIZATION STAGE

Table: Influence of the complexity of the pollution situation and of the estimation conditions on the relevance of estimation methods; green: well adapted, yellow, moderately advised, red: to be avoided.

		Complexity of the pollution situation	
		Average	High
Investigation conditions	Favorable	Empirical	Empirical
		+Deterministic	+Deterministic
		+Geostatistics	+ Geostatistics
	Unfavorable	Empirical	Situation to be absolutely avoided Important risk of really significant discrepancy between characterization and remediation results, whatever the estimation method.
		+Deterministic	
		+Geostatistics	

Valorisation des informations indirectes

L'étude révèle que des données renseignant de manière indirecte sur le niveau de pollution des sols, telles que les valeurs mesurées au PID ou au XRF, les diagraphies MIP, ou bien encore les observations organoleptiques, ne sont généralement pas utilisées explicitement pour estimer les quantités de terres ou masses de substances à dépolluer. Leur utilisation est souvent limitée au choix des échantillons sur le terrain, voire dans certains cas dans une approche empirique par jugement d'expert et de façon implicite. **Ces informations indirectes constituent pourtant une source de données complémentaires permettant de réduire les erreurs d'estimation**, sous réserve de corrélation entre ces informations et les concentrations en substances constituant la variable d'intérêt.

RECOMMANDATIONS : INFORMATIONS INDIRECTES

- Etudier la corrélation entre teneurs en polluants et informations indirectes
- Intégrer les données indirectes dans l'estimation de diagnostic en cas de « bonne » corrélation

Comparabilité des volumes de terres entre diagnostic et dépollution

L'étude conduit à un résultat inattendu relatif aux **calculs des quantités effectivement dépolluées au terme d'un chantier de dépollution par excavation**, qui constituent la référence à laquelle est comparée l'estimation de diagnostic. **Le niveau de fiabilité de ces calculs est variable selon la nature et l'intensité des contrôles effectués en cours de dépollution**. Précisons que dans l'ensemble des cas la zone de traitement est bien dépolluée jusqu'aux objectifs définis par le CCTP du donneur d'ordre ; il peut néanmoins subsister une incertitude sur l'estimation de quantité exacte de terres traitées, i.e. le bilan massique. C'est à l'estimation de ce dernier que nous nous intéressons ici.

Des contrôles systématiques sont réalisés en bordure et au fond des fouilles de la zone en cours de réhabilitation ; ces contrôles permettent notamment de connaître la quantité et la qualité des polluants résiduels s'il y en a. Les volumes de sols pollués résiduels éventuellement présents en bordure de la zone de traitement sont estimés sur certains sites à partir de

Use of indirect information

Nowadays, data informing indirectly on the pollution level, (PID, XRF, MIP logs or even organoleptic observations) are more and more frequently collected during site characterization. The study reveals that these data are generally not explicitly used to estimate contaminated quantities.

Their use is often limited to the selection of samples in the field or in some cases is implicitly used during an empirical approach (expert judgment). However, **such indirect information would help in contributing to the reduction of the estimation errors** provided that they are correlated to the target pollutant concentrations.

RECOMMENDATIONS: INDIRECT INFORMATION

- Study the correlation between pollutant levels and indirect information
- Integrate the indirect data in estimation of contaminated quantities in case of a "good" correlation

Comparability of contaminated quantities between characterization and remediation

The project led to an expected result related to the estimation of contaminated quantities at the remediation stage. The latter are considered to be the reference to which the estimation made during the characterization is compared to. However, the reliability of this reference depends on the intensity of controls performed during remediation.

Note that in all cases the treatment area is cleared up to the objectives defined in the Special Technical Specifications of the client; however, an uncertainty about the exact amount of treated soil can still exist (mass balance). Factors explaining this uncertainty are addressed here.

Systematic controls are carried out on the edge and bottom of the excavated area; these controls allow evaluating the presence and quantity of residual pollution if any. Volumes of residual contaminated soil that may be present nearby the treatment area are sometimes characterized with additional sampling points. However, the monitoring of the

compléments d'investigation. Par contre, le suivi de la qualité des terres évacuées au cours du chantier n'est pas systématique.

Pour les besoins de l'étude, l'estimation fournie pour les volumes de terres (ou masses de polluants) dépollués a été jugé fiable si au moins 3 des critères suivants sont vérifiés :

- Contrôles en bordure et fond de fouille,
- Contrôles de la qualité des terres évacuées,
- Contrôles à la périphérie de la zone de traitement,
- Absence de pollution résiduelle ou quantification de cette dernière si elle a été détectée.

Les statistiques des erreurs d'estimation se sont révélées de fait significativement différentes, selon que toutes les données étaient considérées, ou uniquement celles relatives aux résultats de dépollution estimés de manière fiable. Cela montre qu'il serait probablement utile de **mettre en place de bonnes pratiques de contrôle** de la dépollution, afin d'augmenter la fiabilité de l'estimation des quantités de terres évacuées/traitées, conformément aux objectifs de dépollution définis.

S'agissant des chantiers in situ, le contrôle de l'efficacité de ces traitements est effectué différemment, souvent par la combinaison d'un bilan de masse et d'investigations complémentaires des sols en place après traitement. Se posent dans ce cas, non seulement la question de la fiabilité de l'estimation des quantités de terres dépolluées, mais aussi celle de la méthodologie à adopter pour comparer les résultats de bilans de masse en dépollution avec les estimations de diagnostic menées à partir de quantités de substances dans les sols en place.

RECOMMANDATIONS : CONTRÔLES EN DEPOLLUTION

- Contrôles en bordure et fond de fouille
- Contrôles de la qualité des terres excavées
- Contrôles à la périphérie de la zone de traitement
- Absence de pollution résiduelle ou quantification de cette dernière si elle a été détectée

Retour sur les cas d'étude

Une fois établies ces recommandations générales à partir de l'analyse statistique des informations rassemblées sur les cas d'étude, un retour sur les fiches détaillées de présentation des cas a été mené pour évaluer dans quelle mesure ces critères avaient été appliqués et quelle en a été la répercussion sur l'écart entre estimation de diagnostic et résultat de dépollution.

Cet exercice a permis de valider la pertinence des facteurs de succès identifiés par l'analyse statistique des cas, et de fournir un avis d'expert sur chacune des fiches sur « ce qui aurait dû » être fait pour améliorer, le cas échéant, la prédiction.

Quelques cas d'étude particulièrement illustratifs ont en outre été mis en lumière pour illustrer et moduler les recommandations formulées ci-dessus.

quality of soils evacuated during the remediation works is not systematic.

For the purpose of the study, the estimate provided for the remediated volumes of soils was considered reliable if at least 3 of the following criteria are met:

- *Controls on the borders and bottom of the excavation,*
- *Controls of the quality of the evacuated soils,*
- *Controls nearby the treatment area,*
- *Absence of residual pollution or quantification of the latter if it has been detected.*

Statistics related to the estimation errors were actually found significantly different when considering all data or only those related to the cases for which the pollution control results could be considered reliable. This shows that it would probably be useful to establish best practices for controlling the pollution during remediation, in order to increase the reliability of the estimated amounts of evacuated / treated soils.

As for in situ projects, the effectiveness of the treatment is monitored differently, often through a combination of mass balance and further investigations of remaining soils after remediation. In this case, we are faced not only to the question of the reliability of the estimate of the quantity of remediated soil, but also to the choice of the methodology for comparing the results of such mass balance with the estimates derived at characterization stage.

RECOMMENDATIONS: REMEDIATION CONTROLS

- *Sampling and analysis on the border and at the bottom of the excavation area*
- *Sampling and analysis of the excavated material*
- *Sampling and analysis nearby the area addressed by the remediation*
- *Assessment of potential residual pollution*

Validation on the industrial case studies

Once these general recommendations established on the basis of the statistical analysis of the case studies, a posterior analysis has been conducted on their detailed listings; this allowed assessing how these criteria were applied and what has been the impact on the gap between characterization and estimation results.

This exercise helped in validating the relevance of the success factors identified with the statistical analysis and provided an expert opinion on each case study about "what should have been done" to improve the prediction quality.

Some cases of particular interest were also highlighted to illustrate and nuance the above recommendations.