



**ETUDE N° 04-0510/1A**

**SYNTHESE DE L'ETUDE**

**FRANÇAIS / ANGLAIS**

**STRATEGIE ET TECHNIQUE D'ECHANTILLONNAGE  
DES SOLS POUR L'EVALUATION DES POLLUTIONS**

**mai 2006**

**L. BELKESSAM, B. LEMIERE – CNRSSP**

# Stratégie et technique d'échantillonnage des sols pour l'évaluation des pollutions

## Résumé

La présente étude a pour objet de faire le point sur les différentes stratégies et techniques applicables à l'échantillonnage des sols sur un site industriel, actif ou abandonné, pour différents objectifs mentionnés ci-après. Cette étude vise à fournir les éléments de l'application préférentielle d'une stratégie ou d'une technique d'échantillonnage plutôt qu'une autre face à une situation donnée, ou pour un objectif d'étude donné. Ce choix conditionnera largement deux aspects essentiels :

- les résultats de l'étude permettront-ils de répondre de manière appropriée à la question posée ?
- pour ce faire, a-t-on choisi l'approche la moins coûteuse ?

Elle se distingue d'autres documents ou recueils de bonnes pratiques en ce qu'elle est d'abord destinée à répondre aux interrogations des opérateurs industriels et des détenteurs de sites potentiellement pollués, afin de leur permettre de répondre dans les meilleures conditions possibles aux différentes obligations relatives à ces sites.

Les principales questions qui se posent à l'exploitant sont :

- la détection d'une pollution, ou la vérification de l'absence de pollution sur un site,
- la caractérisation d'une pollution connue ou détectée,
- l'évaluation des risques ou des enjeux de la pollution (audit environnemental, transfert de propriété),
- la détermination de l'emprise totale de la pollution,
- les questions relatives aux travaux de réhabilitation ou dépollution.

Elles s'appliquent à l'investigation d'une source ou d'un impact de pollution aussi bien qu'à l'évaluation de l'exposition d'un milieu cible/impacté. Ces questions se posent que ce soit sur le site : source et impacts, ou autour du site : évaluation de l'exposition d'un milieu cible/impacté.

Les situations, l'environnement naturel du site et son histoire industrielle sont source de variabilité. Face à cette variabilité, la stratégie et la technique d'échantillonnage diffèrent dans de telles proportions qu'aucune bonne pratique standard n'émerge.

Ce travail tente d'explicitier les différentes options, d'en déduire des stratégies adaptées aux situations les plus classiques, et de fournir les éléments pour les optimiser en fonction de la variabilité liée:

- au milieu,
- aux contaminants,
- au prélèvement,
- aux **usages actuels ou prévus du site,**
- au mode de contamination,
- aux voies d'exposition,
- à l'analyse.

Les stratégies proposées sont adaptées aux situations les plus courantes de pollution métallique ou par composés organiques non volatils, et sont complétées par des indications sur l'adaptation des techniques d'échantillonnage aux composés organiques volatils. Elles ne prennent pas en compte les explosifs ou composés radioactifs.

L'ensemble des cas susceptibles d'être rencontrés sont présentés sous forme d'un tableau à deux entrées selon :

- l'objectif de la campagne,
- la typologie de la pollution et le contexte du site.

Ces 2 entrées définissent un certain nombre de "situations d'échantillonnage", auxquelles on attribue une stratégie d'échantillonnage préférentielle.

Cette notion de "stratégie préférentielle" résulte de l'absence de toute méthodologie directive dans les normes et la réglementation. Les méthodes préconisées en France sont basées sur l'expérience, le bon sens et les différentes bonnes pratiques acceptées. Toute stratégie est acceptable pour autant que l'on fournisse la démonstration qu'elle est appropriée dans le cas concerné. Dans ce contexte, une stratégie préférentielle sera la méthode la plus économique permettant d'atteindre pleinement les objectifs assignés à l'étude.

Les principales stratégies décrites dans le document (**fascicule I**) sont :

- les stratégies de détection d'une pollution : identification, sur un site industriel ou sur un terrain ouvert, d'une pollution ponctuelle, à partir de source non observable ; identification d'une pollution ponctuelle, à partir d'une source diffuse, non directement observable ; évaluation de l'exposition d'un milieu cible/impacté (sur un site non industriel) sans pollution identifiée au voisinage du milieu ; localisation d'une pollution en vue de l'évaluation de l'exposition d'un milieu cible/impacté (sur un site non industriel) avec ou sans pollution identifiée au voisinage du milieu ;
- les stratégies de caractérisation d'une pollution : pollution ponctuelle, à partir d'une source connue (installations ou stocks de déchets), observable au moins en partie ; pollution ponctuelle, à partir de source non observable ; pollution diffuse sur l'emprise du site industriel ;
- les stratégies visant à définir l'emprise de la pollution : confirmation de l'extension d'une pollution ponctuelle, à partir d'une source connue, observable au moins en partie, ou à partir d'une source ponctuelle, non observable ; évaluation de l'exposition d'un milieu cible/impacté (sur un site non industriel) avec ou sans pollution déjà identifiée au voisinage du milieu ;
- les stratégies destinées à évaluer le risque ou les enjeux de la pollution : étude de risque d'une pollution ponctuelle sur site industriel, à partir d'une source connue (installations ou stocks de déchets) ou à partir de sources de pollution diffuses ou non localisées ; étude de risque sur un site non industriel avec une pollution déjà identifiée au voisinage (pollution ponctuelle ou pollution diffuse) ; évaluation d'une pollution ponctuelle, à partir d'une source connue (installations ou stocks de déchets) ou à partir de sources de pollution diffuses ou non localisées (installations historiques), en vue d'audit environnemental de site ou transfert de propriété ;
- pour les cas ci-dessus, le cas particulier des sites ouverts mais à topographie contraignante (présence de fortes pentes, de plans ou cours d'eau) ;
- les stratégies pour accompagner la dépollution et la réhabilitation de site : évaluation des travaux à effectuer, sur un site industriel ou hors du site industriel ; tri des matériaux et suivi des travaux ; contrôle technique de fin de travaux.

Les situations dépendent aussi de la nature des polluants. On précise ici les spécificités relatives aux polluants inorganiques, les polluants organiques volatils et les polluants organiques peu volatils, qui présentent des comportements différenciés dans les sols. Au sein des polluants organiques peu volatils, on distingue les composés solubles dans l'eau des composés insolubles.

Ces stratégies font appel à un savoir-faire technique et méthodologique qui n'est pas détaillé dans chaque stratégie. Ce savoir-faire a été rassemblé à partir de l'expérience du CNRSSP et de la littérature scientifique ou technique. Il est regroupé en un volume séparé (**fascicule II**) et discuté dans une optique de recueil de bonnes pratiques, destiné à être consulté en parallèle avec le fascicule I, comme un manuel de référence.

Les principaux chapitres de ce manuel sont :

1. Typologie des plans d'échantillonnage
2. Hétérogénéité et densité d'échantillonnage
3. Techniques d'échantillonnage
4. Matériel d'échantillonnage
5. Gestion des données et SIG
6. Qualité et échantillonnage

Les éléments de coût ne font pas l'objet d'un chapitre particulier, ils sont abordés et intégrés dans chacun de ces six chapitres.

Dans le chapitre Typologie des plans d'échantillonnage, la discussion est centrée autour de la définition et du domaine d'application des principales stratégies d'échantillonnage:

- approches systématiques, grilles,
- échantillonnage aléatoire,
- échantillonnage arbitraire (à dire d'expert),

et de leurs multiples combinaisons possibles, notamment l'échantillonnage du site en plusieurs secteurs à stratégies distinctes, la densité d'échantillonnage variable, et les différentes adaptations aux particularités topographiques ou physiographiques.

Dans le chapitre Hétérogénéité et échantillonnage, sont abordés la définition du sol, les différents types d'hétérogénéité spatiale (le site, l'horizon, l'hétérogénéité de constitution), les échelles d'hétérogénéité spatiale (le site, le point d'échantillonnage, l'échantillon) et les relations entre représentativité et hétérogénéité.

On aborde l'hétérogénéité due au comportement des polluants (hétérogénéité de distribution), l'hétérogénéité de constitution, les questions d'hétérogénéité liées à la préparation mécanique, et la relation entre volume à prélever et représentativité.

Ces notions servent de base à l'évaluation et la compréhension de l'erreur fondamentale d'échantillonnage et des autres sources d'erreur (représentativité et erreurs associées, erreur de ségrégation, erreurs de préparation et de prélèvement).

On déduit de ceci un certain nombre de recommandations sur le nombre d'échantillons à prélever, avec des exemples en France et hors de France. L'aide de la géostatistique pour la stratégie d'échantillonnage et l'optimisation du nombre d'échantillons est mentionnée.

Le chapitre Techniques d'échantillonnage regroupe les descriptions des différents types d'échantillons (prélèvements remaniés et non remaniés, échantillons composites et leur application aux plans d'échantillonnage), celles des différents types d'ouvrages d'accès au sol : prélèvements manuels de la tranche supérieure du sol, prélèvements en profondeur semi-manuel ou par forage, fosses d'exploration, tas de terre (sol excavé), puits de réservoir (fosse, extraction de citerne...).

Il fait le point sur les mesures sur site dans le cadre de l'échantillonnage, et notamment les mesures sur site de différents types de polluants, et des gaz dans le sol.

Il aborde de manière sommaire les techniques spécifiques aux composés organiques volatils.

Il résume enfin les pratiques générales destinées à éviter la contamination, les techniques de préparation de l'échantillon sur site, le choix du flaconnage, le stockage et transport, et l'échantillonnage des produits libres.

Le chapitre Matériel d'échantillonnage décrit le matériel de prélèvement manuel (pelle, truelle, cuillère, tarière à main, tube de prélèvement) ; le matériel de prélèvement en profondeur semi-manuel (tarière à bras, moto-tarière, préleveur hydraulique à piston) et le matériel de prélèvement en profondeur par forage (tarière mécanique, tarière pleine, contrôlée ou à vis, tarière à tige creuse, forage à percussion par câble, forage rotatif, préleveurs par poussée, préleveur à gouge fendue, tube préleveur à paroi mince, préleveur à tube, préleveurs par rotation, tarière à godet, échantillonneur rotatif, carottier en continu), les appareils d'échantillonnage continu, les sondes et dispositifs d'échantillonnage à fenêtre, et les sondes contrôlées.

Il contient quelques indications sur le matériel spécifique aux composés organiques volatils (COV/VOC).

Le chapitre Gestion des données et SIG contient les différents aspects de la gestion des données impliqués par les opérations d'échantillonnage, notamment les différents documents où doivent figurer les données recueillies sur site :

- le plan prévisionnel d'échantillonnage, précisant la stratégie retenue (modèle d'échantillonnage), les emplacements où les échantillons sont à prélever, leurs profondeurs, le type d'échantillons, les techniques à utiliser, les mesures à effectuer sur site, les règles de numérotation, de stockage, de transport et la destination prévue des échantillons;
- rapport d'échantillonnage, comprenant les informations sur le site, la liste et la position des échantillons, les mesures effectuées lors de l'échantillonnage, autres informations sur les échantillons, le plan d'échantillonnage actualisé et toutes les informations sur les échantillons qui seront utiles pour le laboratoire d'analyse, et ensuite, pour l'interprétation des résultats;
- rapport d'étude, avec liste et position des échantillons, mesures effectuées lors de l'échantillonnage, plan d'échantillonnage final, résultats d'analyse et présentation cartographique des résultats.

Il présente l'intérêt d'une gestion structurée des échantillons, mesures et résultats d'analyse en format base de données et leur exploitation en SIG (GIS, système d'information géographique). La

méthodologie décrite est basée sur l'approche du CNRSSP, et différentes configurations logicielles sont présentées.

Le chapitre Qualité et échantillonnage présente les notions d'assurance et contrôle qualité (QA/QC), les indicateurs utilisés pour l'évaluation de la qualité et les indicateurs statistiques (distributions, variance et écart-type, précision, biais ou erreur systématique, limite de détection, limite de quantification, les intervalles de confiance).

Il examine les types d'incertitude impliquant mesure et prélèvement, les indicateurs de représentativité, et les principales sources d'erreur ou d'incertitude en échantillonnage des sols.

Il présente ensuite différentes démarches :

- les objectifs de qualité (DQO),
- l'approche PBMS (Performance-Based Measurement Systems),
- la planification systématique.

La relation entre densité d'échantillonnage et intervalle de confiance du diagnostic peut alors être abordée sur des critères objectifs ou quantitatifs, notamment en ce qui concerne densité d'échantillonnage et détection d'une anomalie, ou relation entre densité et intervalle de confiance du diagnostic.

Le chapitre contient une revue des procédures de contrôle de la qualité, et de la relation entre coût et objectifs de qualité (notions de données efficaces, plans d'échantillonnage et d'analyse (SAP), mesures à objectifs de performance (PBMS), plans de travail dynamiques et plans d'échantillonnage et d'analyses adaptatifs (ASAP).

Enfin, un glossaire regroupe les définitions des principaux concepts environnementaux en relation avec l'échantillonnage.

Les normes françaises et internationales applicables à l'échantillonnage des sols font l'objet d'une présentation détaillée, complétée par une liste de normes ASTM et US-EPA.

Le glossaire, les normes et la liste des références bibliographiques sont regroupés sous forme d'un troisième fascicule (**fascicule III**) pour faciliter leur consultation.

## **Strategies and technologies for soil sampling on industrial sites**

### **Abstract**

The present document is a record of currently available strategies and technologies for soil sampling on industrial sites, both past and active, in connection with various objectives detailed hereunder. It differs from other documents in that it is aimed at providing answers to most of the interrogations of a site owner or operator, regardless of the type of investigation for which a soil sampling program is requested. It tries to help them to answer to most of polluted site-related requirements in an optimised way.

These interrogations may be classified under the following issues:

- detection of a possible pollution, or alternately, verification of the absence of any pollution;
- characterisation of a known or newly detected pollution;
- evaluation of the risk, legal or financial issues linked with this pollution;
- determination of the extent of the polluted area,
- remediation evaluation, follow-up and verification.

They may apply to the evaluation of a pollution source or its impact, as well as that of the evaluation of the level of exposure of a target milieu. They are addressed to the industrial site itself as well as to the neighbouring properties.

The elements provided by the present document should help to select the most relevant strategy, taking into consideration the site status and the aim of the study.

This choice will affect

- how the considered study will provide adequate answers, and
- the cost of the implied field and lab investigations.

Strategies are proposed for most situations involving metals or non-volatile organics. Specific technologies for volatile organics are mentioned, but neither explosives nor radioactive substances are addressed.

Sampling situations, site physiography and industrial past contribute to soil variability. The level of variation in sampling strategy and technology required to cope with this variability is such that no standard sampling good practice can be described.

The present document aims at providing extensive information on the possible options for strategies or techniques, on selected approaches for the most common situations, and on how to optimise these approaches taking into account the variability of:

- natural site conditions,
- contaminants,
- collection methods,
- current or planned site use,
- contamination pathways and exposure,
- analytical approaches.

The various contexts are displayed as a two-dimensional grid, one axis being the campaign objective, and the other axis, the pollution type and site characteristics, defining a pollution topology. These two axes define a number of "sampling situations" for which are proposed preferred sampling strategies.

This notion of "preferred strategy" results from the absence of a standard or regulatory method. Standard or regulatory guidelines in France are based on commonsense and good practice, and many strategies are acceptable as far as it is demonstrated that they are relevant in a given case. In this context, a preferred strategy will be the cheapest suitable method allowing the study objectives to be fulfilled.

The main strategies described in the document (fascicule I) comprise:

- pollution detection strategies: identification, on an industrial site or on an open area, of a localised pollution, from a non observable source; identification of a localised pollution from a diffuse source, not directly observable; exposure evaluation of a target milieu (open area) without any locally identified

pollution; localisation of a pollution in order to assess the exposition of a target milieu with or without any locally identified pollution,

- pollution characterisation strategies: localised pollution, from a known source (industrial facilities or waste stockpiles), at least partly observable; localised pollution from a not directly observable source; diffuse pollution on an industrial site,

- pollution extent delimitation strategies: confirmation of the extension of a localised pollution, from a known source (industrial facilities or waste stockpiles), at least partly observable, or from a not directly observable source; exposure evaluation of a target milieu with or without any locally identified pollution,

- risk or liability evaluation strategies: risk assessment of a localised pollution on an industrial site, from a known source (industrial facilities or waste stockpiles) or from a not directly observable source (diffuse or not localised); risk assessment on a non-industrial site from a known source in the vicinity (localised or diffuse pollution); localised or diffuse pollution, from a known source (industrial facilities or waste stockpiles) or from a not directly observable source (diffuse or not localised, historic pollution), for the purposes of a site environmental audit and/or property transfer,

- for the above strategies, specificities for sites with steep slopes, water courses or surfaces,

- pollution remediation and site revitalisation related strategies: evaluation of the volume to be remediate, both on the industrial site or outside it ; excavated soil screening and works monitoring; technical reception of the remediate site.

Situations may also be affected by the type of pollutant. Specificities relative to inorganic substances and organic substances with moderate or high volatility are examined. For less volatile organics, soluble and less soluble substances are set apart.

Strategies listed in fascicule I incorporate various technologies and methodologies, which are not described in detail in each strategy. The best practice in soil sampling gathered from both CNRSSP experience and published papers was summarised in a separate volume (fascicule II), intended to be used as a technical reference manual besides the strategies compendium (fascicule I). The main entries for this document are:

1. Sampling plans typology
2. Heterogeneity and sampling density
3. Sampling techniques
4. Sampling equipment
5. Data management and GIS
6. Sampling and quality management

Cost issues in sampling are dealt with in each chapter.

In the Sampling plans typology chapter, the discussion is centred around the definition and application of the main sampling strategies:

- systematic sampling,
- random sampling,
- judgmental (expert) sampling

and their various combinations, including site splitting, variable density and adaptations to site particularities.

In the Heterogeneity and sampling density chapter are provided the definition of soil and of various types of spatial heterogeneity, at the scale of the site, the horizon, and constitution heterogeneities. Three scales of spatial heterogeneity are considered: the site, the sampling point and the sample itself. Relationships between representativity and heterogeneity are examined.

Distribution heterogeneity is defined in relation with differential pollutant behaviour. Constitution heterogeneity is examined with its effects on mechanical preparation, sample size and sample representativity.

These notions are used as a basis for the understanding and evaluation of the fundamental sampling error and of other error sources (representativity and associated errors, segregation errors, sampling and preparation errors).

Some recommendations are deduced on the required samples number, with examples from French and other regulations. Geostatistics as a helpful tool for sampling strategy and the optimisation of samples number is mentioned.

In the Sampling Techniques chapter are gathered the descriptions of

- various sample types (disturbed or undisturbed samples, composite samples,... and their domain of application in sampling plans),
- various methods for accessing to soil samples : manual sampling for superficial soil, semi-manual or mechanised sampling at depth and soil coring, sampling pits, heap sampling for excavated soil, tank pits,...).

On-site measurements comprise parameters to be collected during sample collection and on-site analyses of pollutants, including soil gases.

Specific sampling techniques in view of VOC analysis are mentioned.

A summary of recommended practice is given for

- cross contamination avoidance,
- on-site sample preparation,
- sample vessel selection,
- sample storage and transportation,
- free product sampling.

In the Sampling Equipment chapter are described:

- manual sampling devices for superficial sampling (spoon, scoop, trowel, hand auger, sampling tube);
- semi-manual sampling devices for deeper sampling (hand operated or engine-operated augers, trier sampler, hydraulic piston sampler) and
- deep sampling equipment by drilling or coring (mechanical auger, bucket auger, screw auger, hollow stem auger, rotary and cable-tool drilling equipment, push sampling devices, split-barrel sampler, thin wall sampler, Shelby tube, coring devices...), continuous sampling tools, sampling probes, etc.

Some indications are provided on specific equipment for sampling in view of VOC analysis.

The Data management and GIS chapter contains the various aspects of data management involved in soil sampling operations, and describes the types of documents in which should be reported the data collected on site :

- the predictive sampling plan, with elements on the sampling strategy and model. This document contains the location of the desired sampling points, the sampling depths, sample type and sampling technique, the list of on-site measurements, and rules for sample numbers, storage, transportation and sample destinations;
- the sampling report, with the information collected on the site, the list and position of actually collected samples, the other data on samples and the results of on-site measurements. It should contain an updated sampling map and any useful information to be handed over to the analysis laboratory and to the person in charge of lab results interpretation;
- the study report, which should contain the list and position of analysed samples, the results of on-site measurements, the updated sampling map, the analysis laboratory results, and a cartographic presentation of results supporting their interpretation.

In this chapter are highlighted the benefits of a structured data management, database storage and GIS-based data processing. This methodology is based on the CNRSSP approach, and selected software combinations are discussed.

The Quality and sampling chapter gives information on quality insurance and quality control (QA/QC), and on the indicators used in quality assessment and statistics (distributions, variance, standard deviation, precision, bias, systematic errors, detection and quantification limits, confidence intervals).

The various types of uncertainty associated with measurement and sampling are discussed, as well as the representativity indicators, and the main sources of errors or uncertainty in soil sampling.

Several strategies linked with quality issues are further discussed:

- data quality objectives (DQO),



- PBMS (Performance-Based Measurement Systems),
- systematic planning.

The relation between sampling density and the confidence interval of the diagnostic may then be investigated on objective or quantitative criteria, especially about the relationships between sampling density and hot spot detection, or between density and confidence intervals of diagnostics.

Quality control procedures are reviewed, as well as the relationship between cost and quality objectives (notions of effective data, sampling and analysis plans (SAPs), performance-based objective measurements (PBMS), dynamic workplans, and adaptative sampling and analysis plans (ASAPs).

The glossary, the norms and standards and the list of references are grouped under a separate fascicule (fascicule III) for easier consultation. Definitions are provided for the main environmental concepts linked with sampling in a separate glossary. Besides, an extended presentation of French and international standards applicable to soil sampling is given in the Applicable norms chapter, and complemented with a list of selected ASTM and US-EPA standards. These two chapters and the list of bibliographical references are bound separately as Fascicule III for the sake of reading convenience.