

SYNTHESE / EXTENDED ABSTRACT
FRANÇAIS / ENGLISH

**EVALUATIONS QUANTITATIVES DES RISQUES SANITAIRES
DE SITES ET SOLS POLLUES**

**ANALYSE DES SOURCES DE VARIATIONS ET D'INCERTITUDES DANS
L'ESTIMATION DES EXPOSITIONS : CARACTERISATION, ETUDE
COMPARATIVE ET VOIES D'AMELIORATION**

**VARIATION AND UNCERTAINTY SOURCES IN EXPOSURE ESTIMATION
IN HEALTH RISK ASSESSMENTS OF CONTAMINATED LANDS:
CHARACTERIZATION, COMPARATIVE STUDY AND METHODS
FOR BETTER HANDLING**

décembre 2014

P. DE GIUDICI - SEPIA-Santé



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, Evaluations quantitatives des risques sanitaires de sites et sols pollués. Analyse des sources de variations et d'incertitudes dans l'estimation des expositions : Caractérisation, étude comparative et voies d'amélioration, 2014, 151 p, n°12-0675/1A
- ✓ Ces travaux ont reçu le soutien de l'ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie)
www.ademe.fr

© RECORD, 2014

RESUME

Ce travail avait pour objectif d'identifier, de caractériser et de comparer les différentes sources d'incertitudes rencontrées dans les études sanitaires de sites et sols pollués afin de définir les priorités en termes de traitement et de réduction des incertitudes dans ce type d'études. Les incertitudes rencontrées sont de types : variabilité (mise en jeu de phénomènes naturels), erreur (humaine et technologique) et ignorance (connaissance imparfaite). La caractérisation des sources d'incertitudes a été conduite selon les critères de nature, tendance (sous-estimation ou surestimation de l'exposition), amplitude (quantitative), répercussion (sur le résultat : additive, multiplicative ou autre), traitement actuel (d'après 8 études réelles récentes). L'amplitude est représentée par un indice défini soit par calcul, soit sur la base d'un jugement d'experts. Les amplitudes les plus élevées (indice 100) sont observées sur les incertitudes liées à l'échantillonnage et à la bioaccessibilité des contaminants dans les sols. Viennent ensuite (indices 10 à 20), les échantillonnages de gaz de sol, d'eaux souterraines, d'eaux de surface et d'air intérieur, les mesures *in situ* et les dosages de composés organiques en mélanges, puis (indice 5), les taux d'ingestion involontaire de terre et de consommation de plantes potagères. Les durées et fréquences d'exposition et les autres facteurs humains (poids, débit inhalé) et la gestion des échantillons (avec respect des normes) montrent les amplitudes les plus modérées (indice 2). Les incertitudes de plus fortes amplitudes peuvent être réduites par les méthodes géostatistiques (échantillonnage des sols), et par l'utilisation de tests *in vitro* validés (bioaccessibilité). La réduction des incertitudes liées aux autres échantillonnages et mesures peut être obtenue par le respect de normes et bonnes pratiques et par la compétence et le savoir-faire des opérateurs. Pour les autres facteurs humains (alimentation, facteurs physiques et physiologiques, durées d'exposition), il faudra privilégier l'utilisation de données actualisées et spécifiques de la population étudiée. Des procédures d'amélioration du traitement des incertitudes à l'usage des commanditaires et prestataires sont proposées ainsi que des pistes de recherche à court terme.

MOTS CLES

Sols pollués, incertitudes, évaluation de risque sanitaire.

SUMMARY

This work aims at identifying, characterizing and comparing the different uncertainty sources of risk assessments of contaminated lands with a view set up priorities in terms of handling and reduction. The uncertainties can be of three types: variability (involvement of natural processes), error (human or technological) and ignorance (imperfect knowledge). Uncertainties were characterized according to the nature, the trends (under- or overestimation of exposure), magnitude, quantitative propagation, site-dependency and current practices (8 recent studies). Magnitude is featured by an index determined by calculation or expert judgment. Higher magnitude (index 100) is shown by uncertainties surrounding the soil sampling and the bioaccessibility of soil contaminants. Lower magnitude (index 10 to 20), sampling of soil gases, surface and ground waters, indoor air, *in situ* soil analyses, measurement of petroleum hydrocarbon as well as (index 5), ingestion rate of soil and home produced vegetables. Exposure frequency and duration show the lowest magnitude (index 2), together with human exposure factors (food ingestion, body weight, and inhalation rate) and sample management (with adherence to standards). The uncertainties of highest magnitude can be reduced by the use of geostatistical techniques (soil sampling) or development and validation of *in vitro* tests (bioaccessibility). Uncertainties surrounding other sampling and measurements can be reduced by the adherence to relevant standards and best practices and the operators' skill and know-how. As regards human factors (food ingestion, body weight and inhalation rate, exposure duration and frequency), preference should be given to the data from recent and local surveys. Procedure to improve the handling of uncertainties by both land owners and contractors are proposed as well as short-term research projects of moderate cost.

KEY WORDS

Contaminated lands, uncertainties, health risk assessment.

Contexte et notions de base

Contexte, Objectifs et Périmètre de l'étude

Les évaluations de risques sanitaires et notamment celles afférentes aux Sites et Sols Pollués (SSP) mettent en jeu d'une part des hypothèses et d'autre part des valeurs numériques de données et de paramètres sur lesquelles pèsent des incertitudes plus ou moins fortes, car faisant intervenir des phénomènes naturels et physiques complexes que l'on ne peut totalement maîtriser. En dépit de ces incertitudes, les résultats de ces études peuvent être à l'origine de décisions lourdes en matière de gestion, se traduisant par des actions physiques (excavation, dépollution, etc.), sociales (limitation ou interdiction de certaines activités), ou de planification (usages futurs des sites). Il serait cependant peu réaliste de vouloir réduire ou contrôler l'ensemble des incertitudes inhérentes aux études sanitaires de SSP. Par contre, il serait très profitable, pour améliorer le niveau de confiance à accorder aux résultats de ces études, d'identifier les sources d'incertitudes à appréhender en priorité, et de connaître les méthodes disponibles pour leur réduction.

Pour contribuer à cet objectif général, les objectifs spécifiques de la présente étude ont été définis comme suit :

- Etudier les sources de variations et d'incertitudes concernant les expositions lors des évaluations des risques sanitaires de sols pollués ;
- Proposer des recommandations destinées à guider l'utilisateur ou le commanditaire dans la conduite des études ;
- Proposer des voies d'amélioration et de recherches complémentaires afférentes à cette problématique.

Le périmètre de cette étude concerne les sources de variations et incertitudes afférentes aux études sanitaires de SSP et plus particulièrement celles concernant les facteurs d'exposition, qu'ils soient liés à l'état des sites, à leurs usages ou aux caractéristiques des populations cibles. Les incertitudes afférentes aux modèles de transferts et à l'élaboration des Valeurs Toxicologiques de Référence (VTR) ne sont pas incluses dans le périmètre de l'étude.

Différents types d'incertitudes rencontrés dans les études santé de sites et sols pollués

Dans les études sanitaires de SSP, la chaîne des hypothèses qui aboutit, à partir de la pollution des différents milieux, à une estimation de risques liés à l'utilisation de ces milieux par les populations, comporte un grand nombre de sources d'incertitudes que l'on peut classer en trois grandes catégories :

- la **variabilité**, (ou stochasticité), qui peut être en principe décrite et estimée, mais non réduite. La variabilité est décrite par une distribution statistique qui peut être construite à partir d'un échantillon de la population des valeurs possibles. Il sera alors de la responsabilité de l'évaluateur de choisir une valeur ponctuelle représentative dans la distribution en fonction de certains critères généralement liés au niveau de protection que l'on veut appliquer, ou encore de considérer la distribution dans son ensemble par une approche dite « probabiliste ». Les facteurs humains d'exposition tels que le poids corporel ou la consommation d'eau sont des paramètres typiquement soumis à variabilité. Cependant, la variabilité de certains paramètres (variations

Context and basic concepts

Context, purposes and scope of the study

Health risk assessments, especially those dedicated to contaminated lands (CL), are based on hypotheses and numerical values of parameters submitted to more or less significant uncertainties due to the complexity of involved physical and biological processes. In spite of these uncertainties, the results of these studies may trigger management decisions involving high costs of physical works (excavation, depollution), social outcomes (regulation of certain activities) and planning constraints (land use). Actually, it would be unrealistic to reduce or control all the uncertainties relating to health studies of contaminated land but it would be of upper interest to identify the uncertainty sources, to rank them according to their impact on the results and to review the available methods to handle them.

To this general aim, the purposes of this study have been defined as follows:

- *Characterize the uncertainty and variability sources pertaining to health risk assessment of contaminated lands,*
- *Make recommendations for supporting the user and the land owner during the implementation of studies,*
- *Propose improvement method and research subject relating to uncertainty analysis.*

In the framework of health assessment of contaminated lands, the scope of the present study mainly covers the exposure factors relating to the environmental state of sites, their use or the features of target populations. The uncertainty associated with both the transfer models and the elaboration of health-based guidance values of pollutants is not addressed.

Different types of uncertainties in health assessment studies of contaminated lands

In the health risk assessment of contaminated lands, the chain of hypotheses going from the on-site pollutants measurements in the different media of exposure down to the estimate of exposure of people using or in contact with these media involves many sources of uncertainties that fall into the following categories:

- **Variability**, which cannot be reduced but described by a statistical distribution. It will rest with the assessor to choose a representative point estimate such as reasonable maximum value, or to use the entire distribution in a probabilistic approach. Natural or physiological factors such as body weight or drinking water consumption are typically subject to variability. However, the variability of certain parameters such as seasonal variations of a particular water table level is difficult to feature with classical distribution function.
- **Error** (human and technological), unavoidable in laboratory analyses and other physical and chemical measurements as well as in sampling and data reporting. Main of these errors, especially analytical ones, can be quantified in magnitude by appropriate methods.
- **Ignorance** or limited knowledge of certain parameters. Ignorance can originate in complexity and the lack of scientific knowledge: in this case the

saisonniers, interannuelles du niveau des nappes phréatiques, etc.) reste difficile à décrire par des fonctions de distribution.

- l'**erreur** humaine ou technologique, systématiquement commise au niveau des analyses de laboratoire et autres mesures physiques ou chimiques, mais également au niveau des prélèvements d'échantillons, dans la géolocalisation, le report de données, etc. Une grande partie de ces erreurs, en particulier les erreurs analytiques, sont quantifiables en amplitude par des techniques adaptées.
- l'**ignorance**, ou plutôt, la connaissance limitée de certains paramètres. Cette ignorance peut s'appliquer à des phénomènes complexes encore peu connus, dans ce cas, on peut supposer que le niveau d'ignorance s'atténuera avec le temps et l'avancée des recherches. Elle peut être plus fondamentale dans le cas de l'inexistence de documents ou de témoins relatant les activités d'un site pendant une certaine période. L'ignorance peut également provenir de l'impossibilité de mesurer précisément ou de manière exhaustive, les valeurs de certains paramètres, comme par exemple, la concentration des polluants en tous points d'un site. Ce type d'incertitude par ignorance peut être réduit de diverses manières par une augmentation du nombre d'échantillons prélevés, les retours d'expérience, les jugements d'experts, des approches statistiques particulières ou des techniques spécifiques tels que les modèles géostatistiques.

Ces catégories, qui font appel à des notions compréhensibles par tous, ont été utilisées pour caractériser les sources d'incertitudes dans l'étude. Il faut cependant rappeler qu'elles ne sont pas tout à fait disjointes : l'incertitude associée à un paramètre constitué de nombreuses variables de distributions complexes pourra être considérée comme de type « ignorance ».

Niveaux de traitement

Le traitement des incertitudes dans les études de risques sanitaires est recommandé par les instances internationales (OMS), étrangères (EPA aux Etats-Unis, RIVM au Pays-Bas, etc.) et nationales (norme NF X 31-620-2011, guides MEDD, InVS, INERIS). Cependant, le niveau d'approfondissement de ce traitement n'est pas toujours décrit, si ce n'est pour dire qu'il doit être proportionné aux enjeux de l'étude. Les différents niveaux d'approfondissement du traitement des incertitudes sont globalement les suivants :

- Niveau qualitatif : description des tendances générées par la méconnaissance de certains paramètres ou de certaines données sur le risque estimé, par exemple : la non prise en compte de l'exposition par contact cutané va dans le sens d'une minimisation du risque ;
- Niveau semi-quantitatif : analyse de **sensibilité** consistant à faire varier un ou plusieurs paramètres et à étudier l'impact numérique sur le résultat (exemple : le taux de renouvellement de l'air dans un local ou la fréquence d'exposition des populations cibles). Il faut noter que ce niveau comme le précédent reposent généralement sur une approche **déterministe**, consistant à donner une valeur fixe aux paramètres, représentative des valeurs possibles avec un niveau plus ou moins grand de précaution, par exemple : pour la consommation d'eau de boisson chez l'adulte, la valeur de 2l/j généralement adoptée représente le percentile 95 mesuré dans cette population.
- Niveau quantitatif : il s'agit cette fois d'une approche

uncertainty will be progressively reduced by the progress of sciences. It can also stem from the impossibility to measure the full extent of a basic parameter such as the pollutant concentrations throughout the whole surface of a contaminated site: in that case the uncertainty can be reduced by increasing the number of samples, by the elicitation of expert judgment or appropriate methods such as geostatistical analysis.

The above categories are easy to conceptualize by most people and have been hence used for the characterization of sources of uncertainties. However in practice, the limits between categories are not so sharp. So when a parameter involves many variables of diverse distribution, the associated uncertainty can be classified as ignorance.

Sophistication levels of Uncertainty handling

Uncertainty analysis in health risk assessment of contaminated land is recommended by international (WHO), foreign (US-EPA and RIVM) as well as French institutions : French standard NF X 31-620-2011, guidelines issued by the Ministry in charge of Environment, French Institute for Environment and Risk (INERIS) and French Institute for Public Health Surveillance (InVS). Although the level of sophistication required is not often specified, the usual rule is that this level should always be appropriate to the context and objectives of the assessment. The different levels of approach are as follows:

- *Qualitative level: description of trends on the risk indicators due to the lack of knowledge of certain parameters or data. For instance: lack of consideration of the dermal exposure will underestimate the health risk.*
- *Semi-quantitative level, involving a sensitivity analysis consisting in changing the value of one or several parameters and calculating the resulting change of the values of risk indicators (for example, the air exchange rate for indoor air concentration of a pollutant. It is noteworthy that both qualitative and semi-quantitative approaches are deterministic and based on "point estimate" of parameter values such as the mean value or a "reasonable maximum value" (for example, the 2L/day rate usually taken for drinking water consumption is the P95 of the statistical distribution among adult population).*
- *Quantitative level, which involves a probabilistic approach taking into account all possible values of the parameters. This approach frequently uses computing methods such as Monte-Carlo simulations by which the distribution of exposure estimates can be obtained from distributions of parameters values. When these distributions are unknown, uncertain probability (fuzzy logic) approaches can be used, that are especially appropriated to analyzing data from expert judgment. Software enabling the combined use of both probabilistic and fuzzy approaches has been developed few years ago by the French Bureau of Geological Survey (BRGM) and is now being updated.*

probabiliste, consistant à prendre en compte la distribution complète des valeurs de tous ou certains des paramètres (poids corporel dans la population générale, par exemple). Cette approche a recours aux méthodes de calcul numérique telle que la simulation de Monte Carlo, devenue d'application courante grâce au développement de l'informatique. En tenant compte des distributions des paramètres déterminants, on obtient au final une distribution des résultats (exposition ou risque). Cette méthode requiert néanmoins la description mathématique de la distribution des valeurs (normale, log-normale ou autres). Lorsque cette distribution est inconnue, on peut avoir recours à une approche « **possibiliste** » (logique floue ou probabilités incertaines), particulièrement adaptée aux estimations par jugement d'expert. Il faut noter qu'un didacticiel hybride permettant une utilisation combinée des approches possibiliste et probabiliste applicables aux sols pollués a été développé par le BRGM et est en cours d'actualisation.

Principaux résultats

Sources d'incertitudes, caractérisation et méthodes de réduction et de traitement

Méthodes de caractérisation

Les sources d'incertitudes rencontrées dans les études santé ont été caractérisées selon les critères suivants :

- La **nature** de l'incertitude : ignorance, erreur, variabilité
- La **tendance** résultant de la non-prise en compte de l'incertitude. Une tendance positive (+) signifie que les valeurs retenues sans réduction de l'incertitude ont tendance à surestimer l'exposition, et inversement pour une tendance négative (-). De nombreuses sources d'incertitudes peuvent produire une tendance positive ou négative (+/-), ou plus fréquemment positive (+/-) ou plus fréquemment négative (+/-).
- L'**amplitude** caractérise l'écart, ou la proportion ?, entre les valeurs de paramètres d'exposition acquises ou déterminées d'une part selon l'application minimale des règles de l'art et d'autre part après réduction volontaire des incertitudes. Les indices d'amplitude ont été élaborés, soit par le calcul, soit par jugement d'experts membres de comités de suivi, ayant déjà réalisé, évalué ou commandité de très nombreuses études santé de SSP.
- La **répercussion** de l'incertitude sur les critères de **décision** : la manière dont la donnée ou le paramètre influe quantitativement ou qualitativement sur ? (indices de risques, catégorisation des milieux en « pollués » ou « non pollués »).
- La **dépendance au site**, caractérisant dans quelle mesure l'amplitude de l'incertitude est liée au site et à son état de pollution.
- Les **pratiques actuelles** sur la base de l'examen de **8 rapports d'études** réelles et récentes. Ces rapports ont été fournis par les sociétés membres de Record (commanditaires ou prestataires); ils ont été rédigés entre 2011 et 2013, et ont tous été validés par les autorités sanitaires et environnementales.

Main Findings

Uncertainty sources: characterisation and methods for handling and reduction

Methods of characterization used

The characterization of uncertainty sources likely to be found in health impact assessment of contaminated lands is based on the following criteria:

- **Type of uncertainty** : ignorance, error or variability
- **Trend**, in quantitative terms, resulting from not-handling of uncertainty. Positive trend (+) means that if uncertainty is not treated, the exposure will be overestimated. Likewise if the trend is negative (-) the exposure will be underestimated. In many cases, the trend can be positive or negative or more frequently positive (+/-) or negative (+/-).
- **Magnitude**, which represents the gap or the proportion rate between the numerical values of an exposure parameter estimated/measured respectively either with the only observance of good practices or after voluntary uncertainty reduction. Magnitude indices have been elaborated either by basic calculation or by expert judgment. The expert group was made up of representatives of Record member companies, with large skill and experience in health risk assessment of contaminated lands as employees of land owners or consulting companies.
- **Quantitative propagation** of uncertainty on decision criteria: additive, multiplicative, other.
- **Site-dependency** indicating to which extent the magnitude of the uncertainty is associated with the site and its pollution state.
- **Current practices** used for handling the uncertainty, on the basis of height relevant studies conducted recently, the report of which were supplied by the Record members companies

Characterization of uncertainty sources

The following tables set out the characterization of uncertainty sources and the relevant methods for reduction.

It appears that the uncertainty relating to both sampling and bioaccessibility¹ of soil contaminants show the higher magnitude indices whereas the indices relating to the human factors of exposure are significantly lower.

It may be concluded that some uncertainty sources can be overlooked because of limited magnitude. However, the estimation of exposure involves a long chain of uncertainty sources, the magnitudes of which multiply by each other, to some extent. For instance, exposure through involuntary soil ingestion involves the following chain of uncertainty sources: soil sampling*sampling management*solubilizing heavy metals*laboratory analyses*ingestion rate* exposure frequency*exposure duration*bioavailability. Consequently it remains critical to estimate the uncertainties all along the chain and to leave as less as possible untreated uncertainties, that will reduce the confidence level in the study results.

¹ Bioavailability (oral) of a substance is the proportion of the ingested quantity of the substance which is actually absorbed by the organism ; bioaccessibility is the proportion which is extracted in the digestive tract (thus quantitatively lower than bioavailability).

Caractérisation des sources d'incertitudes

Les tableaux suivants décrivent les résultats de la caractérisation des sources d'incertitudes et les méthodes de réduction pertinentes. Il est nécessaire de rappeler les limites de la démarche, en particulier dans l'élaboration des indices d'amplitude, principalement basée sur la recherche bibliographique et des jugements d'experts. Les experts mobilisés n'ont pas été en effet des spécialistes thématiques de chaque source d'incertitudes mais avant tout des praticiens expérimentés des études sanitaires de SSP.

Il apparaît que les incertitudes liées à l'échantillonnage et à la biodisponibilité² des contaminants dans les sols montrent les indices d'amplitude les plus élevés alors que celles afférentes aux facteurs humains d'exposition montrent les indices les plus bas.

On pourrait en déduire que certaines incertitudes ont moins d'intérêt à être traitées sous prétexte que leur amplitude est limitée. Cependant, les sources d'incertitudes n'agissent pas de manière isolée au cours du processus d'estimation de l'exposition et leurs amplitudes peuvent se multiplier, selon les modes et scénarios d'exposition étudiés. Par exemple, le scénario « ingestion de sol » mobilisera la succession des sources d'incertitudes suivantes : échantillonnage du sol x gestion des échantillons x mise en solution des ETM (Eléments Traces Métalliques) x mesurages de laboratoire x taux d'ingestion x fréquence d'exposition x durée d'exposition x biodisponibilité. Il importe donc de maîtriser les incertitudes tout le long de cette chaîne afin de laisser subsister le moins possible d'incertitudes résiduelles, comme autant de facteurs limitant le degré de confiance dans les résultats de l'étude.

². La biodisponibilité (orale) d'une substance est la proportion de la quantité de substance ingérées qui est réellement absorbé par l'organisme, la bioaccessibilité est la proportion qui est extraite dans le système digestif (donc inférieure à la biodisponibilité)

Table 1a: Characterization of uncertainty sources in health risk assessment of contaminated lands
(C): magnitude index based on calculation – (E): magnitude index based on expert judgment

Uncertainty source	Type of uncertainty	Trend (1)	Magnitude (index)	State of art or usual practices	Others means of reduction or handling
Identification of pollutants of interest	Ignorance	(-)	10 (E)	Technical and methodological guidebooks	Literature study
	<i>Remarks/justifications:</i> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Uncertainty lying on both qualitative (identification of unknown substances) and quantitative data (substance concentrations), hence the difficulty to estimate magnitude. ▪ The more informative the site historical study, the lower the potential magnitude of uncertainty. 				
Soil sampling	Ignorance	(-)	100 (E) ou 10 (2) (E)	Methodological and technical guidebooks	Geostatistical techniques applied to sampling strategy and choice of representative concentration values
	<i>Remarks/justifications:</i> <ul style="list-style-type: none"> ▪ In contaminated soil, the proportion between concentrations of contaminants may reach 100 for metal and more for organics which are not naturally present. ▪ This proportion can be lowered down to 10 if the concentration is not represented by the maximal value but by more reasonable indicator such as P90 or other. 				
Solid waste sampling	Ignorance	(-)	10 (E)	Methodological and technical guidebooks	Geostatistical techniques applied to sampling strategy and choice of representative concentration values
	<i>Remarks/justifications:</i> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Concentrations of pollutants may vary to a significant extent inside the same material and to a extreme extent in different matters, according to their origin. 				
Surface water sampling	Ignorance	(-)	10 (E)	Adherence to standards Methodological and technical guidebooks	Geostatistical techniques and good knowledge of the hydrological features
	<i>Remarks/justifications:</i> <ul style="list-style-type: none"> ▪ If good practices are applied, the differences between the measured concentration and the min/max values should remain moderate. ▪ Empirically, a magnitude index of 2 can be given for variations within the stream and a magnitude index of 5 for seasonal variations (except in channels and regulated watercourses). 				
Groundwater sampling	Ignorance	(+/-)	20 (E)	Adherence to standards Methodological and technical guidebooks	Geostatistical techniques and good knowledge of the aquifer and seasonal variations
	<i>Remarks/justifications:</i> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Concentrations of pollutants may vary to a significant extent in low-conductivity or discontinuous (karstic) aquifers or if pollutants are not miscible to water (floating or diving compounds). ▪ Seasonal variations are moderate but the rise of water table may mobilize soil pollutants located in the vadose zone. ▪ A magnitude index of 2 for the seasonal variations of concentration, and of 10 for variations within the aquifer. 				
Sampling of home produced plants	Ignorance	(+/-)	20 (C)	Methodological and technical guidebooks	Verification of the consistency between soil and plant concentrations. No sampling of cabbage for PAH (accumulation in leaves)
	<i>Remarks/justifications:</i> <ul style="list-style-type: none"> ▪ For a given pollutant at a given concentration in the soil, the concentration in plants of the same species may vary by a factor of 2 to 4, within a same category of plants (leaf-vegetable, root-vegetable, stem-vegetable, fruit vegetable, etc.) ▪ Within each category of plants, the concentrations in different plant species may vary by a factor of 1 to 10. 				
Indoor air sampling	Ignorance	(+/-)	10 (E)	Adherence to standards Methodological and technical guidebooks	Increasing numbers of sampling points, taking account of prevailing conditions (weather, air exchange rate, etc.)
	<i>Remarks/justifications:</i> <ul style="list-style-type: none"> ▪ The concentrations of indoor or air pollutants within a building may vary by a factor of 5 to 10 if standards and good practices of measurement are observed (minimal air exchange, sampling method appropriate for the pollutant and the human exposure, etc.). 				

- (1) (+) or (-): overestimation or underestimation trend if uncertainty is not reduced.
(+) or (-): both overestimation and underestimation trends possible but overestimation more frequently observed
- (2) 100 if estimation based on maximal value, 10 if based on statistical indicator

Table 1b: Characterization of uncertainty sources in health risk assessment of contaminated lands (following)
(C): magnitude index based on calculation – (E): magnitude index based on expert judgment

Uncertainty source	Type of uncertainty	Trend (1)	Magnitude (index)	State of art or usual practices	Others means of reduction or handling
Sampling of soil gases	Ignorance	(+/-)	20 (E)	Adherence to standards Methodological and technical guidebooks	Use of closed chambers
	<i>Remarks/justifications:</i> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Difference between measured and actual concentration of soil gases vary according to the gas. ▪ Not of concern if used for pollutant detection (screening). ▪ Of higher concern if used for the estimation of soil-air pollutant flows because pumping may mobilize low volatile compounds which are not likely to be found in the air under natural conditions. The prevailing conditions (temperature, humidity) can also affect the measurement. 				
In situ soil analyses	Error	(+/-)	10 (E)	Adherence to standards Methodological and technical guidebooks	-
	<i>Remarks/justifications:</i> <ul style="list-style-type: none"> ▪ The accuracy of in situ analysis is very lower than the one of laboratory analyses: the error can reach 5 to 40 % according to the manufacturers but far higher level according to the practitioners. ▪ The prevailing conditions (temperature, humidity) can also affect the measurement. 				
Sample management	Error	(+/-)	2 (E)	Adherence to standards Methodological and technical guidebooks	-
	<i>Remarks/justifications:</i> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Errors may potentially be high and add to each other but should be significantly reduced by the compliance with standards and good practices. ▪ Magnitude basically comparable to the one of laboratory analyses (< 50 %). ▪ Deviant concentration values are rare but can occur even with accredited laboratories. Errors can be identified by skilled operators when the gap is very high (for example, 100 as high as usual values), but are far less detectable when the gap is low (factor less than 10) unless counter-analyses are systematically made. 				
Method for solubilization of soil heavy metals	Ignorance	(+)	3 (C) (Cr and Ni)		Use of aqua regia method
	<i>Remarks/justifications:</i> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Concentration of Cr and Ni in soil given by the hydrogen fluoride method and aqua regia method can differ by a factor of 2 to 3 according to the soil. ▪ For other metals (Cd, Co, Cu, Mn et Zn), the differences are very weak (< 10 %). 				
Laboratory analysis	Error	(+/-)	3 (C)	Adherence to standards Contracting only accredited laboratory	-
	<i>Remarks/justifications:</i> <ul style="list-style-type: none"> ▪ For laboratories complying with the standards (accredited), the magnitude of analysis errors may vary from 15 to 50 % when the concentrations are above the quantification limit. ▪ Uncertainty may be higher for certain organic substances such as chlorophenol, unspecified petroleum hydrocarbons, etc. 				
Considering total (petroleum) hydrocarbons	Error	(+)	10 (E)	Indicator and substitute compounds proposed by MADEP, TPHCWG, RIVM	No use of indicators and substitutes with health-based guidance values with UF >> 1000 Avoid redundant use of PAH guidance values
	<i>Remarks/justifications:</i> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Measurement methods are not standardized but analytical techniques such as gas chromatography are well mastered, which limits the magnitude of errors. ▪ Use of indicator or substitute compounds, which are not often representative of toxicity and environmental properties of studied pollutants. ▪ Health-based guidance values of indicators and substitutes elaborated with very high uncertainty factors (up to 10,000!). 				
Body weight	Variability	(+/-)	2 (C)	Standard value recommended by reference institutions	Use of updated French values
	<ul style="list-style-type: none"> ▪ In the French population: <ul style="list-style-type: none"> ○ adult: mean value 61 kg, median 64 kg, standard deviation 22 kg. ○ 3 child of 3 years old : mean value 15.5 kg, median 15 kg standard deviation 2.3 kg ▪ These values are consistent with WHO guidelines 				

(1) (+): overestimation trend if uncertainty is not reduced
(-): underestimation trend if uncertainty is not reduced
(+/-): both overestimation and underestimation trends possible but overestimation more frequently observed

Table 1c: Characterization of uncertainty sources in health risk assessment of contaminated lands (end)
(C): magnitude index based on calculation – (E): magnitude index based on expert judgment

Uncertainty source	Type of uncertainty	Trend (1)	Magnitude (index)	State of art or usual practices	Others means of reduction or handling
Inhalation rate	Variability	(+/-)	2 (C)	Standard values recommended by reference institutions	Use of updated French values
	<i>Remarks/justifications:</i> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Mean values in US population: <ul style="list-style-type: none"> ○ Adult man: 15.2 m³/d, adult woman: 11.3 m³/d – child 1 to 12 years: 8.7 m³/d 				
Body surface	Variability	(+/-)	2 (C)	Standard values recommended by reference institutions	Use of updated French values
	<i>Remarks/justifications:</i> <ul style="list-style-type: none"> ▪ In French population: <ul style="list-style-type: none"> ○ General population: mean: 1.83 m², P95: 2.16 m² ○ Man 30 to 54 years: mean: 1.94 m², P95: 2.21 m² 				
Exposure frequency	Ignorance	(+/-)	2 (C)	Standard values recommended by reference institutions	Use of updated French values. Realistic exposure scenarios.
	<i>Remarks/justification:</i> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Unknown for the general population, but tendency to take maximal value of 365 d/year. 				
Exposure duration	Ignorance	(+/-)	2 (C)	Standard value recommended by reference institutions	Realistic exposure scenarios.
	<i>Remarks/justifications:</i> <ul style="list-style-type: none"> ▪ France (1999), mean residence duration: 8 years, median: 3 years, P90: 33 years, P95: 71 years. ▪ Tendency to take higher values (30 or 70 years). 				
Involuntary soil ingestion (children and adults)	Ignorance	(+/-)	5 (E)	Standard value recommended by reference institutions	Realistic exposure scenarios.
	<i>Remarks/justifications:</i> <ul style="list-style-type: none"> ▪ In a US study on children under 6 years: <ul style="list-style-type: none"> ○ median : 24 mg/d - mean: 31 mg/d - P95: 91 mg/d - maximal: 137 mg/d ▪ Data missing or inaccurate for the adult population. 				
Drinking water consumption	Variability	(+/-)	2 (C)	Consumption national surveys	-
	<i>Remarks/justifications:</i> <ul style="list-style-type: none"> ▪ INCA2 study (2005-2006) in French population: mean consumption: 0,6 L/d, median: 0,4 L/d, P95: 2 L/d and P99: 3 L/d. ▪ Close to 2L/d usually used in studies. ▪ Values for children less studied. 				
Consumption of home produced food	Ignorance	(+)	5 (E)	Consumption national surveys	Specific, recent and local surveys spécifiques.
	<i>Remarks/justifications:</i> <ul style="list-style-type: none"> ▪ French data quite obsolete and only available as national mean values: local specificities and recent behavior changes not taken into account. 				
Bioavailability, bioaccessibility	Ignorance	(+/-)	100 (E)	100% default value	Use of in vitro tests with site soil or default values recommended by US-EPA
	<i>Remarks/justification:</i> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Large range of bioavailable fractions (< 1 % à > 99 %) according to the soils and the extraction protocols. ▪ Protocol harmonization (Barge protocol in UE) will reduced the range of values. 				

- (1) (+): overestimation trend if uncertainty is not reduced
(-): underestimation trend if uncertainty is not reduced
(+/-): both overestimation and underestimation trends possible but overestimation more frequently observed

Tableaux disponibles en français en Annexe

Principales méthodes de réduction

Trois catégories de sources d'incertitudes se distinguent selon leur mode de réduction :

- Pour la plus grande partie des sources d'incertitudes, la conformité aux normes et le suivi des guides techniques et méthodologiques constituent une première étape de réduction des incertitudes, et même la seule pour certaines sources telles que les mesurages *in situ*, la gestion des échantillons et les analyses de laboratoire.
- Pour d'autres sources, tels que l'échantillonnage des sols, déchets, eaux de surface et souterraines, l'étape « normative » ci-dessus reste indispensable mais il faut également appréhender les variations spatiales par des méthodes géostatistiques (krigeage, simulations) et/ou les variations saisonnières par des échantillonnages étalés dans le temps.
- Les sources d'incertitudes liées aux facteurs humains d'exposition de types physique ou physiologique (masse corporelle, débit respiratoire) ou comportemental (fréquence d'exposition, ingestion de terre, ingestion de légumes autoproduits) ne peuvent être réduites que par la prise en compte de données actualisées et spécifiques à la population cible.

Les méthodes de **géostatistiques** peuvent être d'un apport précieux pour réduire les incertitudes liées à la connaissance du site en permettant :

- de cartographier les pollutions en 2 ou 3 dimensions sur l'ensemble d'un domaine d'étude,
- d'introduire la notion d'incertitude au niveau des valeurs estimées et de les intégrer au processus décisionnel,
- d'intégrer de manière formelle les données indirectes (caractéristiques lithologiques, couleurs, odeurs, et autres) afin d'exploiter toute l'information disponible,
- de rationaliser les stratégies d'échantillonnage en mettant en évidence des zones d'imprécision sur lesquelles des échantillonnages complémentaires doivent être réalisés,
- de déterminer avec une plus grande précision les zones et quantités de sols à dépolluer et de faire entrer rationnellement la notion de coût dans le processus décisionnel,
- de cartographier les données issues des mesures géophysiques (*in situ*).

Il faut cependant garder à l'esprit que la géostatistique ne permet pas en principe de lever un doute sur l'existence d'une source de pollution hypothétique et, de manière plus générale, de créer de l'information nouvelle autre que celle fournie par les investigations.

La détermination de la **bioaccessibilité** des contaminants dans les sols est une pratique encore émergente et applicable à peu de substances (As, Cd, Pb). Elle devrait néanmoins se généraliser à court terme sous condition que des modèles valides et facilement utilisables en routine soient développés. Une fois ce cap franchi, l'impact sur des indices de risques et donc sur les décisions en matière de gestion des sites devraient s'avérer significatif.

Prise en compte actuelle des incertitudes et variations dans les études sanitaires des sites et sols pollués et propositions d'amélioration

Actuellement, dans les études sanitaires de SSP, les incertitudes sont traitées avec plus ou moins de détail selon les prestataires, mais sans dépasser le niveau semi-quantitatif (analyse de sensibilité à un seul paramètre). Bien que le traitement des incertitudes soit consigné, sans grande précision, il est vrai, dans les guides méthodologiques, il semble que les décideurs ne soient pas demandeurs d'un

Main reduction methods

According to the reduction method, the uncertainty sources can fall into three categories:

- For the vast majority of sources, the adherence to standards and methodological guidebooks is a first step to the reduction of uncertainty, and even the only one for sources such as *in situ* analysis, sample management and laboratory analyses.
- For other sources, such as sampling of soil, waste, surface and ground waters, adherence to standards remains necessary but spatial variations should be handled by geostatistical techniques and seasonal variations by sampling spread over time.
- Uncertainties associated with human exposure factors, both physical/physiological (body weight, inhalation rate) and behavioral (ingestion of soil and home produced food) can only be reduced by using updated and site-specific studies.

Geostatistical techniques can be very useful to reduce uncertainties relating to the site knowledge because making it possible to:

- map the pollution in 2 or 3 dimensions over the all study area,
- associate uncertainty values with the concentration estimates and incorporate them to decision process,
- valorize all the available data including non-concentration data such as geological feature, organoleptic properties, etc.,
- rationalize the sampling strategy and point out the imprecision zones where further investigations need to be carried out,
- determine accurately the areas and the volume of polluted material to be excavated and the associated cost which should be considered in the decision process,
- map data from geotechnical investigation.

Nevertheless it should be kept in mind that geostatistical approach cannot be used to confirm the presence of an unknown pollution source and more generally to "create" new information which would not provided by the site investigation.

Determination of bioaccessibility of contaminants in soil is still an emerging practice and is only applicable to few substances (As, Cd, Pb). This approach will likely become more widespread so long as validated methods will be developed and made easy to implement as a routine. Once this step reached, the impact on decision process should be quite significant.

Current handling of uncertainties in health assessment of contaminated land and proposed improvements

Until now, in the French health assessment of contaminated lands, uncertainty has been handled more or less thoroughly according to the assessor, but without exceeding the semi-quantitative level (one parameter sensitivity analysis). Although the handling of uncertainty is clearly – but without technical requirement – written down in the health risk assessment guidebooks, it seems the decision makers are not so demanding about this aspect, as long as a minimal precaution is taken in the estimation data (e.g.: maximal concentrations measured) and hypotheses (e.g.: maximal consumption/ingestion rates). This context is not always advantageous for the scientific objectivity or the cost of site management. Moreover, in the affected population and its representative

traitement plus approfondi. L'essentiel pour les décideurs, et donc pour les commanditaires, est que les raisonnements et calculs soient exposés avec transparence et qu'un niveau minimal de précaution soit appliqué (concentrations maximales rencontrées dans les échantillons, hypothèses d'exposition majorantes, etc.). Ces conditions ne s'avèrent pas forcément gagnantes pour l'objectivité scientifique ni pour l'économie de gestion des sites. De plus, parmi le public et ses représentants (associations environnementales, notamment) apparaissent de plus en plus d'individus compétents (« sachants ») qui pourraient questionner à propos de ces aspects.

Aussi est-il proposé aux **commanditaires** d'adopter une **démarche volontariste** de prise en compte des incertitudes déroulées en 9 étapes successives :

- 1) Elaboration d'un pré-diagnostic sur la base d'un examen du dossier et de l'ensemble des documents y afférents, et de visites de terrain.
- 2) Sur la base des incertitudes liées à la répartition des polluants sur le site : décision quant à la mobilisation d'un géostatisticien-conseil (assistance à maître d'ouvrage).
- 3) Préparation du cahier des charges avec : (i) insertion du dossier de pré-diagnostic avec synthèse du commanditaire, (ii) insertion du niveau minimal d'intervention (nombre de prélèvements dans les différents milieux, etc.), (iii) insertion des prescriptions spécifiques au traitement des incertitudes, et (iv) choix de la note d'évaluation relative au traitement des incertitudes (composante de la note technique générale).
- 4) Visite(s) de terrain avec les prestataires candidats.
- 5) Evaluation des offres techniques des prestataires candidats, notamment en regard du traitement des incertitudes et désignation du titulaire, avec appui du géostatisticien-conseil (si mobilisé).
- 6) Mise à disposition du titulaire du marché de l'ensemble des documents afférents au site.
- 7) Revue du plan d'investigation option révisée/augmentée du titulaire, comprenant en particulier le plan d'échantillonnage : validation ou proposition de modifications, avec appui du géostatisticien-conseil (si mobilisé). Prise de décision avec le géostatisticien-conseil (si mobilisé) concernant le traitement géostatistique des données.
- 8) Revue du rapport préliminaire portant sur des résultats de prélèvements et d'analyses, en regard du traitement des incertitudes : validation ou proposition de prélèvements complémentaires, avec appui du géostatisticien-conseil (si mobilisé).
- 9) Revue du rapport final en regard du traitement des incertitudes, avec appui du géostatisticien-conseil (si mobilisé).

Le cahier des charges des **prestataires** d'études sanitaires de SSP sera augmenté d'un ensemble de prescriptions spécifiques relatives au traitement des incertitudes pour l'ensemble des sources et le mode de présentation de ce traitement dans le rapport.

Pistes de recherche proposées

Les critères retenus pour définir de futures actions de recherche en matière de maîtrise des incertitudes sont :

- Le poids actuel de la source d'incertitudes visée dans les décisions relatives à l'évaluation sanitaire et la gestion des SSP,
- La possibilité de réduire cette incertitude par une action de recherche à court terme (moins de 5 ans) nécessitant un budget relativement limité (moins de 150 000 euros),
- La possibilité d'appliquer directement des résultats de la

(environmental NGOs), there are more and more knowledgeable persons who could ask question on uncertainty.

It is proposed that site owners (or sponsors) develop a proactive approach for handling the uncertainties according to the following nine steps:

- 1) *Preliminary site analysis based of an in-depth review of all the relevant documents and site visits,*
- 2) *On the basis of uncertainty associated with the pollutant concentrations over the site area: decision to contract a geostatistical specialist,*
- 3) *Development of requirements including: (i) report of preliminary site analysis, (ii) a minimal level of investigation (number of samples in different media, etc.), requirements specific to the handling of uncertainty and (iv) method of building the evaluation score for uncertainties handling (as a component of global evaluation score),*
- 4) *Site visit with tender companies,*
- 5) *Evaluation of technical proposal, taking into account the handling of uncertainties,*
- 6) *Supplying the awarded company with all the technical documents relating to the study site,*
- 7) *Review of the investigation plan (revised and augmented by the company) with the sampling plan for approval or proposal of modifications with the support of the geostatistical specialist (if contracted). Decision by the specialist if geostatistical treatment of data is to be implemented,*
- 8) *Review of the preliminary report of health assessment with regard to results of site investigations (concentration data) and handling of related uncertainties: decision if new investigations (samples) need to be conducted, with the support of the geostatistical specialist.*
- 9) *Review of the final report of health assessment for approval with regard handling uncertainties.*

Tender and contract documentation shall be enriched with clauses addressing specifically the handling of uncertainties and the way to set out them in the reports.

Proposed research projects

Further research areas have been proposed under the following alternative criteria:

- *The research project should address a source of uncertainty with a real influence in the decision process on health assessment and management of contaminated lands.*
- *The research project should result concretely in the uncertainty reduction in the short term and for a moderate cost (less than Euro 150,000).*
- *The results of the research should readily be applicable in the methods for handling uncertainty in health risk assessment of contaminated lands.*

Four research projects have been proposed according the above criteria:

- *Development of standardized tests for the phyto-availability of soil contaminants, which could be an alternative way for estimating exposure by consumption of home produced vegetable, beside the physiological modeling which shows many uncertainties and the vegetable sampling which cannot be always representative of all potential vegetable grown on site*
- *Feasibility study of systematic combined use of in situ*

recherche dans la méthodologie actuelle des études sanitaires des SSP

Quatre pistes de recherches sont proposées selon ces critères :

- Mise au point de tests standardisés de phyto-disponibilité pour les SSP, cette approche offrant une troisième voie entre la modélisation chargée d'incertitudes et les prélèvements directs de plantes sur le terrain qui ne sont pas toujours représentatifs,
- Faisabilité d'une systématisation de la prospection par sondes de mesure *in situ* couplée à la géostatistique dans le but de réduire les incertitudes sur les sites répondant à certains critères,
- Mise au point d'un logiciel d'analyse géostatistique évaluant les incertitudes d'échantillonnage directement du point de vue des risques sanitaires (étude pilote),
- Mise au point d'un guide méthodologique pour l'application de l'approche possibiliste dans le traitement des incertitudes liées aux études sanitaires des SSP et la communication autour des résultats qui en découlent.

Conclusions et recommandations

Les études sanitaires de SSP ont toujours comme point de départ des concentrations de polluants observées dans les différents milieux d'exposition : sols, eaux de surface et souterraines, gaz du sol, air intérieur, plantes potagères, etc. Par conséquent, les incertitudes liées à ces concentrations se propageront tout le long de la chaîne de calcul menant à l'estimation des expositions, donc des risques. Or certaines de ces incertitudes (sols, eaux de surface et souterraines) présentent de fortes amplitudes.

La représentativité des échantillons de sol est particulièrement déterminante, d'autant plus que le milieu sol est très souvent mis en cause, en raison de l'ingestion involontaire de terres et de poussières, en particulier chez les enfants. Cette représentativité est conditionnée par : (i) la connaissance de la répartition des concentrations de chaque polluant d'intérêt sur l'ensemble du site, et (ii) la détermination de la valeur tirée de cette répartition qui représentera le mieux l'exposition des populations.

L'incertitude afférente à la répartition des polluants peut être réduite par l'utilisation de mesures géophysiques (*in situ*) et par le recours aux méthodes de géostatistique. Le choix de la valeur représentative est actuellement traité la plupart du temps par application du principe de prudence consistant à retenir la concentration maximale. Une réflexion mérite d'être entreprise sur le sujet au regard de ce qui se fait à l'étranger, notamment aux Etats-Unis (approche statistique du maximum raisonnable).

A l'autre bout de la chaîne, les facteurs humains d'exposition sont soumis à des influences spatiales et temporelles et leurs valeurs indicatrices souffrent souvent d'obsolescence et d'un manque de spécificité locale. Des publications actualisées et géographiquement plus spécifiques ont été identifiées, même si parfois, des enquêtes locales s'avèrent profitables. Enfin, en entrant plus profondément dans les mécanismes d'exposition, le rapport montre le très grand intérêt de la prise en compte de la bioaccessibilité des polluants dans la matrice sol et en relate les dernières avancées.

Si les décideurs n'exigent pas actuellement un approfondissement poussé des analyses d'incertitudes, les représentants du public, qui comptent de plus en plus de personnes compétentes, pourraient être à l'origine d'une telle demande, à laquelle les commanditaires d'études sanitaires de SSP doivent être armés pour répondre.

analysis techniques and geostatistical software with the view of reducing uncertainties relating to soil sampling

- *Development of geostatistical software translating uncertainties associated with soil sampling and analyses in terms of health risk assessment*
- *Elaboration of a guidebook for a routine use of fuzzy logic (uncertain probabilities) in handling uncertainties in health assessment of contaminated land.*

Conclusions and recommendations

The point of departure of French health risk assessments of contaminated lands always consists in pollutant concentrations in different media: soil, waters, soil gases, indoor air, home produced vegetable, etc. Accordingly the uncertainties associated with these concentrations will propagate all along the calculation chain ending up to the estimation of the exposure and risk. But some uncertainties can show quite high magnitude.

Representativeness of soil sample is thus particularly determining, especially since the soil ingestion is very often an exposure route of concern, especially for children. This representativeness actually depends on: (i) the knowledge of the pattern of concentration values of each pollutant of concern over the study area and (ii) the choice of the concentration value which will best represent the population exposure.

Uncertainty associated with the pollution pattern can be reduced by the use of in situ analyses as well as geostatistical techniques. The representative concentration value is most often determined following the precaution principle i.e. identified to the maximal value. This approach needs to be reviewed in light of foreigner approaches such as the "reasonable maximum value" developed by US-EPA.

At the other end of the exposure chain, the human exposure factors are submitted to space and time variability and their estimates are often obsolete and without local specificity. Updated and more geographically specific data have been identified, but in certain cases, local surveys would be very helpful. Eventually, when going deeper in the exposure mechanism, the report shown the great interest to take into account the bio-accessibility of contaminants in soil and describes the last developments hereof.

If the decision makers do not seem so demanding about the sophistication level of uncertainty handling in the health assessment of contaminated land, the potentially affected population, which are more and more knowledgeable, could expect better attention to this aspect and site owners and health authorities should be better equipped to respond.

ANNEXE :

Tableau 1a: Récapitulation des principales caractéristiques des sources d'incertitudes rencontrées au cours d'une étude sanitaire de Sites et Sols Pollués
(C) : estimation basée sur le calcul – (E) : estimation à dire d'experts

Source d'incertitude	Type d'incertitude	Tendance (1)	Amplitude (indice)	Règles de l'art applicables ou pratiques courantes	Autres moyens de réduction ou traitement
Connaissance des substances d'intérêt	Ignorance	(-)	10 (E)	Guides techniques et méthodologiques	Etude bibliographique
	<i>Observations/justification :</i> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Incertitude porte sur une donnée qualitative (noms des substances ignorées) avant d'être quantitative (concentrations de ces substances), d'où difficile de connaître l'amplitude. ▪ Plus l'historique du site est exhaustif en information, plus l'amplitude potentielle est réduite. 				
Echantillonnage sol	Ignorance	(-)	100 (E) ou 10 (2) (E)	Guides techniques et méthodologiques	Géostatistique appliquée à l'échantillonnage, détermination de la concentration représentative
	<i>Observations/justifications :</i> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Sols pollués : écart entre concentrations prélevées et concentrations extrêmes existantes sur le site peut varier d'un facteur supérieur à 100 pour les ETM et plus pour les organiques non naturellement présents dans sols. ▪ Ecart peut être réduit à 10 si la valeur représentative n'est pas la valeur maximale des concentrations mais un indicateur statistique (P90, etc.). 				
Echantillonnage déchets	Ignorance	(-)	10 (E)	Guides techniques et méthodologiques	Géostatistique appliquée à l'échantillonnage, détermination de la concentration représentative
	<i>Observations/justifications:</i> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Ecart de concentrations en polluants peuvent être importants au sein d'un même matériau et extrêmes d'un matériau à l'autre, en fonction de leurs origines. 				
Echantillonnage eaux de surface	Ignorance	(-)	10 (E)	Normes Guides techniques et méthodologiques	Géostatistique, connaissance du régime hydrologique
	<i>Observations/justifications :</i> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Ecart entre concentrations des prélèvements et extrêmes existants (ou moyennes annuelles) a priori peu importants si règles de l'art respectées la phrase ne va pas. ▪ Empiriquement, indice d'amplitude de 2 attribué aux variations de concentrations dans le courant et de 5 aux variations saisonnières (sauf pour les canaux et cours d'eau régulés). 				
Echantillonnage eaux souterraines	Ignorance	(+/-)	20 (E)	Normes Guides techniques et méthodologiques	Géostatistique, connaissance de l'aquifère et des battements saisonniers
	<i>Observations/justifications :</i> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Ecart entre concentrations dans les prélèvements peuvent être importants si aquifère à faible conductivité hydrique ou discontinu (karst) ou si les polluants ne sont pas miscibles à l'eau (flottants et plongeants). ▪ Les variations saisonnières sont plus limitées mais la montée du niveau de la nappe entraîne la mobilisation de polluants du sol localisés dans la zone habituellement non saturée. ▪ Indice d'amplitude de 10 est attribué aux variations de concentrations dans l'aquifère et de 2 aux variations saisonnières. 				
Echantillonnage plantes potagères	Ignorance	(+/-)	20 (C)	Guides techniques et méthodologiques	Vérifier cohérence concentrations sol/végétal Eviter le chou pour les HAP (accumulation des HAP atmosphériques dans feuilles)
	<i>Observations/justifications :</i> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Pour un polluant de concentration donnée dans le sol, au sein d'une même catégorie de plantes (légumes-feuilles, -racines, -tiges, -fruits au stade consommable (maturation)) les écarts entre concentrations des végétaux de même espèce peuvent varier de 2 à 4 selon la variété. ▪ Au sein de chaque catégorie, les écarts entre différentes espèces peuvent varier de 1 à 10. 				
Echantillonnage air intérieur	Ignorance	(+/-)	10 (E)	Normes Guides techniques et méthodologiques	Multiplication des points de mesures, prise en compte des conditions prévalentes (climat, ventilation, etc.)
	<i>Observations/justifications :</i> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Les écarts entre concentrations dans l'air intérieur du bâtiment testé et des concentrations extrêmes observables dans d'autres bâtiments de même type localisés sur le même site, ne devraient pas dépasser un facteur 5 à 10 si les bonnes pratiques sont appliquées (ventilation minimale, témoin de mesure, méthodes de prélèvement adaptées à la nature des polluants et aux expositions, etc.). 				

- (1) (+) ou (-) : tendance à la surestimation ou à la sous-estimation de l'exposition si l'incertitude n'est pas réduite
(+/-) tendance dans les 2 sens mais surestimation de l'exposition plus fréquemment observée
- (2) 100 si estimation basée sur valeur max, 10 si basée sur indicateur statistique

Tableau 1b: Récapitulation des principales caractéristiques des sources d'incertitudes rencontrées au cours d'une étude sanitaire de Sites et Sols Pollués (suite)

(C) : estimation basée sur le calcul – (E) : estimation à dire d'experts

Source d'incertitude	Type d'incertitude	Tendance (1)	Amplitude (indice)	Règles de l'art applicables ou pratiques courantes	Autres moyens de réduction ou traitement
Echantillonnage gaz du sol	Ignorance	(+/-)	20 (E)	Normes Guides techniques et méthodologiques	Utilisation de chambres de captage
	<i>Observations/justifications :</i> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Ecart entre concentrations mesurées et concentrations existantes dans l'atmosphère du sol varient selon la nature des gaz. ▪ Peu de conséquences pour la détection des gaz (criblage de sources). ▪ Conséquences importantes sur la mesure des flux sol-air, car pompages (piézaires) peuvent mobiliser les composés peu volatils, et donner une fausse image des gaz émis par le sol en conditions naturelles, les conditions du moment (T°, humidité) sont également déterminantes. 				
Mesurages <i>in situ</i>	Erreur	(+/-)	10 (E)	Normes Guides techniques et méthodologiques	-
	<i>Observations/justifications :</i> <ul style="list-style-type: none"> ▪ La précision des mesures <i>in situ</i> est beaucoup moins élevée que celles des analyses de laboratoire : les écarts vont de 5 à 40 % d'après les fabricants mais sont beaucoup plus élevés dans la pratique. ▪ De plus, les conditions prévalentes peuvent influencer significativement sur les résultats. 				
Gestion des échantillons	Erreur	(+/-)	2 (E)	Normes Guides techniques et méthodologiques	-
	<i>Observations/justifications :</i> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Erreurs potentiellement importantes et cumulatives mais fortement réduites par le respect des normes, guides méthodologiques et de bonnes pratiques permettent en principe d'éviter les plus grandes erreurs. ▪ Amplitude a priori comparable à celles des analyses instrumentales (< 50 %). ▪ Valeurs aberrantes très rares mais observables même avec laboratoire accrédité : identifiables par prestataire expérimenté lorsque l'erreur est très grande (par ex. > 100 fois les concentrations courantes), mais détection plus difficile quand on reste dans le même ordre de grandeur, sauf à procéder à des contre-analyses. 				
Choix de méthode de mise en solution des ETM	Ignorance	(+)	3 (C) (Cr et Ni)		Utilisation de la méthode Eau Régale
	<i>Observations/justifications :</i> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Entre échantillons traités par méthode acide fluorhydrique (HF) et la méthode eau régale (ER), les concentrations peuvent varier d'un facteur 2 à 3 selon les sols pour Cr et Ni. ▪ Pour les autres ETM (Cd, Co, Cu, Mn et Zn) : écarts généralement modérés (< 10 %). 				
Analyse instrumentale	Erreur	(+/-)	3 (C)	Normes. Choix de laboratoire accrédité.	-
	<i>Observations/justifications :</i> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Quand le laboratoire suit les bonnes pratiques et normes en vigueur (laboratoire accrédité), l'amplitude des incertitudes (justesse) varie généralement de 15 à 50 % lorsque l'on se situe au-dessus du seuil de quantification. ▪ Plus fortes incertitudes pour substances organiques (chlorophénols, coupes d'hydrocarbures, etc.). 				
Prises en compte des hydrocarbures totaux et fractions	Erreur	(+)	10 (E)	Représentants et substituts proposés par MADEP, TPHCWG, RIVM	Eviter d'utiliser de substituts à VTR avec FI >> 1000 Eviter le double emploi des VTR de HAP
	<i>Observations/justifications :</i> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Méthodes de quantification non normalisées mais techniques de chromatographie PG assez bien maîtrisées, ce qui limite a priori les erreurs. ▪ Utilisation de substances indicatrices ou mélanges substituts généralement peu représentatifs de la toxicité et du comportement des substances dans les milieux. ▪ Les VTR de certains substituts sont élaborées avec des facteurs d'incertitudes très élevés (10.000 !). 				
Masse corporelle	Variabilité	(+/-)	2 (C)	Valeurs standards recommandées par les institutions	Exploitation de données françaises actualisées.
	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Dans la population française : <ul style="list-style-type: none"> ○ adulte : valeur moyenne 61 kg, médiane 64 kg, écart type 22 kg. ○ enfant de 3 ans : valeur moyenne 15,5 kg, médiane 15 kg écart type 2,3 kg ▪ Ces valeurs sont très proches des valeurs recommandées par l'OMS 				

- (1) (+) tendance à la surestimation de l'exposition si l'incertitude n'est pas réduite
(-) tendance à la sous-estimation de l'exposition si l'incertitude n'est pas réduite
(+/-) tendance dans les 2 sens mais surestimation du risque plus fréquemment observée

Tableau 1c: Récapitulation des principales caractéristiques des sources d'incertitudes rencontrées au cours d'une étude sanitaire de Sites et Sols Pollués (suite et fin)
(C) : estimation basée sur le calcul – (E) : estimation à dire d'experts

Source d'incertitude	Type d'incertitude	Tendance (1)	Amplitude (indice)	Règles de l'art applicables ou pratiques courantes	Autres moyens de réduction ou traitement
Débit respiratoire	Variabilité	(+/-)	2 (C)	Valeurs standards recommandées par les institutions	Exploitation de données françaises actualisées.
	<i>Observations/justifications :</i> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Dans la population américaine, valeurs moyennes : <ul style="list-style-type: none"> ○ adulte homme : 15,2 m³/j, adulte femme : 11,3 m³/j - enfant de 1 à 12 ans : 8,7 m³/j 				
Surface corporelle	Variabilité	(+/-)	2 (C)	Valeurs standards recommandées par les institutions	Exploitation de données françaises actualisées.
	<i>Observations/justifications :</i> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Dans la population française : <ul style="list-style-type: none"> ○ population totale : moyenne 1,83 m², P95 : 2,16 m² ○ homme de 30 à 54 ans : moyenne : 1,94 m², P95 : 2,21 m² 				
Fréquence d'exposition	Ignorance	(+/-)	2 (C)	Valeurs standards recommandées par les institutions	Exploitation de données françaises actualisées. Scénarios réalistes
	<i>Observations/justifications :</i> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Non connue, pour la population générale, mais tendance à adopter des valeurs majorantes par défaut (365 J/an). 				
Durée d'exposition	Ignorance	(+/-)	2 (C)	Valeurs standards recommandées par les institutions	Scénarios réalistes
	<i>Observations/justifications :</i> <ul style="list-style-type: none"> ▪ En France (1999), durée moyenne de résidence : 8 ans, médiane : 3 ans, P90 : 33 ans, P95 : 71 ans. ▪ Tendance à adopter des valeurs majorantes par défaut (30 ou 70 ans). 				
Ingestion de terre (enfants et adultes)	Ignorance	(+/-)	5 (E)	Valeurs standards recommandées par les institutions	Exploitation de données actualisées
	<i>Observations/justifications :</i> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Dans une étude américaine sur enfants de moins de 6 ans : <ul style="list-style-type: none"> ○ médiane : 24 mg/j - moyenne : 31 mg/j - P95 : 91 mg/j - maximale : 137 mg/j ▪ Les données pour l'adulte sont mal documentées et peu précises. 				
Consommation eau de boisson	Variabilité	(+/-)	2 (C)	Enquête nationales consommation	-
	<i>Observations/justifications :</i> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Etude INCA2 (2005-2006) dans la population française : consommation moyenne 0,6 l/j, médiane : 0,4 l/j, P95 : 2 l/j et P99 : 3 l/j. ▪ Conforme à la valeur de 2l/j généralement adoptée dans les études. ▪ Valeurs pour les enfants moins étudiées. 				
Consommation des légumes autoproduits	Ignorance	(+)	5 (E)	Enquête nationales consommation	Enquêtes spécifiques. Enquêtes actualisées et proches du site
	<i>Observations/justifications :</i> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Données nationales anciennes et disponibles sous forme de moyennes : ne tiennent pas compte des spécificités locales et de l'évolution des comportements. 				
Biodisponibilité, bioaccessibilité	Ignorance	(+/-)	100 (E)	Valeur de 100 % par défaut	Utilisation de tests in vitro avec sol du site ou par défaut de valeurs validées par US-EPA et autres
	<i>Observations/justifications :</i> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Les valeurs de fraction bioaccessible présentent une grande dispersion, selon les protocoles d'essais et selon les sols (< 1% à > 99 %). ▪ L'harmonisation européenne des protocoles d'essais (projet BARGE) permettra probablement un regroupement des valeurs. 				

- (1) (+) tendance à la surestimation de l'exposition si l'incertitude n'est pas réduite
(-) tendance à la sous-estimation de l'exposition si l'incertitude n'est pas réduite
(+/-) tendance dans les 2 sens mais surestimation du risque plus fréquemment observée