

Lignes directrices sur l'évaluation des teneurs de fond naturelles dans les sols



22 mai 2007

Développement durable,
Environnement
et Parcs

Québec



ÉQUIPE DE RÉALISATION

Auteur :	Hugues Ouellette, chimiste Direction des politiques en milieu terrestre
Collaborateur :	Serge Morissette, chimiste Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec

OUELLETTE, Hugues, 2007. *Lignes directrices sur l'évaluation des teneurs de fond naturelles dans les sols*, Québec, ISBN 978-2-550-49918-3, 22p.

Dépôt légal – Bibliothèque et Archives nationales du Québec, 2007
ISBN 978-2-550-49918-3 (PDF)
© Gouvernement du Québec, 2007

REMERCIEMENTS

Grâce à l'expérience acquise et aux commentaires reçus, le présent document constitue une version actualisée et bonifiée de la version originale mise en ligne en 2004.

La version originale a été commentée par des membres de Réseau environnement, par des personnes du ministère des Ressources naturelles et de la Faune, de l'Institut de recherche et de développement en agroenvironnement ainsi que de la Direction générale de l'analyse et de l'expertise régionale et des études économiques, du Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec et du Service des lieux contaminés du ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec. Nous remercions toutes ces personnes pour leur précieuse contribution.

RÉSUMÉ

Le document présente des approches acceptables pour évaluer correctement les teneurs de fond naturelles dans les sols d'un terrain potentiellement contaminé en vue de l'application du Règlement sur la protection et la réhabilitation des terrains et de la Politique de protection des sols et de réhabilitation des terrains contaminés.

TABLE DES MATIÈRES

Liste des tableaux.....	VI
Liste des figures	VI
1. MISE EN CONTEXTE	7
2. APPROCHES ACCEPTABLES	8
2.1 Historique.....	8
2.2 Obtention des données.....	8
2.2.1 Études et recherches existantes.....	8
2.2.2 Prélèvement d'échantillons témoins	9
2.3 Calculs statistiques	11
2.3.1 Nombre de données	11
2.3.2 Évaluation de la teneur de fond	11
3. LE RAPPORT	12
4. EXEMPLES.....	13
4.1 Exemple n° 1.....	13
4.2 Exemple n° 2.....	13
4.3 Exemple n° 3.....	13
5. GLOSSAIRE	20
6. BIBLIOGRAPHIE.....	21

LISTE DES TABLEAUX

<i>Tableau 1</i>	Coefficients « a »	15
<i>Tableau 2</i>	Quantiles de normalité	17
<i>Tableau 3</i>	Valeurs des « K »	18

LISTE DES FIGURES

<i>Figure 1</i>	Distribution des fréquences.....	14
-----------------	----------------------------------	----

1. MISE EN CONTEXTE

L'objectif du présent document consiste à établir des approches acceptables pour évaluer correctement, la teneur de fond naturelle dans les sols d'un terrain potentiellement contaminé, en vue principalement de l'application de l'article 1 du Règlement sur la protection et la réhabilitation des terrains (RPRT) qui mentionne ce qui suit :

En outre, lorsqu'un contaminant mentionné dans la partie I (métaux et métalloïdes) de l'annexe I ou II est présent dans un terrain en concentration supérieure à la valeur limite fixée à cette annexe et qu'il n'origine pas d'une activité humaine, cette concentration constitue, pour les fins des articles 31.51, 31.52, 31.54, 31.55, 31.57, 31.58 et 31.59 de la Loi sur la qualité de l'environnement, la valeur limite applicable pour ce contaminant.

Le tableau 1 de l'annexe 2 de la Politique de protection des sols et de réhabilitation des terrains contaminés (la Politique) indique également :

Pour les métaux ou les métalloïdes, il peut arriver que la teneur de fond naturelle d'un sol excède le critère générique utilisé. Cette teneur de fond, en autant qu'elle est adéquatement évaluée et documentée, se substituera au critère générique pour l'évaluation de la contamination à moins qu'un impact manifeste ou un risque pour la santé ne soit constaté.

Ce document est donc un outil servant à aider à différencier les concentrations de métaux ou de métalloïdes que l'on trouve naturellement dans le sol de celles provenant d'une activité humaine.

Le ministère des Ressources naturelles et de la Faune (MRNF) a calculé des distributions de teneurs en métaux et en métalloïdes pour cinq provinces géologiques du Québec. Dans la Politique, les critères A pour les métaux et les métalloïdes dans les sols correspondent à une valeur située entre le 90^e et le 98^e centile des distributions calculées par le MRNF pour chaque province géologique.

Ce travail constitue une première étape qui peut être raffinée afin de mieux représenter la distribution locale des métaux et des métalloïdes dans les sols. Les teneurs de fond naturelles des métaux et des métalloïdes dans les sols dépendent de la composition du matériel géologique qui leur a donné naissance ainsi que des facteurs qui ont joué un rôle lors de leur formation.

Cependant, l'évaluation du risque que représente une concentration donnée dans le sol pour la santé humaine ou l'environnement ne fait pas partie des objectifs visés ici. Ces questions sont abordées dans la Procédure d'évaluation du risque écotoxicologique pour la réhabilitation des terrains contaminés et dans les Lignes directrices pour la réalisation des évaluations du risque toxicologique pour la santé humaine dans le cadre de la Procédure d'évaluation et d'examen des impacts sur l'environnement et l'examen des projets de réhabilitation de terrains contaminés.

Autrement dit, il n'y a pas d'hypothèse sur la toxicité potentielle des teneurs mesurées en application de ce document. Les teneurs mesurées décrivent seulement celles qui ont été trouvées dans le ou les terrains échantillonnés. Pour ces raisons, la valeur utilisée pour évaluer le risque, dans le cadre de l'application de la procédure ou des lignes directrices susmentionnées, peut être différente de la valeur choisie en application de ce document.

2. APPROCHES ACCEPTABLES

Quelle que soit la méthodologie utilisée, l'échantillonnage doit permettre d'obtenir des mesures représentatives des teneurs naturelles des dépôts meubles naturels en place. Si le terrain potentiellement contaminé ou les lieux témoins contiennent des remblais, ce ne sont pas les concentrations des matériaux de remblayage qui servent à évaluer la teneur de fond naturelle dans les sols. De même, les concentrations dans l'assise rocheuse ne sont pas celles recherchées dans le présent document.

2.1 Historique

À l'instar de la démarche décrite dans le Guide de caractérisation des terrains, la première étape consiste à faire une revue de l'information existante ainsi qu'à établir l'historique du terrain potentiellement contaminé et des activités qui y ont eu lieu. De plus, si des activités réalisées dans la localité ou la région sont susceptibles de contribuer à la présence de métaux ou de métalloïdes mesurés dans le sol, elles doivent être déterminées.

- Si la qualité et la quantité des renseignements historiques sont suffisantes pour statuer sur l'absence dans les sols de métaux ou de métalloïdes provenant d'une activité humaine, les analyses des sols et les calculs décrits aux sections 2.2 et 2.3 de ce document ne devraient pas être requis.
- Une conclusion similaire pourrait être tirée si des activités humaines se sont déroulées, mais qu'il n'y a pas de lien entre ces activités et les métaux ou les métalloïdes mesurés dans le sol. Dans ce dernier cas, une expertise supplémentaire (examen au microscope, diffraction aux rayons X) pourrait être requise en vue de s'assurer que les formes des métaux ou des métalloïdes présents sont bien d'origine naturelle.
- Si la personne qui effectue l'historique soupçonne que des métaux ou des métalloïdes présents dans les sols proviennent d'une activité humaine ou si l'historique révèle qu'il y a eu des activités susceptibles de contaminer les sols avec des métaux ou des métalloïdes, dans le contexte décrit à la section 1 de ce document, des analyses des sols sont requises afin d'aider à différencier les concentrations naturelles de ces métaux ou de ces métalloïdes de celles provenant d'une activité humaine.

2.2 Obtention des données

2.2.1 Études et recherches existantes

La première possibilité à envisager consiste à utiliser des données déjà publiées dans le cadre de recherches sérieuses effectuées par des organismes reconnus. Lors de la sélection des données, on tiendra compte du matériel géologique parental et de la genèse des sols par rapport aux sols du terrain potentiellement contaminé. L'objectif est de comparer des sols appartenant le plus possible à la même couche que les sols du terrain potentiellement contaminé.

À titre d'exemples, le ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation (Giroux et al. 1992) a publié une étude sur les teneurs en métaux lourds dans les sols du Québec. L'Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA) possède des cartes pédologiques, des rapports ainsi que des bases de données sur les sols situés en surface.

Le MRNF (Choinière et Beaumier 1997) a produit un document portant sur les teneurs de fond dans différentes provinces géologiques du Québec. Outre ce document, on peut consulter au MRNF des

rapports géochimiques (horizon B, échantillons de till et de sédiments de ruisseaux et de lacs) et des cartes illustrant des résultats d'analyses.

La Commission géologique du Canada dispose également de cartes et de données qui peuvent être utiles à la réalisation d'une étude sur les teneurs de fond dans les sols.

Les données choisies doivent être celles qui sont les moins susceptibles d'avoir été influencées par une activité humaine. On pourra vérifier les dates de prélèvement par rapport à l'historique des activités humaines du secteur.

Si cette approche est retenue, il faudra aussi tenir compte, lors de l'interprétation des données, des différences de méthodologies pour le prélèvement, le milieu échantillonné, la préparation et l'analyse par rapport à celles du ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs.

2.2.2 Prélèvement d'échantillons témoins

À la section 2.3.1.4, le Guide de caractérisation des terrains propose déjà une démarche générale de prélèvement d'échantillons témoins locaux ou régionaux, leur différenciation étant basée sur la proximité par rapport au terrain potentiellement contaminé. Même si l'objectif de ce guide est d'obtenir une valeur de référence plutôt qu'une teneur de fond, la démarche proposée peut être adaptée.

Ainsi, une seconde possibilité consiste à prélever des échantillons témoins de sols afin d'aider à établir si la présence de la contamination dans les sols est liée à une source anthropique ou si des concentrations élevées sont présentes de façon naturelle.

Les échantillons témoins peuvent être prélevés dans un ou plusieurs lieux adjacents ou très rapprochés du terrain potentiellement contaminé. L'emplacement du ou des lieux dépend notamment du matériel géologique parental et de la genèse des sols par rapport aux sols du terrain potentiellement contaminé. Les données choisies proviendront de sols appartenant à la même couche que le sol du terrain potentiellement contaminé. On n'échantillonne pas à des profondeurs prédéterminées, mais plutôt en suivant les couches des sols. Le prélèvement des échantillons témoins est réalisé le plus près possible du terrain potentiellement contaminé, mais à des endroits non influencés par ce dernier. Ces endroits doivent être les moins susceptibles d'avoir été contaminés par une activité humaine. Les forêts et les parcs boisés peuvent être adéquats. Les endroits choisis sont situés préférablement en amont du terrain potentiellement contaminé par rapport aux vents dominants, au sens d'écoulement des eaux et à la topographie du terrain. Les méthodes de préparation des échantillons et d'analyse chimique sont les mêmes que pour le terrain potentiellement contaminé. Afin de ne pas comptabiliser les apports provenant de sources diffuses d'origine anthropique (par exemple la contamination aérotransportée), on évitera de prélever les premiers centimètres des sols en surface.

Si le terrain potentiellement contaminé a été perturbé, il peut être difficile d'apparenter des couches avec celles du lieu de prélèvement des échantillons témoins. Pour pallier cette difficulté, de l'information pourra être obtenue sur la stratification originale du terrain potentiellement contaminé en consultant les études géotechniques réalisées lors de la construction des bâtiments, ou encore il est possible de se référer à des échantillonnages antérieurs aux activités humaines.

Il est aussi possible de prélever des échantillons témoins sur le terrain potentiellement contaminé. Par exemple, les échantillons témoins peuvent provenir d'une parcelle non perturbée et répondant aux conditions énumérées précédemment.

Bien que ce ne soit pas prévu dans le Guide de caractérisation des terrains, il est aussi possible de comparer les teneurs dans la couche à l'étude avec celles de la couche située immédiatement dessous. Des teneurs décroissantes selon la profondeur indiquent un apport plus récent de matériaux présentant des concentrations plus élevées. Cet apport peut être le résultat d'une activité humaine, même si ce n'est pas nécessairement le cas. Des teneurs constantes ou croissantes selon la

profondeur indiquent possiblement une origine naturelle. Lors de l'interprétation des données, il faut notamment tenir compte des mécanismes de dispersion des dépôts. La couche inférieure peut servir d'indice d'accumulation lorsqu'il y a uniformité du dépôt. Une autre difficulté lors de l'interprétation des données peut provenir de la migration des contaminants vers la couche inférieure. Il est possible de pallier à cette difficulté en évitant de prélever les premiers centimètres de sols dans la couche inférieure. Les couches ainsi comparées doivent être semblables notamment en termes de texture, car les concentrations naturelles en métaux peuvent varier d'une couche à l'autre. L'échantillonnage des témoins doit être réalisé en respectant les couches et non pas en prélevant les échantillons par tranches d'une épaisseur prédéfinie et s'étendant sur plus d'une couche. Les méthodes de prélèvement, de préparation et d'analyse des échantillons sont uniformes d'une couche à l'autre. Ces méthodes seront décrites dans le rapport prévu à la section 3.

Quel que soit le lieu de prélèvement des échantillons témoins, ceux choisis doivent être les moins susceptibles d'avoir été influencés par une activité humaine. Dans le doute, on devra démontrer l'absence de cette influence. Par exemple, il est possible de vérifier la présence de matériaux exogènes par un examen au microscope optique de certains échantillons de sols. Des analyses complémentaires au microscope électronique ou par diffraction aux rayons X peuvent aussi être utiles pour identifier des formes de métaux naturelles ou anthropiques.

Lorsque c'est possible, il est recommandé de prélever les échantillons dans des tranchées afin de faciliter l'identification des différentes couches.

La localisation des forages ou tranchées doit être aléatoire de façon à pouvoir réaliser subséquemment un traitement statistique des résultats.

En conformité avec le Guide de caractérisation des terrains, à l'intérieur d'un même forage ou d'une même tranchée, on recommande de prélever d'abord un échantillon dans chaque couche rencontrée.

Aux fins de l'application de ce document, la couche qui est ensuite choisie est celle qui est la plus représentative du terrain potentiellement contaminé et du ou des lieux témoins. Autrement dit, la couche choisie définit la population que l'on désire échantillonner et toutes les données doivent provenir de cette même population.

Tout en demeurant dans un même forage ou une même tranchée, l'échantillon peut être composé, c'est-à-dire formé de plusieurs sous échantillons combinés et représentatifs d'une même couche. Il est recommandé de conserver une partie des sous échantillons au cas où leur analyse serait requise ultérieurement. Dans une même couche du même forage ou de la même tranchée, la teneur obtenue correspond alors à celle de l'échantillon composé ou à la moyenne des sous échantillons.

Afin d'obtenir une meilleure représentativité, on peut récupérer les sous échantillons prélevés dans la même couche et le même forage ou la même tranchée dans un contenant, les mélanger et les homogénéiser, avant de prélever un échantillon devant être analysé.

Pour plus de détails sur les protocoles de prélèvement des sols, le lecteur pourra consulter les cahiers 1 (généralités) et 5 (sols) du Guide d'échantillonnage à des fins d'analyse environnementale.

Les méthodes d'analyses recommandées pour les sols ainsi que la liste des laboratoires accrédités pour ces analyses apparaissent sur le site Internet du Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec (CEAEQ), accessible à partir du site du ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs (www.mddep.gouv.qc.ca).

2.3 Calculs statistiques

2.3.1 Nombre de données

Il faut que le nombre de données publiées ou d'échantillons témoins prélevés soit suffisamment élevé pour s'assurer que la distribution des valeurs des échantillons est applicable au terrain potentiellement contaminé. On cherche à établir une distribution de données sur des sols issus de la même couche. Le nombre de forages ou de sondages dépend évidemment de la superficie du ou des terrains. La précision augmente en fonction de la taille de l'échantillon; il est préférable de procéder à un échantillonnage plus exhaustif que de limiter l'échantillonnage. Le MDDEP demande un minimum d'environ trente échantillons, étant donné que ce nombre peut être à la base de l'hypothèse d'une distribution normale et qu'à partir de cette taille on a une assez bonne idée de la valeur de l'écart type de la population.

2.3.2 Évaluation de la teneur de fond

À des fins de calcul statistique, dans le cas où le résultat de l'analyse chimique d'un paramètre est inférieur à la limite de détection de la méthode, le résultat considéré est égal à la moitié de la limite de détection. La limite de détection de la méthode est fournie par le laboratoire qui effectue l'analyse. Pour tous les échantillons témoins prélevés, il s'agit d'un laboratoire accrédité par le CEAEQ pour les analyses des sols. La limite de détection dépend du type d'instrumentation ou de la méthode analytique utilisée, et l'opinion du CEAEQ pourra être sollicitée pour l'évaluer. Cette limite doit être suffisamment basse pour permettre l'obtention d'une courbe de distribution et vérifier le respect des valeurs limites réglementaires.

Une première étape consiste à illustrer sur un graphique la distribution des données afin de pouvoir en faire une évaluation visuelle.

Il s'agit ensuite de calculer des paramètres statistiques appropriés (moyenne, écart type, centiles, etc.) à partir des données obtenues.

Il faut également vérifier s'il y a de grands écarts dans les mesures des concentrations. Dans ce cas, il s'agit de déterminer certaines données qui diffèrent sensiblement des autres et qui peuvent avoir un effet disproportionné sur l'évaluation de la teneur de fond. Lorsqu'un test statistique permet de détecter de telles données, il faut s'interroger sur les causes. Par exemple, il peut s'agir d'une erreur dans la saisie de données ou d'une erreur analytique. Dans ces cas, il est possible de corriger les données. En revanche, s'il s'agit d'une erreur d'échantillonnage (l'échantillon ne provient pas de la même population que les autres), les données soulevant un doute doivent être retirées.

L'objectif est d'établir une limite au-delà de laquelle les concentrations dans les sols sont considérées comme étant plutôt d'origine anthropique que naturelle.

Le seuil choisi dépend des valeurs des paramètres de la distribution des données.

Lorsque la distribution des données s'ajuste à une loi normale ou à un log normal, la teneur de fond reconnue dans les sols est basée sur le calcul d'un intervalle de tolérance fournissant une limite qui contient une proportion de la population. Si la distribution des données ne s'ajuste pas à une loi normale ou à un log normal, nous recommandons de consulter le MDDEP et d'avoir recours à l'expertise d'un statisticien.

3. LE RAPPORT

Le document mettra en perspective les résultats et interprétations en fonction de la géologie locale et régionale, de la pédologie locale et régionale ainsi que des activités s'étant déroulées sur le terrain potentiellement contaminé. L'expertise d'une personne possédant de solides connaissances en géologie, ou en pédologie dans le cas de sols de surface, est nécessaire pour réaliser cette mise en contexte.

Lorsque c'est requis suite à l'historique du terrain potentiellement contaminé, des plans et coupes des forages ou des tranchées localisant les points de prélèvement et illustrant la géologie ou la pédologie locale ou régionale devront être joints au rapport afin d'appuyer la procédure choisie. Les méthodes de prélèvement, de préparation et d'analyse des échantillons seront décrites. Lors de l'interprétation, la variabilité des résultats causée par le protocole analytique ou par les micro-hétérogénéités naturelles du sol sera considérée. Les profils détaillés des sols échantillonnés et les certificats d'analyse seront également fournis.

Le rapport de caractérisation, les valeurs colligées dans la littérature ou dans des banques de données, les calculs détaillés ayant servi à la détermination des teneurs de fond ainsi que leur justification approfondie doivent être fournis à la direction régionale concernée, qui les transmettra au Service des lieux contaminés du ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs.

4. EXEMPLES

4.1 Exemple n° 1

Un consultant reçoit le mandat de rassembler les renseignements disponibles afin d'établir l'historique d'un terrain et d'évaluer s'il y a eu des activités susceptibles de le contaminer.

En se basant sur les prescriptions du Guide de caractérisation des terrains, les informations ou les documents suivants sont notamment étudiés : les informations inscrites au registre foncier, les photographies aériennes, les cartes topographiques, les plans du terrain ainsi que le répertoire des terrains contaminés.

Ces informations montrent que le terrain a toujours été un boisé. De plus, les activités réalisées dans la région ne sont pas susceptibles de contribuer à la présence de métaux ou de métalloïdes dans le sol. Le consultant juge que la qualité et la quantité des renseignements historiques sont suffisantes pour statuer sur l'absence, dans les sols de ce terrain, de métaux ou de métalloïdes provenant d'une activité humaine. La conclusion est donc que le contenu des sols du terrain est d'origine naturelle.

4.2 Exemple n° 2

Un consultant effectue une revue historique d'un terrain potentiellement contaminé conformément au Guide de caractérisation des terrains. Les informations colligées montrent que le terrain a servi à exploiter une station-service, un dépanneur et un atelier d'entretien mécanique.

Des analyses subséquentes des sols montrent des concentrations élevées en benzène et en hydrocarbures pétroliers de C₁₀ à C₅₀. Certains échantillons de sols contiennent aussi des teneurs en métal X qui excèdent le critère industriel.

Cependant, d'une part, il n'y a pas de lien évident entre la présence du métal X dans le sol et l'exploitation de la station-service et de l'atelier d'entretien mécanique. D'autre part, le terrain est situé dans une région où l'on soupçonne que les teneurs naturelles en métal X dans les sols puissent être plus élevées qu'à l'habitude.

Les quelques échantillons de sols dont les concentrations en métal X excèdent les critères industriels sont examinés au microscope et subissent une diffraction aux rayons X. Le résultat de ces expertises est que la forme du métal X est associée à un dépôt naturel ubiquiste dans la région. La conclusion est donc que le contenu des sols du terrain est d'origine naturelle.

4.3 Exemple n° 3

Un consultant réalise une revue historique d'un terrain potentiellement contaminé conformément au Guide de caractérisation des terrains. Il retrace des activités industrielles de placage d'un métal X. Des analyses des sols montrent des concentrations variables du métal X et de nombreux échantillons sont contaminés au-dessus du critère industriel.

Cependant, ce terrain est situé dans une région où l'on soupçonne que les teneurs naturelles en métal X dans les sols puissent être plus élevées qu'à l'habitude. On désire donc obtenir des analyses supplémentaires des sols pour aider à différencier les concentrations naturelles des concentrations anthropiques de ce métal.

En respectant les prescriptions de la section 2.2.2 de ce document, on obtient les concentrations suivantes dans des échantillons témoins prélevés dans un parc boisé situé à proximité du terrain contaminé (les données utilisées dans cet exemple proviennent d'un cas réel) :

607, 688, 533, 720, 438, 649, 583, 549, 645, 543, 569, 453, 636, 597, 387, 445, 824, 454, 701, 762, 869, 541, 528, 377, 713, 381, 579, 660, 638, 455, 664, 703, 457, 476, 626 (ppm, matière sèche).

Étape 1 Traçage d'un graphique et calcul des paramètres statistiques

Pour mieux visualiser les données, il s'agit d'abord de tracer un graphique de la distribution des fréquences des concentrations dans les sols.

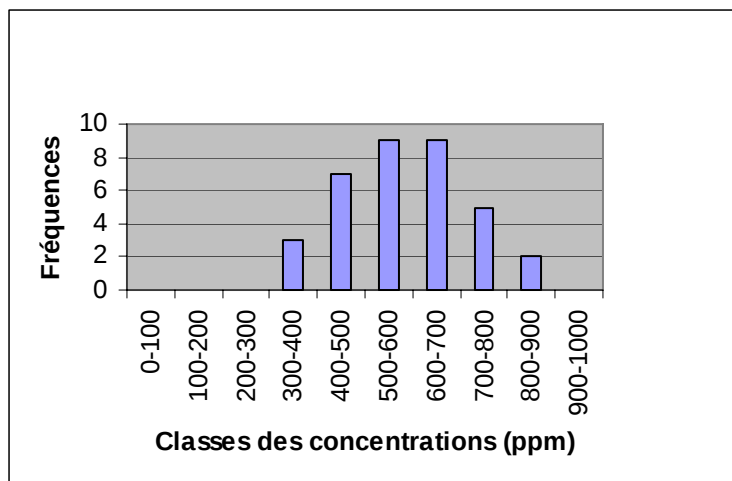


Figure 1 Distribution des fréquences

Les paramètres suivants sont calculés :

nombre de données (n) = 35
 moyenne arithmétique (moy) = 584
 écart type de l'échantillon (S) = 124
 50^e centile = 583
 75^e centile = 662
 90^e centile = 717
 98^e centile = 838
 maximum = 869

Étape 2 Vérifier si les concentrations sont normalement distribuées

Les formules utilisées aux étapes 3 et 4 sont valables lorsque les données sont normalement distribuées (distribution normale ou log normal). Il existe plusieurs façons de vérifier si les données sont normalement distribuées. Dans cet exemple, nous utiliserons le test de normalité de Shapiro et Wilk qui s'applique si $n < 50$.

Il faut d'abord classer les données par ordre croissant :

377, 381, 387, 438, 445, 453, 454, 455, 457, 476, 528, 533, 541, 543, 549, 569, 579, 583, 597, 607, 626, 636, 638, 645, 649, 660, 664, 688, 701, 703, 713, 720, 762, 824, 869.

Il faut ensuite calculer les écarts entre la dernière et la première valeur, entre l'avant-dernière et la deuxième et ainsi de suite.

$$869 - 377 = 492 = d_1$$

$$824 - 381 = 443 = d_2$$

$$762 - 387 = 375 = d_3$$

...

Il faut ensuite calculer « b », qui correspond à la sommation des multiples de « d » par les coefficients « a ». Les coefficients « a » sont fournis dans le tableau suivant pour un nombre de données « n ».

$$b = \sum a_i d_i = a_1 d_1 + a_2 d_2 + a_3 d_3 + \dots$$

Dans notre exemple :

$$a_1 d_1 = 0,4096 \times 492 = 201$$

$$a_2 d_2 = 0,2834 \times 443 = 126$$

$$a_3 d_3 = 0,2427 \times 375 = 91$$

...

$$b = 201 + 126 + 91 + \dots$$

$$b = 715$$

Tableau 1 Coefficients « a »

i \ n	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
1	0,4254	0,4220	0,4188	0,4156	0,4127	0,4096	0,4068	0,4040	0,4015	0,3989	0,3964
2	0,2944	0,2921	0,2898	0,2876	0,2854	0,2834	0,2813	0,2794	0,2774	0,2755	0,2737
3	0,2487	0,2475	0,2462	0,2451	0,2439	0,2427	0,2415	0,2403	0,2391	0,2380	0,2368
4	0,2148	0,2145	0,2141	0,2137	0,2132	0,2127	0,2121	0,2116	0,2110	0,2104	0,2098
5	0,1870	0,1874	0,1878	0,1880	0,1882	0,1883	0,1883	0,1883	0,1881	0,1880	0,1878
6	0,1630	0,1641	0,1651	0,1660	0,1667	0,1673	0,1678	0,1683	0,1686	0,1689	0,1691
7	0,1415	0,1433	0,1449	0,1463	0,1475	0,1487	0,1496	0,1505	0,1513	0,1520	0,1526
8	0,1219	0,1243	0,1265	0,1284	0,1301	0,1317	0,1331	0,1344	0,1356	0,1366	0,1376
9	0,1036	0,1066	0,1093	0,1116	0,1140	0,1160	0,1179	0,1196	0,1211	0,1225	0,1237
10	0,0862	0,0899	0,0931	0,0961	0,0988	0,1013	0,1036	0,1056	0,1075	0,1092	0,1108
11	0,0697	0,0739	0,0777	0,0812	0,0844	0,0873	0,0900	0,0924	0,0947	0,0967	0,0986
12	0,0537	0,0585	0,0629	0,0669	0,0706	0,0739	0,0770	0,0798	0,0824	0,0848	0,0870
13	0,0381	0,0435	0,0485	0,0530	0,0572	0,0610	0,0645	0,0677	0,0706	0,0733	0,0759
14	0,0227	0,0289	0,0344	0,0395	0,0441	0,0484	0,0523	0,0559	0,0592	0,0622	0,0651
15	0,0076	0,0144	0,0260	0,0262	0,0314	0,0361	0,0404	0,0444	0,0481	0,0515	0,0546
16		0,0000	0,0068	0,0131	0,0187	0,0239	0,0287	0,0331	0,0372	0,0409	0,0444
17				0,0000	0,0062	0,0119	0,0172	0,0220	0,0264	0,0305	0,0343
18						0,0000	0,0057	0,0110	0,0158	0,0203	0,0244
19								0,0000	0,0053	0,0101	0,0146
20										0,0000	0,0049

Tableau 1 (suite)

i \ n	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
1	0,3940	0,3917	0,3894	0,3872	0,3850	0,3830	0,3808	0,3789	0,3770	0,3751
2	0,2719	0,2701	0,2684	0,2667	0,2651	0,2635	0,2620	0,2604	0,2589	0,2574
3	0,2357	0,2345	0,2334	0,2323	0,2313	0,2302	0,2291	0,2281	0,2271	0,2260
4	0,2091	0,2085	0,2078	0,2072	0,2065	0,2058	0,2052	0,2045	0,2038	0,2032
5	0,1876	0,1874	0,1871	0,1868	0,1865	0,1862	0,1859	0,1855	0,1851	0,1847
6	0,1693	0,1694	0,1695	0,1695	0,1695	0,1695	0,1695	0,1693	0,1692	0,1691
7	0,1531	0,1535	0,1539	0,1542	0,1545	0,1548	0,1550	0,1551	0,1553	0,1554
8	0,1384	0,1392	0,1398	0,1405	0,1410	0,1415	0,1420	0,1423	0,1427	0,1430
9	0,1249	0,1259	0,1269	0,1278	0,1286	0,1293	0,1300	0,1306	0,1312	0,1317
10	0,1123	0,1136	0,1149	0,1160	0,1170	0,1180	0,1189	0,1197	0,1205	0,1212
11	0,1004	0,1020	0,1035	0,1049	0,1062	0,1073	0,1085	0,1095	0,1105	0,1113
12	0,0891	0,0909	0,0927	0,0943	0,0959	0,0972	0,0986	0,0998	0,1010	0,1020
13	0,0782	0,0804	0,0824	0,0842	0,0860	0,0876	0,0892	0,0906	0,0919	0,0932
14	0,0677	0,0701	0,0724	0,0745	0,0765	0,0783	0,0801	0,0817	0,0832	0,0846
15	0,0575	0,0602	0,0628	0,0651	0,0673	0,0694	0,0713	0,0731	0,0748	0,0764
16	0,0476	0,0506	0,0534	0,0560	0,0584	0,0607	0,0628	0,0648	0,0667	0,0685
17	0,0379	0,0411	0,0442	0,0471	0,0497	0,0522	0,0546	0,0568	0,0588	0,0608
18	0,0283	0,0318	0,0352	0,0383	0,0412	0,0439	0,0465	0,0489	0,0511	0,0532
19	0,0188	0,0227	0,0263	0,0296	0,0328	0,0357	0,0385	0,0411	0,0436	0,0459
20	0,0094	0,0136	0,0175	0,0211	0,0245	0,0277	0,0307	0,0335	0,0361	0,0386
21	0,0000	0,0045	0,0087	0,0126	0,0163	0,0197	0,0229	0,0259	0,0288	0,0314
22			0,0000	0,0042	0,0081	0,0118	0,0153	0,0185	0,0215	0,0244
23					0,0000	0,0039	0,0076	0,0111	0,0143	0,0174
24							0,0000	0,0037	0,0071	0,0104
25									0,0000	0,0035

Il faut ensuite calculer « W », qui est le quantile de normalité du test de Shapiro et Wilk:

$$W = b^2 / (S^2 \times (n - 1))$$

Rappelons que « n » et « S » ont été calculés à l'étape 1.

Dans notre exemple :

$$W = 715^2 / (124^2 \times (35 - 1)) = 0,978$$

Il faut finalement comparer le « W » calculé au « W » fourni dans le tableau suivant pour « n » données et pour un niveau de confiance de 95 %.

Tableau 2 Quantiles de normalité

n	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
W	0,927	0,929	0,930	0,931	0,933	0,934	0,935	0,936	0,938	0,939	0,940

n	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
W	0,941	0,942	0,943	0,944	0,945	0,945	0,946	0,947	0,947	0,947

Dans notre exemple, le « W » calculé (0,978) est supérieur au « W » du tableau (0,934), la normalité est acceptée pour un niveau de confiance de 95 %.

Si le « W » calculé avait été inférieur au « W » du tableau, les concentrations étudiées n'auraient pas été normalement distribuées. Cela aurait fait en sorte que les équations utilisées aux étapes 3 et 4 n'auraient pas été directement applicables.

Étape 3 Vérifier s'il y a une ou des données qui diffèrent sensiblement des autres

Dans cet exemple, nous appliquerons l'une des méthodes proposées dans le document *Standard Practice for Dealing with Outlying Observations* publié par l'American Society for Testing and Materials (ASTM).

L'équation est la suivante et s'applique seulement aux distributions normales ou aux logs normaux. Dans le cas contraire, nous recommandons de recourir à l'expertise d'un statisticien pour vérifier si une ou des données diffèrent significativement des autres.

$$T_{\max} = (X_{\max} - \text{moy}) / S$$

où

$X_{\max}$ = la valeur douteuse qui correspond généralement à la valeur maximale de la distribution des données (voir l'étape 1);

moy = moyenne arithmétique (voir l'étape 1);

S = écart type de l'échantillon (voir l'étape 1).

Dans notre exemple :

$$T_{\max} = (869-584)/124 = 2,3$$

Tmax est ensuite comparée à une valeur Tcritique fournie dans le tableau 1 de la norme ASTM pour un niveau de confiance de 95 %. Pour 35 données, Tcritique = 2,8.

Tmax < Tcritique, la valeur maximale de 869 n'est donc pas considérée comme sensiblement différente des autres.

Dans le cas inverse, il y aurait eu une ou des données qui diffèrent sensiblement des autres. S'il s'agit d'une erreur dans la saisie des données ou d'une erreur analytique, il aurait été possible de corriger les données. En revanche, il aurait fallu exclure les données différentes si ces données étaient provenues d'une erreur d'échantillonnage (les données proviennent d'échantillons prélevés dans une couche différente des autres ou des échantillons sont influencés par une contamination anthropique).

En parallèle avec l'approche statistique décrite ci-dessus, il est aussi possible de vérifier la présence de matériaux exogènes indicateurs d'une contamination anthropique par un examen au microscope ou par diffractions aux rayons X de certains échantillons de sols dont les concentrations diffèrent des autres. Encore ici, l'étape 1 aurait dû être refaite en excluant les échantillons influencés par une contamination anthropique, le cas échéant.

Étape 4 Évaluation de la teneur de fond

Le seuil choisi dépend des valeurs des paramètres de la distribution des données. La teneur de fond reconnue dans les sols est généralement basée sur le calcul d'un intervalle de tolérance fournissant une limite qui contient une proportion de la population dont le niveau de confiance est connu.

$$L = \text{moy} + KS$$

où

L = intervalle de tolérance

moy = moyenne arithmétique

S = écart type de l'échantillon

Les valeurs de « K » sont fournies dans le tableau ci-dessous pour différents centiles et nombres de données. Ces valeurs de « K » sont tirées de tableaux et d'équations publiés par Link ou Hahn et elles sont valables pour une distribution normale ou un log normal.

Il existe une valeur de « K » exacte pour chaque combinaison de nombre de données et de centile. Cependant, pour faciliter l'application, les valeurs de « K » ont été arrondies à la première décimale.

Les valeurs de « K » de la liste suivante servent à calculer un intervalle unilatéral de tolérance supérieure fournissant une limite qui contiendra un centile de la population dont le niveau de confiance est de 95 %. Le centile choisi augmente en fonction du nombre de données et de la précision de l'échantillonnage.

Tableau 3 Valeurs des « K »

Nombres de données	Centiles	Valeurs de K
30 à 37	70	0,9
38 à 51	75	1,0
52 à 60	80	1,1
61 à 70	85	1.3

71 à 80	90	1.6
81 à 90	95	2,0
91 et plus	98	2,4

Dans notre exemple (voir l'étape 1) :

$n = 35$

moy = 584

$S = 124$

Selon le tableau plus haut :

$K = 0,9$

L'intervalle de tolérance fournissant une limite qui contient le 70^e centile dont le niveau de confiance est de 95 % est :

$L = \text{moy} + KS = 696 \text{ ppm}$

Cette valeur correspond à la teneur de fond dans le présent exemple. Les concentrations en excès de cette teneur sont considérées comme étant plutôt d'origine anthropique que naturelle.

5. GLOSSAIRE

Centile : Chacune des valeurs qui partagent un ensemble statistique ordonné en cent parties d'effectif égal.

Couche : Dans ce document, le terme *couche* se définit comme une étendue plus ou moins parallèle à la surface et que l'on peut distinguer dans un sol. Une couche de sol se distingue d'une autre par ses propriétés différentes, telles que ses constituants, sa composition, son organisation, sa texture, sa structure, sa consistance et sa couleur.

Écart type de l'échantillon : Mesure de la dispersion d'une série d'observations statistiques par rapport à leur moyenne, qui s'obtient en extrayant la racine carrée de la variance.

Intervalle de tolérance supérieure : Intervalle fournissant une limite qui contient une proportion spécifiée de la population pour un certain niveau de confiance.

Moyenne arithmétique : Valeur variable correspondant à la somme de n termes d'une série statistique divisée par leur nombre n .

Population : Ensemble d'unités statistiques de même nature, constituant la collectivité à laquelle on s'intéresse.

6. BIBLIOGRAPHIE

ASTM E 178-94 1994. *Standard practice for dealing with outlying observations*, Philadelphie, American Society for Testing and Materials, 17 p.

BAIZE, D., 1997. *Teneurs totales en éléments traces métalliques dans les sols*, Paris, INRA, 395 p. et 3 annexes.

BOUROUBA, M. S., 1999. « Aide mémoire pratique de statistiques appliquées à la médecine et à la biologie » dans le site *Le guide de la médecine et de la santé en Algérie*, [En ligne]. <http://www.santemaghreb.com> (page consultée le 1^{er} septembre 2006).

CENTRE D'EXPERTISE EN ANALYSE ENVIRONNEMENTALE DU QUÉBEC, 1998. *Procédure d'évaluation du risque écotoxicologique pour la réhabilitation des terrains contaminés*, Québec, ministère de l'Environnement et de la Faune, 139 p.

CENTRE D'EXPERTISE EN ANALYSE ENVIRONNEMENTALE DU QUÉBEC, 1999. *Guide d'échantillonnage à des fins d'analyses environnementales, cahier 1 (Généralités)*, 2^e édition, Québec, Modulo-Griffon, 57 p. et 3 annexes.

CENTRE D'EXPERTISE EN ANALYSE ENVIRONNEMENTALE DU QUÉBEC, 2001. *Guide d'échantillonnage à des fins d'analyses environnementales, cahier 5 (Échantillonnage des sols)*, 2^e édition, Québec, Modulo-Griffon, 53 p. et 3 annexes.

CHOINIÈRE, J., BEAUMIER, M., 1997. *Bruits de fond géologiques pour différents environnements géologiques au Québec*, Québec, ministère des Ressources naturelles, 28 p. et 3 annexes.

CONSEIL CANADIEN DES MINISTRES DE L'ENVIRONNEMENT, 1991. *Lignes directrices nationales sur la désaffectation des sites industriels*, Winnipeg, 64 p. et 6 annexes.

CONSEIL CANADIEN DES MINISTRES DE L'ENVIRONNEMENT, 1996. *Document d'orientation sur l'établissement d'objectifs particuliers à un terrain en vue d'améliorer la qualité du sol des lieux contaminés au Canada*, Winnipeg, 49 p. et 1 annexe.

FOUCAULT, A., RAOULT, J.F., 1988. *Dictionnaire de géologie*, 3^e édition, Paris, Masson, 352 p.

GANDESBURY, T., HETZEL, F., 1997. "Ambient Concentrations of Toxic Chemicals in San Francisco Bay Sediments", dans le site *San Francisco Estuary Institute*, [En ligne]. <http://www.sfei.org> (page consultée le 2 mars 2006).

GIBBONS, R.D., 1994. Normal prediction intervals, p. 9-23 (Chapter 1), dans John Wiley and Sons inc. (éd.), *Statistical Methods for Groundwater Monitoring*, New York, Wiley.

GILBERT, N., 1990. *Statistiques*, Montréal, HRW, 384 p.

GIROUX, M. et al., 1992. « Caractérisation de la teneur en métaux lourds totaux et disponibles des sols du Québec », *Agrosol*, vol. 5, n° 2, p. 46-55.

HAHN, G.J., 1970. "Statistical Intervals for a Normal Population, part I, tables, examples and applications", *Journal of Quality Technology*, vol. 2, n° 3, p. 115-125.

LINK, C. L., 1985. *An Equation of One-Sided Tolerance Limits for Normal Distributions*, Madison, US Dept of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, research paper FPL 458, 4 p.

LORANGER, S., 2004. « Plan d'échantillonnage, taille de l'échantillon et statistiques », *Colloque du Chapitre St-Laurent (8^e)*, tenu à Ste-Foy le 2 juin 2004.

LOZET, J., MATHIEU, C., 1986. *Dictionnaire de science du sol*, Paris, Lavoisier, 247 p.

MASSACHUSETTS. *Hazardous Waste Regulations, 310 CMR 30.600 – 310 CMR 30.699*, [Boston], Secretary of the Commonwealth, 2002, pag. multiple.

MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE DU CANADA, 1976. *Glossaire des termes de la science des sols*, Ottawa, Direction de la recherche, Publication 1459, 44 p.

MINISTÈRE DE LA SANTÉ ET DES SERVICES SOCIAUX, 2002. *Lignes directrices pour la réalisation des évaluations du risque toxicologique pour la santé humaine*, Sainte-Foy, Direction des communications du ministère de la Santé et des Services Sociaux, 84 p. et 3 annexes, [<http://publications.msss.gouv.qc.ca/acrobat/f/documentation/2002/02-227-02.pdf>].

MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT DU QUÉBEC, 1999. *Politique de protection des sols et de réhabilitation des terrains contaminés*, 2^e édition, Québec, Les Publications du Québec, 74 p. et 4 annexes.

MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT DU QUÉBEC, 2003. *Guide de caractérisation des terrains*, Québec, Les Publications du Québec, 124 pages.

MINISTRY OF ENVIRONMENT AND ENERGY, 1993. *Ontario Typical Range of Chemical Parameters in Soil, Vegetation, Moss Bags and Snow*, Toronto, Queen's Printer for Ontario, 212 p. et 7 annexes.

MINISTRY OF ENVIRONMENT AND ENERGY, 1996. *Guideline for Use at Contaminated Sites in Ontario*, Toronto, Queen's Printer for Ontario, 90 p. et 2 annexes.

MORISSETTE, S., 2003. *Méthodes d'expression de l'incertitude de mesure pour la préparation d'échantillons de contrôle de la performance analytique*, version préliminaire, Québec, Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec, 35 p.

OREGON DEPARTMENT OF ENVIRONMENTAL QUALITY, 1994. *Soil Cleanup Manual*, Portland, 39 p. et 7 annexes.

SCHERRER, B., 1984. *Biostatistique*, Chicoutimi, Gaëtan Morin éditeur, 850 p.

SPIEGEL, M.R., 1977. *Théorie et application de la statistique*, New York, Mc-Graw-Hill, 359 p.

RHODE ISLAND. *Remediation Regulations, DEM-DSR-01-93*, [Providence], Secretary of State, 1996, pag. multiple.

USEPA, 2002. *Guidance for Comparing Background and Chemical Concentrations in Soil for CERCLA Sites*, Washington, 40 p. et 2 annexes.

WASHINGTON. *The Model Toxics Control Act: Cleanup Regulation, Chapter 173-340*, [Olympia], Publications Distribution Office, 1996, pag. multiple.