

Société de Calcul Mathématique SA

Outils d'aide à la décision

depuis 1995



Analyse critique du document

"Politique Nationale de Gestion des Sites et Sols Pollués"

Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie

(Version projet du 27 novembre 2015)

Société de Calcul Mathématique SA

Rédaction Gottfried Berton et Bernard Beauzamy

Documentation Adrien Schmitt

Résumé Opérationnel

Le Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie (MEDDE) a la charge de la définition des politiques publiques en matière de sols pollués. Avec l'appui technique de l'ADEME, du BRGM et l'INERIS, les services du MEDDE ont élaboré un projet de guide méthodologique, qui sera finalisé après consultation des acteurs concernés. Nous étudions dans ce rapport la version du 27 novembre 2015, version de référence pour la consultation.

Ce document voudrait définir une politique de gestion nationale pour les sites et sols pollués : ensemble de réglementations qui définiraient convenablement ce qu'est une pollution, comment la détecter, comment la mesurer, comment y remédier lorsqu'elle a eu lieu et comment l'empêcher avant qu'elle ne se produise. Pour cela, il voudrait adopter une approche scientifique.

Nous analysons en particulier le chapitre 7, qui porte sur les outils mathématiques utilisés pour délimiter, quantifier et localiser les pollutions. Comme nous le verrons, la définition et l'utilisation de ces outils ne sont pas satisfaisantes ; les règles de base d'une approche scientifique ne sont pas respectées.

La méthodologie proposée repose sur la définition d'une "pollution concentrée" et donc d'un seuil de coupure : toute parcelle de sol ayant une concentration supérieure à ce seuil doit être dépolluée. Trois méthodes sont proposées pour obtenir une représentation de la zone polluée et définir un seuil de dépollution :

- La première consiste à analyser la distribution des données afin de définir des gammes de concentration et de déterminer l'importance de la pollution ;
- La deuxième construit des cartes de concentration, à partir des mesures effectuées sur le terrain à différentes profondeurs ;
- La troisième utilise des cartes pour dresser un bilan massique : le seuil est alors défini de telle sorte que retirer 20% du volume de terre permet d'enlever 80% de la masse totale de pollution (principe de Pareto).

Les trois méthodes proposées par le ministère sont censées converger vers une même représentation de la pollution, mais, en réalité, aucun de ces outils n'est suffisamment robuste pour servir de base aux prises de décisions, comme nous le montrons ci-dessous.

Ces trois méthodes sont en réalité insatisfaisantes sur le plan scientifique :

- le tracé des ruptures de pentes est arbitraire : on peut obtenir un seuil très différent en modifiant légèrement les pentes ou en changeant l'échelle (linéaire ou logarithmique) ;
- la méthode peut conduire à dépolluer un terrain non-pollué. Nous le montrons sur un exemple, simplification de données réelles récoltées par l'INRA ;
- le principe de Pareto n'est pas universel : les 20% de terres les plus polluées ne contiennent pas nécessairement 80% de la masse de polluant ;

- le seuil obtenu dépend de la répartition des mesures sur le terrain et de la taille de la zone d'étude ;
- les cartes d'iso-concentration ne fournissent pas une représentation fiable de la réalité : elles varient considérablement selon la méthode d'interpolation utilisée ;
- le document ne précise pas comment sont définies les gammes de concentration utilisées dans les cartes d'iso-concentration et le bilan massique, et ne donne aucune règle pour tracer les pentes dans la méthode de rupture de pentes.

Notre conclusion est claire : ce document comporte de nombreux biais méthodologiques et des erreurs de raisonnement flagrantes. Il est inadapté pour fonder une décision normative.

I. Principe général de la méthodologie

La méthodologie proposée par le Ministère repose sur la définition d'une "pollution concentrée" et donc d'un seuil de coupure : toute parcelle de sol ayant une concentration supérieure à ce seuil doit être dépolluée. Trois méthodes sont proposées pour obtenir une représentation de la zone polluée et définir un seuil de dépollution :

- La première méthode consiste à analyser la distribution des données afin de définir des gammes de concentration et de déterminer l'importance de la pollution ;
- La deuxième méthode construit des cartes de concentration, c'est-à-dire reconstruit la concentration en tout point à partir des mesures effectuées sur le terrain à différentes profondeurs ;
- La troisième méthode utilise des cartes pour dresser un bilan massique : pour chaque gamme de concentration, on détermine la masse de polluant et le volume de sol. Le seuil est alors défini de telle sorte que retirer 20% du volume de terre permet d'enlever 80% de la masse totale de pollution (principe de Pareto).

Les trois méthodes proposées par le ministère sont censées converger vers une même représentation de la pollution, mais, en réalité, aucun de ces outils "mathématiques" n'est suffisamment robuste pour servir de base aux prises de décisions, comme nous le montrons ci-dessous.

II. Analyse critique des méthodes

A. Méthode 1 : déterminer la distribution des polluants

L'objectif est de déterminer des gammes de concentrations. La méthode consiste à tracer un graphique représentant la distribution des polluants :

- en abscisse, les teneurs en polluant ;
- en ordonnée, le pourcentage de mesures indiquant une teneur inférieure.

Ce graphique permet de déterminer des ruptures de pente, qui définissent des gammes de concentrations :

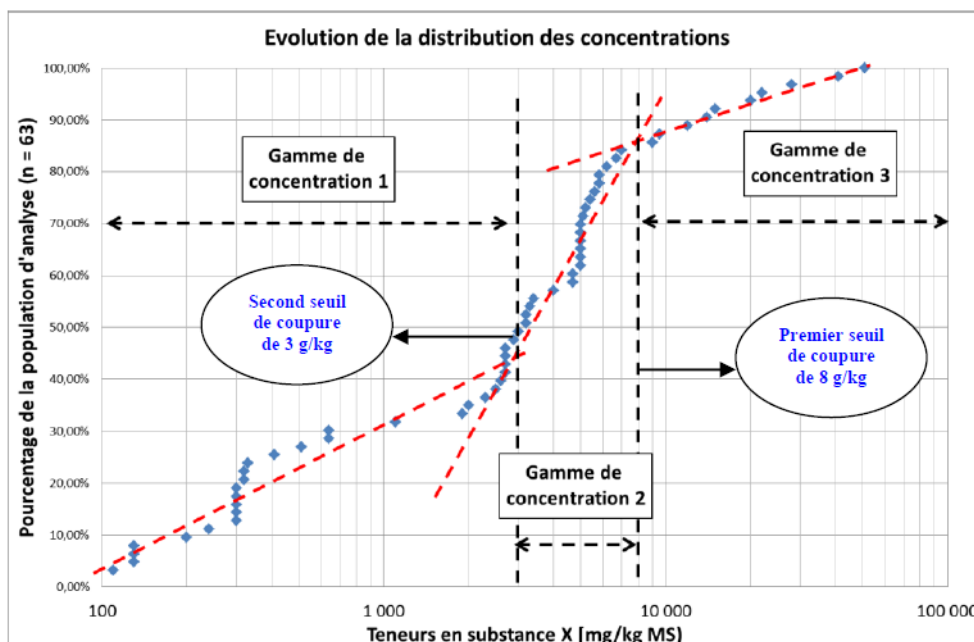


Figure 1 : ruptures de pentes sur la fonction de répartition

A ce stade, une analyse consistant à dire que les sols dans la gamme de concentration 3 doivent être dépollués est infondée. Il faut également analyser la variabilité naturelle des polluants. Cette méthode est donc inadaptée pour définir un seuil de coupure.

Mais elle l'est également pour la définition de plages de valeurs, ce qu'elle a pourtant vocation à faire. Notre critique porte essentiellement sur le recours inapproprié à des "ruptures de pentes".

❖ **Le tracé de ces ruptures est arbitraire**

En modifiant légèrement les pentes, on peut obtenir des seuils très différents comme nous le montrons avec l'exemple suivant tiré de l'ancien site SUTE à Pont-à-Mousson [4].

Sur le premier graphe ci-dessous, l'étude faite par le Ministère conclut à un seuil de 100 mg/kg, mais on peut tout aussi bien obtenir un seuil de 45 mg/kg en modifiant légèrement les pentes, comme illustré sur le second graphe.

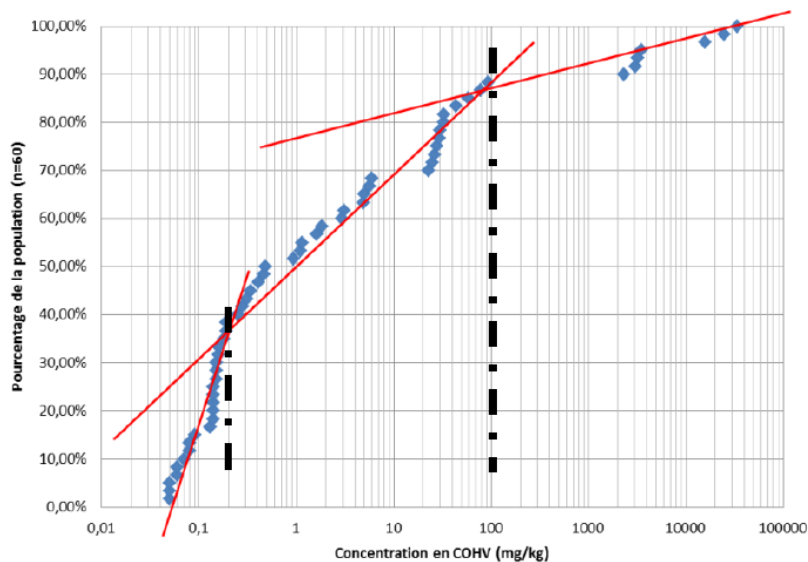


Figure 2 : seuil de coupure à 100 mg/kg

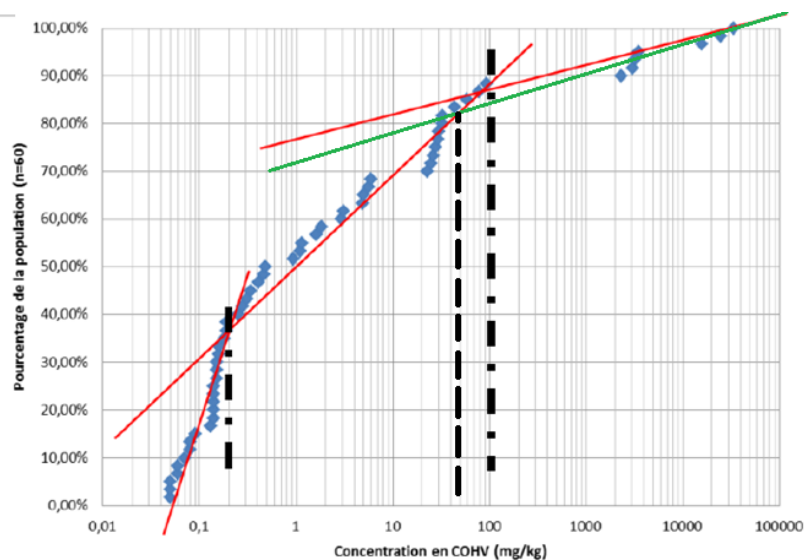


Figure 3 : pentes légèrement modifiées (en vert) pour obtenir un seuil de 45 mg/kg

La fragilité de la méthode est due :

- à l'utilisation de droites : la courbe n'a pas lieu de se laisser approcher par des lignes droites ; leur tracé est souvent arbitraire. En outre, le DR ne donne aucune règle précise pour tracer ces pentes ;
- à l'échelle logarithmique utilisée dans le document, qui induit une forte incertitude sur les pentes et donc sur le seuil.

En utilisant une autre échelle on obtiendrait des résultats différents. Voici par exemple la courbe ci-dessus représentée en échelle linéaire :

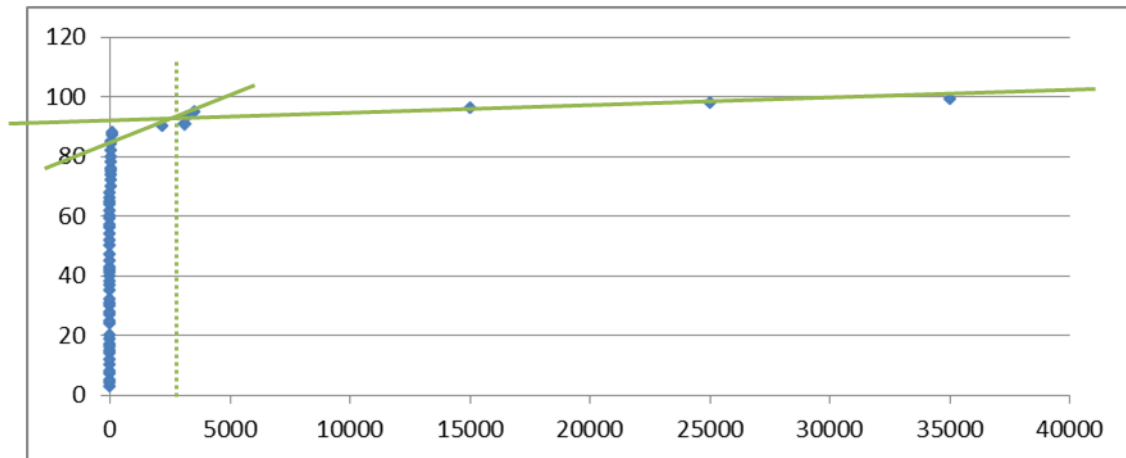


Figure 4 : fonction de répartition représentée sur une échelle linéaire

On obtient maintenant un seuil d'environ 2500 mg/kg, contre 100 mg/kg en échelle logarithmique.

Cette fragilité des résultats montre que la méthode est inappropriée pour fonder une décision normative.

❖ L'analyse est biaisée par la répartition des mesures

La fonction de répartition dépend de la disposition des sondages : s'ils sont localisés sur la zone polluée, il est clair que l'analyse ci-dessus ne permettra pas d'identifier la plage de valeurs correspondant à la variabilité naturelle sur le site. Il est donc nécessaire d'obtenir des données représentatives et de bonne qualité avant d'effectuer tout traitement statistique.

En ajoutant des mesures en dehors de la zone fortement polluée, la fonction de répartition sera différente, et les seuils de coupure ne seront pas les mêmes, comme nous le montrons dans l'exemple suivant.

Pour les deux répartitions de capteurs suivantes, on obtient deux fonctions de répartition différentes, représentées en rouge et bleu :

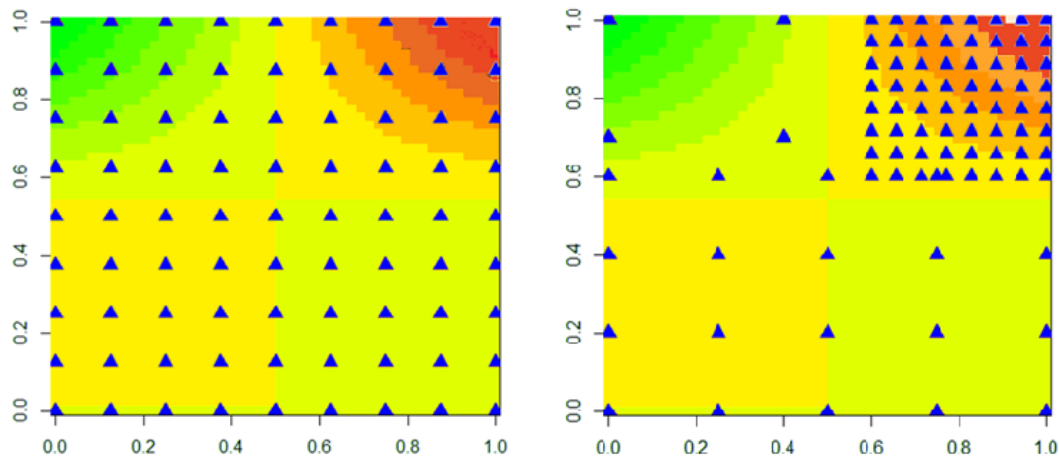


Figure 5 : répartition des capteurs. En vert les zones faiblement concentrées, en rouge les zones fortement concentrées.

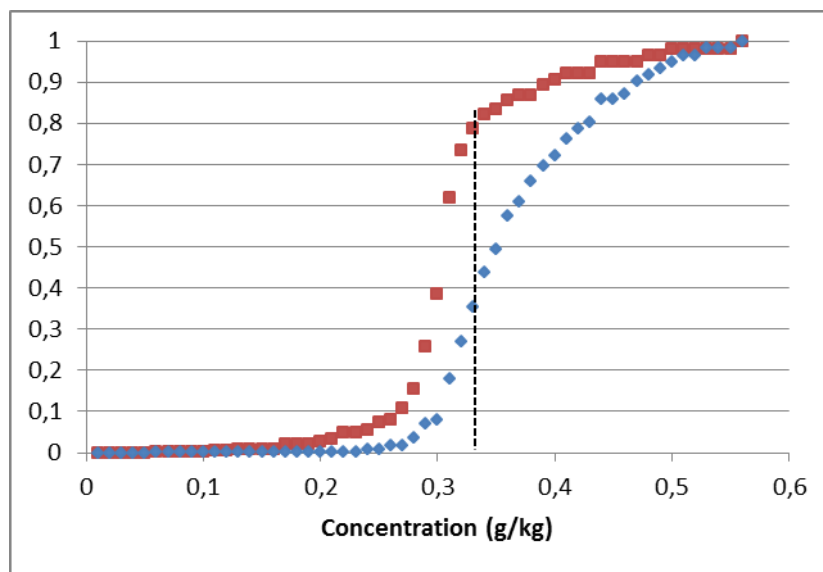


Figure 6 : fonction de répartition des mesures (en rouge la répartition uniforme des capteurs, en bleu la répartition sur la zone fortement concentrée)

Ces fonctions ont des formes différentes, et la rupture de pente présente sur la courbe rouge autour de 0,33 g/kg disparaît sur la courbe bleue.

❖ **Il n'y a pas toujours de "rupture de pente"**

Il n'y a pas nécessairement de ruptures clairement définies, comme on le voit sur les deux exemples suivants :

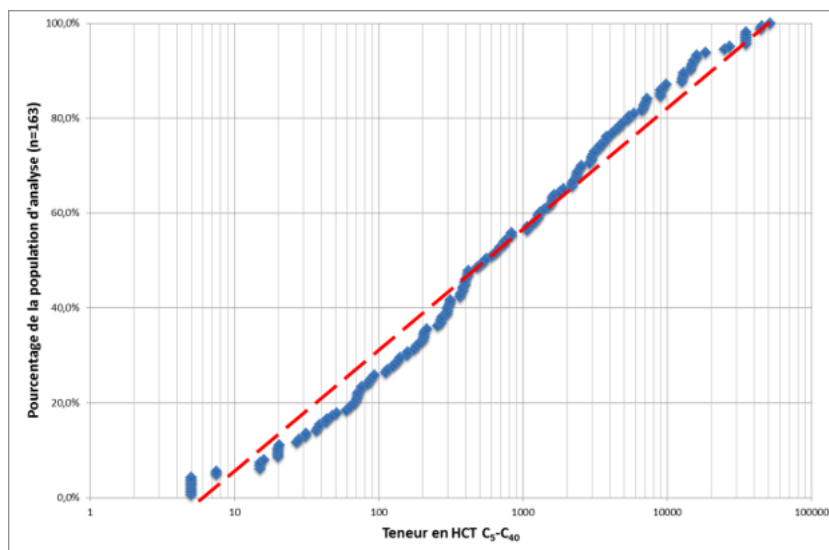


Figure 7 : fonction de répartition pour le site B, non saturé, 0 et 2 m de profondeur (source : BRGM [1])

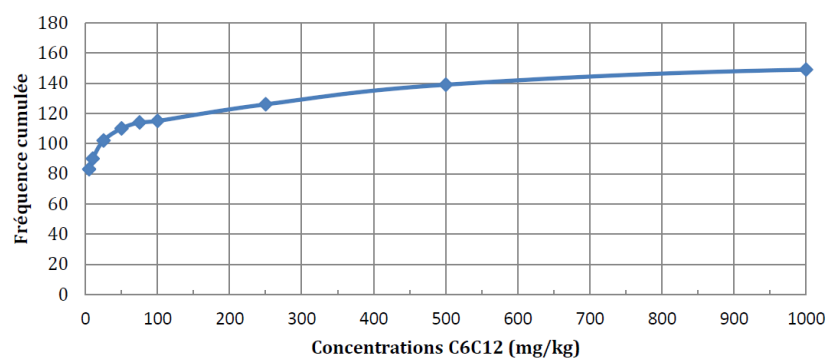


Figure 8 : fonction de répartition (source : UDPS [5])

Lorsqu'il y a quelques mesures de concentration très élevées par rapport aux autres mesures, la rupture est quasiment imperceptible sur la fonction de répartition, comme illustré ci-dessous :

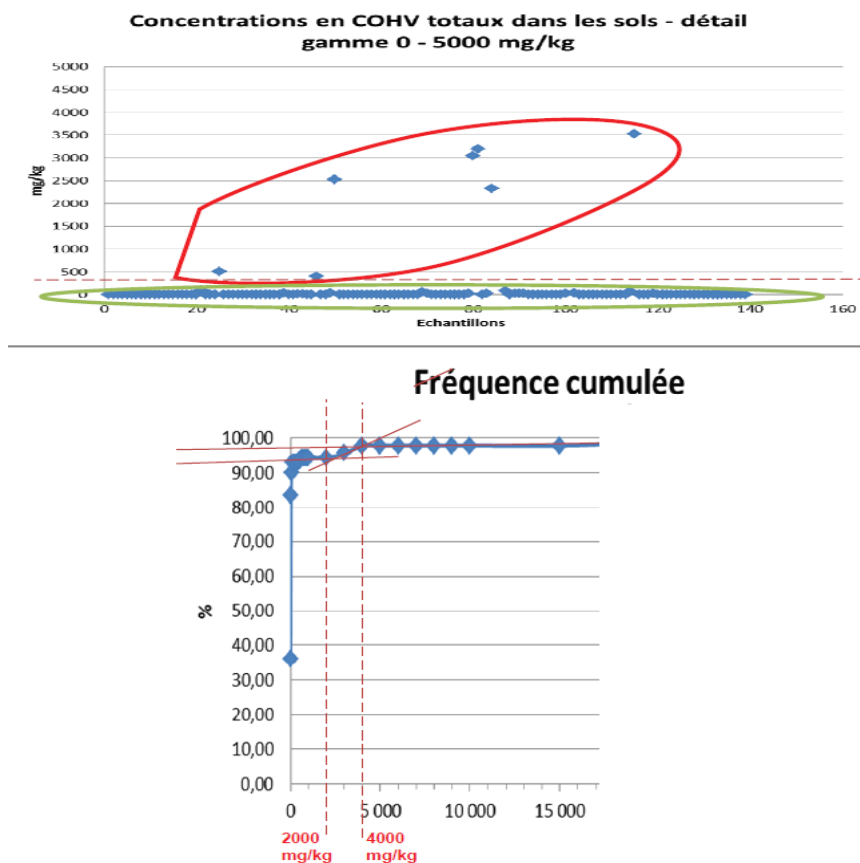


Figure 9 : fonction de répartition avec concentrations très élevées (source : BRGM [1])

B. Méthode 2 : cartes d'iso-concentrations

La deuxième méthode consiste à reconstruire la concentration en tout point à partir des mesures de la teneur en polluant. Le résultat est une carte d'iso-concentration comme ci-dessous :

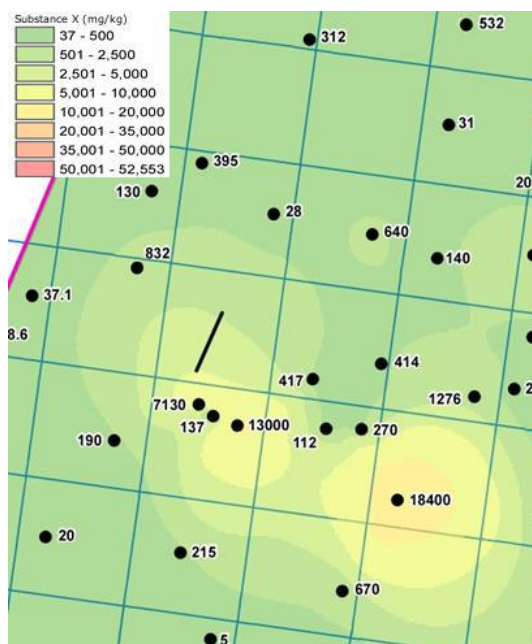


Figure 10 : carte d'iso-concentration tirée de l'exemple du DR

❖ Les cartes diffèrent selon la méthode d'interpolation

Ces cartes ne fournissent pas une représentation fiable de la réalité puisqu'elles diffèrent en fonction de la méthode d'interpolation employée et des paramétrages d'interpolation retenus, comme on le voit ci-dessous. Les échelles de couleur sont identiques sur tous les graphiques, et chaque graphique représente une même situation.

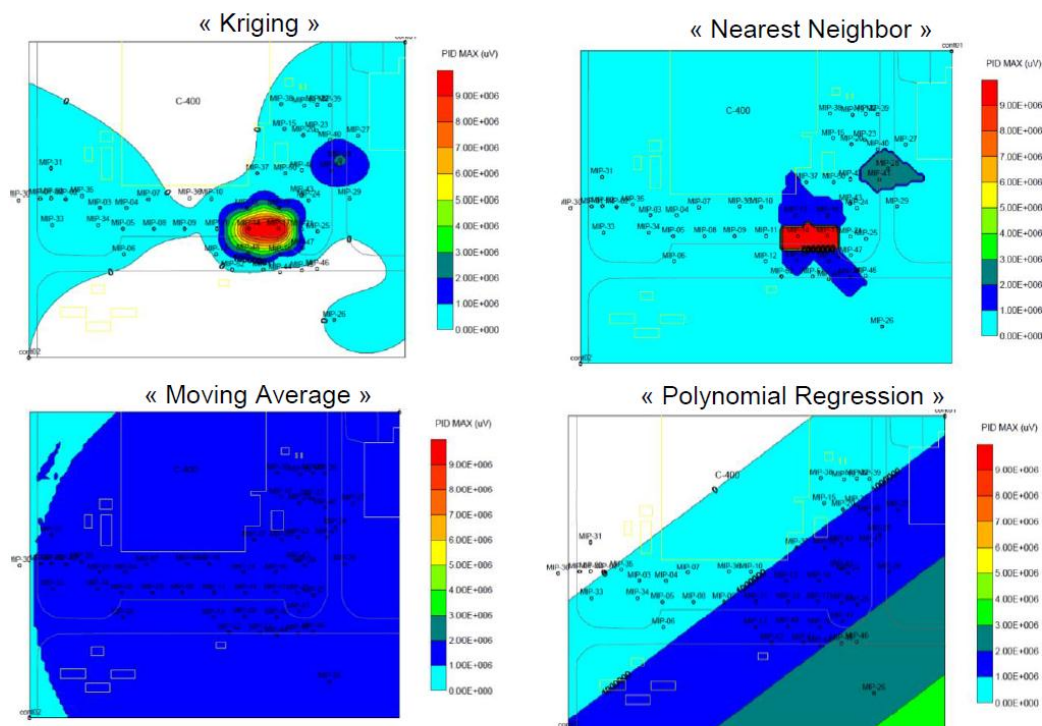


Figure 11 : cartes obtenues avec différentes techniques d'interpolation (source : BRGM [1])

La zone très concentrée (en rouge) a une taille radicalement différente selon les techniques d'interpolation. L'estimation du volume de sol à dépolluer sera donc lui aussi très variable. Le krigeage est le plus couramment utilisé, mais d'autres méthodes obtiennent des résultats différents. Ceci n'est pas acceptable, la récolte de nouvelles données peut éventuellement faire reconsidérer la zone à dépolluer, en revanche utiliser un autre modèle numérique ne devrait pas conduire à définir un seuil de réhabilitation différent.

❖ La méthode est biaisée par la répartition des mesures

La répartition en polluant varie en fonction des modes de contamination ; il peut y avoir des accumulations locales de polluant ou des pollutions généralisées. Il faut donc disposer d'un nombre suffisant de prélèvements pour obtenir une carte représentative de la pollution, ce qui n'est pas toujours le cas dans les exemples présentés dans le DR. La démarche habituellement suivie lors des diagnostics est de réaliser peu de mesures dans les zones présumées faiblement polluées et de concentrer les échantillons dans les zones potentiellement impactées. La densité de l'échantillonnage n'est alors pas homogène sur tout le site et le traitement statistique est biaisé.

La concentration peut se présenter comme ci-dessous, avec des pics locaux de pollution dispersés aléatoirement (en violet) :

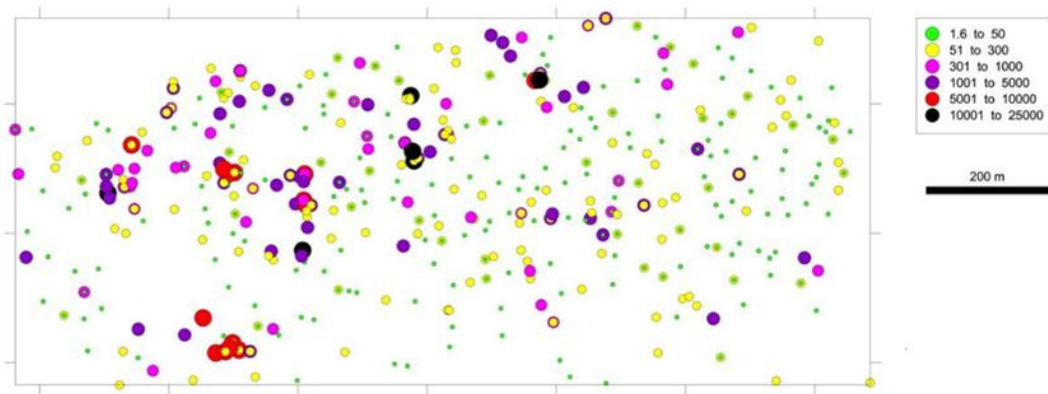


Figure 12 : concentration en plomb (mg/kg) dans des remblais (source : UDPS [5])

Dans l'exemple du DR, la densité faible des capteurs dans la zone présumée non polluée ne sera pas nécessairement suffisante pour obtenir une représentation fiable de la pollution : la zone représentée en vert ci-dessous peut très bien présenter localement de fortes concentrations ponctuelles :

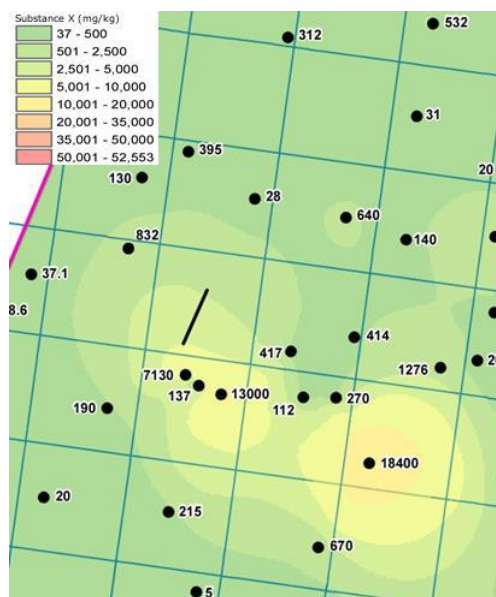


Figure 13 : carte d'iso-concentration tirée de l'exemple du DR

❖ Prise en compte des incertitudes

Le principe des cartes d'iso-concentration est discutable. Il y a en effet une incertitude sur la concentration, qui est différente en tout point : par exemple, dans les zones où il y a très peu de mesures, l'intervalle de confiance sera plus large. Il n'est donc pas pertinent de fixer des plages de valeurs a priori et d'espérer que l'intervalle de confiance du point correspondra à l'une de ces plages. On ne sait pas comment sont fixées ces plages ; ceci n'est précisé nulle part dans le DR.

Il serait préférable de déterminer un intervalle de confiance en tout point de la carte. Le bilan massique réalisé à partir de cette carte tiendrait lui aussi compte des incertitudes. La méthode du Krigeage, généralement utilisée dans ces études, n'est cependant pas très adaptée pour renvoyer une incertitude ; nous avons travaillé sur ces questions dans le cadre d'un contrat avec l'IRSN.

Le Krigeage comporte également d'autres faiblesses que nous listons ci-dessous.

❖ Faiblesses méthodologiques du Krigeage

Le Krigeage fait de nombreuses hypothèses de modèle ; il suppose que la variabilité de la teneur en polluant est constante sur le domaine, ce qui n'est pas vrai en général : il peut y avoir des endroits où la variabilité est forte, et d'autres endroits où la concentration est constante.

Dans le Krigeage, la première étape consiste à construire un modèle de la variabilité en fonction de la distance entre les points, mais en pratique, on ne dispose pas de suffisamment de mesures pour construire un tel modèle.

C. Méthode 3 : bilan massique

A partir des cartes d'iso-concentration, il est possible de calculer, pour chaque gamme de concentration, les volumes de terre, puis en multipliant par la concentration moyenne de la zone considérée, la masse de polluants. Le bilan massique consiste à tracer le graphique suivant avec :

- en abscisse : les gammes de concentration ;
- en ordonnée à gauche (en bleu) : le pourcentage de volume de sol dans chaque gamme ;
- en ordonnée à droite (en rouge) : le pourcentage de masse de polluants.

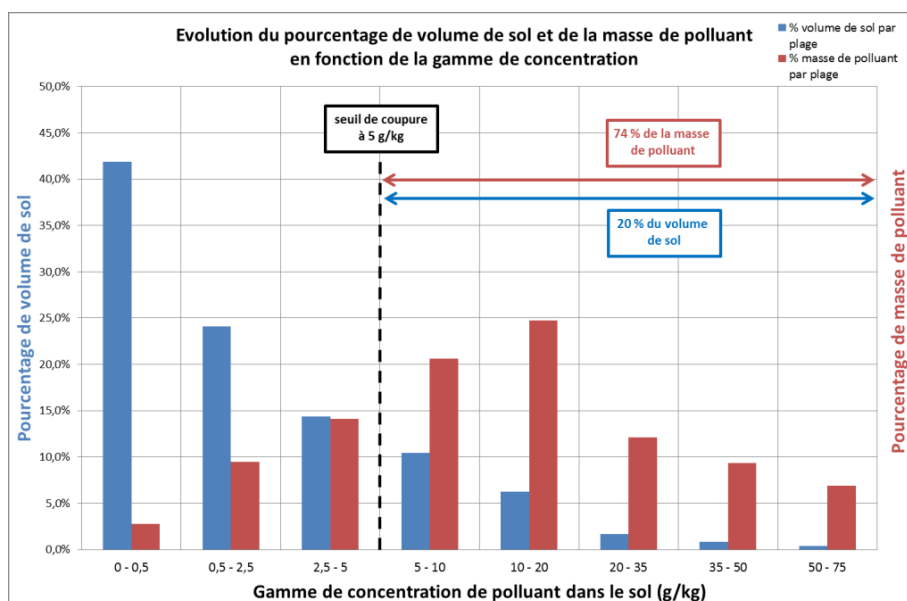


Figure 14 : bilan massique (tiré du DR)

L'inversion entre le pourcentage de volume de sol (en bleu) et le pourcentage de masse (en rouge) définit le seuil de coupure théorique. L'objectif est de retirer le maximum de la masse de polluant avec le moindre de volume de sol à traiter.

Ce bilan dépend de la carte d'iso-concentration obtenue : les gammes de concentration utilisées dans le bilan massique sont celles de la carte. Cependant, le DR ne donne aucune méthode pour fixer ces plages de valeurs, alors que c'est un élément essentiel de la méthode : le seuil de coupure obtenu correspond nécessairement à l'une des bornes des plages de concentration. Si celles-ci sont trop larges ou mal définies, le seuil obtenu pourrait être erroné.

L'utilisation de gammes d'amplitudes différentes induit des biais qui faussent la détermination du seuil.

❖ La méthode peut conduire à "dépolluer un terrain non-pollué"

Nous donnons ci-dessous un exemple de terrain non-pollué où l'application de la méthode conduirait à dépolluer une grande partie du site.

Prenons comme exemple un terrain d'1 km² pollué au Cadmium. Cet exemple est une simplification de données réelles récoltées par l'INRA. La plage de concentration correspond à la variabilité naturelle du Cadmium dans les sols agricoles du sud de l'Yonne [3]. Il n'y a donc pas à dépolluer ce terrain en théorie.

La concentration en tout point du sol (inconnue) est représentée ci-dessous. Elle varie entre 0,05 mg/kg (en vert) et 0,55mg/kg (en rouge) :

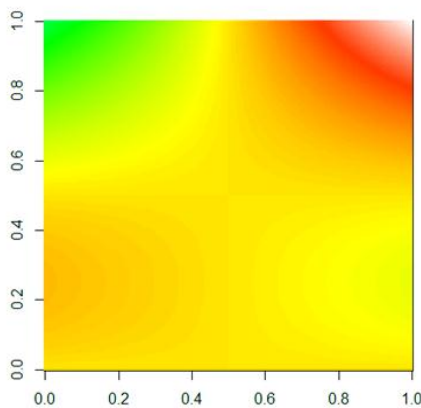


Figure 15 : représentation de la pollution

Nous discrétisons le domaine des valeurs de concentration en 7 plages et construisons la carte d'iso-concentration ci-dessous :

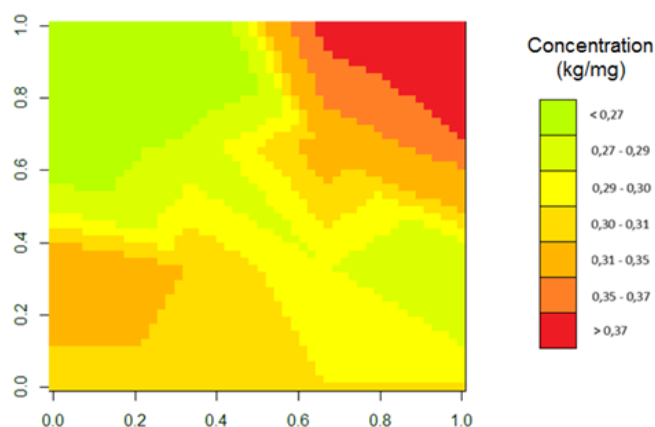


Figure 16 : carte d'iso-concentration

A partir de cette carte, on obtient le bilan massique suivant. L'histogramme de la masse de polluant est représenté en rouge, et l'histogramme des volumes en bleu :

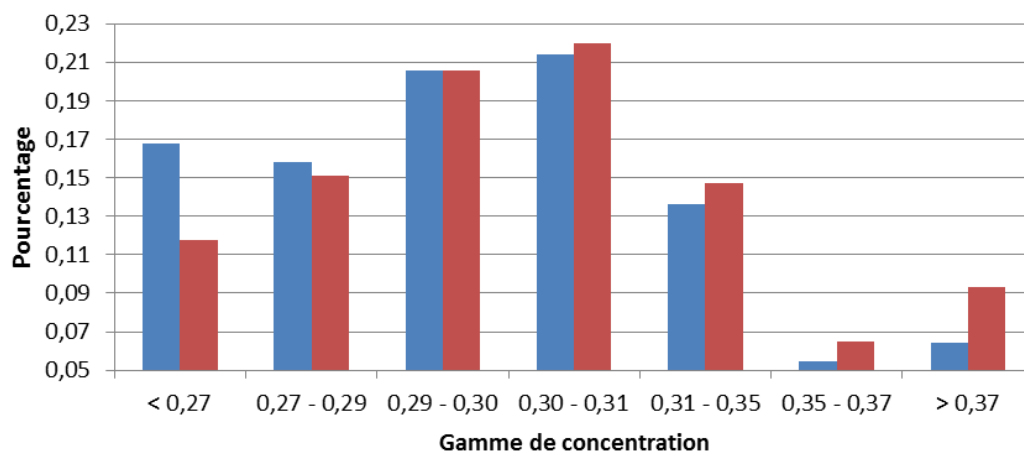


Figure 17 : bilan massique

Le croisement entre les deux courbes bleues et rouge se situe à 0,30 mg/kg. Donc cette méthode permet, même en cas de sol naturel, de définir une zone "concentrée" par rapport au reste du site et donc démontre qu'il n'y a pas de limite à cette approche : il est toujours possible de définir une zone plus concentrée quels que soient les sols, naturels ou pollués.

En définitive, il faudrait systématiquement démarrer un nouveau plan de gestion immédiatement après avoir terminé le premier. Une fois le terrain dépollué, il y aura toujours une zone ayant une concentration plus élevée, puisque la concentration varie naturellement d'un endroit à l'autre. Si l'on applique à nouveau la méthode, elle conduira à dépolluer la zone la plus polluée.

Même si il n'y a pas de risque sanitaire, ni aucune pollution, il faudrait tout de même dépolluer le site. Comme il a été dit dans le DR : "même en l'absence de risque, il convient d'agir sur les sources de pollution et les pollutions concentrées suivant les modalités présentées aux § 7 et 8."

L'objectif recherché par le Ministère semble donc être une concentration uniforme et nulle, ce qui n'est ni souhaitable, ni réalisable.

❖ Le principe de Pareto n'est pas universel

Le seuil est défini pour respecter le principe de Pareto : enlever 20% du volume de terre permet d'enlever 80% de la masse totale de polluant.

Reprenons l'exemple du terrain pollué au Cadmium présenté ci-dessus, qui est une simplification de données réelles récoltées par l'INRA. Le bilan massique était le suivant :

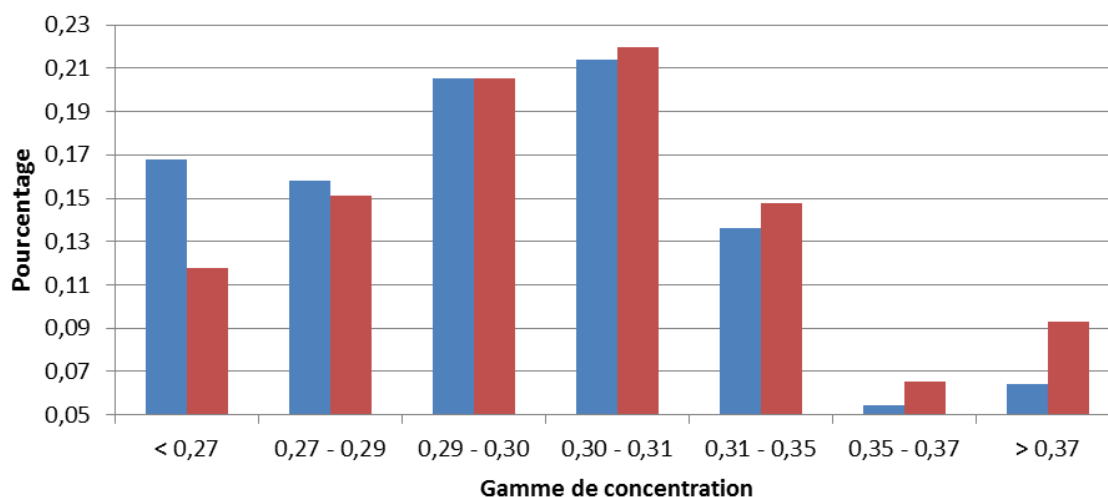


Figure 18 : bilan massique (en rouge l'histogramme de la masse de polluant)

Quel que soit le seuil choisi, il ne respecte pas le principe de Pareto : il y aura soit un faible volume de sol à traiter pour une faible masse de polluant retirée, soit une forte masse de polluant retirée, au prix d'un grand volume de sol à traiter.

La méthodologie ne permet pas de définir la meilleure solution parmi ces deux options ; au contraire, elle tranche arbitrairement en disant : le seuil est à l'inversion des deux histogrammes, ce qui signifie qu'il faut enlever 43% du volume du sol pour retirer 53% de la masse de polluant. Mais on pourrait tout aussi bien dire que retirer 11,5% du volume du sol pour retirer 15% de la masse est préférable.

Rappelons que, si ce seuil était acceptable financièrement, il deviendrait l'objectif réel de dépollution.

❖ Le seuil obtenu dépend de la zone étudiée

Comparons deux études différentes d'un même site pollué : une première centrée sur la zone fortement polluée (graphique de gauche ci-dessous) et une seconde pour laquelle on dispose de mesures sur une zone deux fois plus étendue (graphique de droite). La couleur rouge indique une forte concentration.

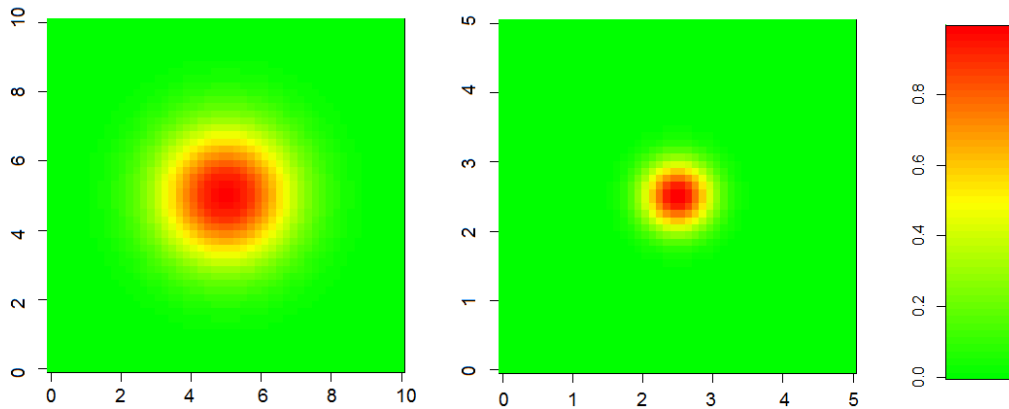


Figure 19 : étude centrée sur la pollution (à gauche), et étude sur une zone plus vaste (à droite)

A droite, l'histogramme des volumes sera de la forme suivante : 90% pour la gamme la moins concentrée, et 1 ou 2% pour les autres gammes. L'histogramme des masses de polluants reste quasiment identique à gauche et à droite puisque la concentration de la zone verte est faible. L'inversion entre les deux histogrammes (volume et masse) aura donc lieu pour un seuil plus bas dans l'étude de droite, et la zone à dépolluer sera plus importante, comme le montrent les histogrammes suivants.

Les bilans massiques de la première et de la seconde étude sont tracés ci-dessous ; l'histogramme en bleu représente le volume, et l'histogramme en rouge la masse :

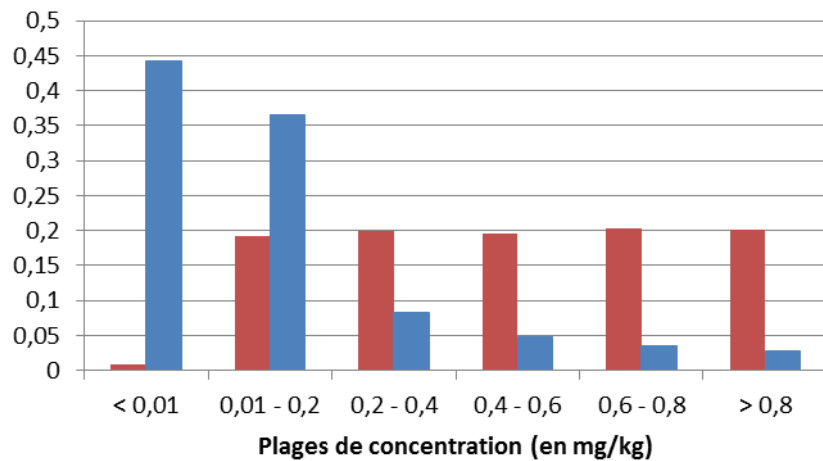


Figure 20 : bilan massique pour l'étude centrée sur la zone polluée

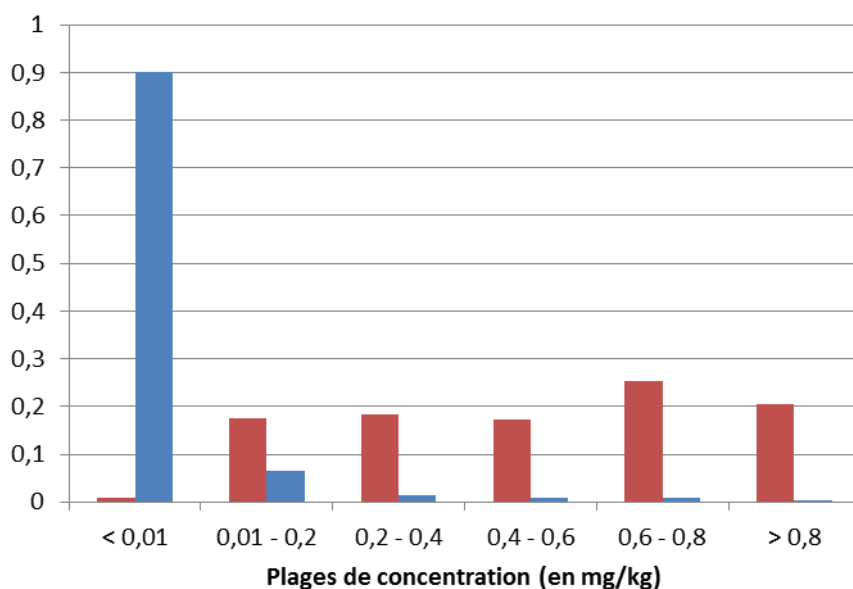


Figure 21 : bilan massique pour l'étude d'une zone plus vaste

Pour la première étude, le seuil se situe à 0,2 mg/kg, alors que pour la seconde, il est de 0,01 mg/kg.

Le "seuil de coupure théorique" dépend donc de la taille de la zone d'étude et de son emplacement par rapport à la pollution. En définissant une zone d'étude suffisamment vaste, on obtiendrait un seuil de dépollution très bas, ce qui conduirait à dépolluer une surface très étendue, voire l'intégralité du site.

III. Conclusion

Les trois méthodes proposées dans le document sont insatisfaisantes sur le plan scientifique :

- le tracé des ruptures de pentes est arbitraire : on peut obtenir un seuil très différent en modifiant légèrement les pentes ou en changeant l'échelle (linéaire ou logarithmique) ;
- la méthode peut conduire à "dépolluer un terrain non-pollué". Nous l'avons montré sur un exemple, qui est une simplification de données réelles récoltées par l'INRA ;
- le principe de Pareto n'est pas universel : les 20% de terres les plus polluées ne contiennent pas nécessairement 80% de la masse de polluant ;
- le seuil obtenu dépend de la répartition des mesures sur le terrain et de la taille de la zone d'étude ;
- les cartes d'iso-concentration ne fournissent pas une représentation fiable de la réalité : elles varient considérablement selon la méthode d'interpolation utilisée ;
- le document ne précise pas comment sont définies les gammes de concentration utilisées dans les cartes d'iso-concentration et le bilan massique, et ne donne aucune règle pour tracer les pentes dans la méthode de rupture de pentes.

En conclusion, le document comporte de nombreux biais méthodologiques et des erreurs de raisonnement flagrantes. Il est inadapté pour fonder une décision normative.

IV. Références

[1] Définir une stratégie de dépollution : Approche basée sur la masse de polluant et la capacité de relargage d'une pollution. Rapport final. BRGM/RP-64350-FR. Février 2016.

[2] SITES ET SOLS POLLUÉS, "La politique nationale de gestion des sites et sols pollués", 27 novembre 2015, 112 pages. Disponible sur :

http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Version_projet_du_27_novembre_2015_pour_consultation.pdf (consulté le 25 mars 2016).

[3] BAIZE Denis, "Teneurs en huit éléments en traces (Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Se et Zn) dans les sols agricoles en France", Chapitre 9 "Travail approfondi sur un département : l'Yonne" [en ligne], *INRA*, 26 janvier 2007, pages 68 à 72. Disponible sur :

http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/56610_etm_sol_chapitres_9-annexes.pdf (consulté le 25 mars 2016).

[4] http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/13_BILAN_MASSIQUE.pdf (consulté le 25 mars 2016). Journée technique d'information et de retour d'expérience de la gestion des sols pollués, 30 septembre 2015.

[5] Travaux du GT Pollution Concentrée. UDPS. Décembre 2014