



Service Public de Wallonie
Département de la Protection des Sols

**Aide à l'expert pour la proposition de
concentrations de fond dans le cadre du
décret du parlement wallon du 5 décembre
2008 relatif à la gestion des sols**

B. Pereira, A. Vandeuren & Ph. Sonnet
Soil Science and Environment Geochemistry
UCL-Earth and Life Institute

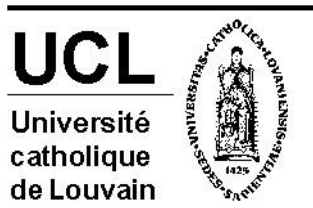


Table des matières

<i>Introduction</i>	<i>3</i>
<i>Démarche proposée à l'expert</i>	<i>4</i>
<i>Étape 1. Recherche d'informations sur l'environnement industriel et pédogéologique</i>	<i>5</i>
Circonstances justifiant la proposition de concentrations de fond.....	5
<i>Étape 2. Prélèvement et analyse de huit sols.....</i>	<i>7</i>
1. Plan d'échantillonnage	7
Circonstance 1 : pollution atmosphérique de proximité (PAP)	7
Circonstance 2 : anomalie géochimique.....	9
2. Critères pour le prélèvement et l'analyse d'échantillons représentatifs ..	12
<i>Étape 3. Interprétation des résultats</i>	<i>13</i>
Question 1. Les huit sols T relèvent-ils bien des concentrations de fond ? ..	14
Question 2. Quelle concentration de fond pour P ?	18
<i>Annexe 1 : Comment obtenir le diagramme de dispersion et le diagramme probabilité-probabilité à l'aide de Microsoft Excel ?</i>	<i>20</i>
<i>Annexe 2 : Exemples d'interprétation des résultats</i>	<i>22</i>

Introduction

L'application du décret du Parlement wallon du 5 décembre 2008 relatif à la gestion des sols (Décret « sols ») pour un terrain donné requiert l'exécution par l'expert d'une étape qui est l'établissement des concentrations de fond. Cette étape intervient soit lorsque l'on souhaite vérifier si les concentrations mesurées sur un sol relèvent des concentrations de fond, soit lorsque l'on souhaite déterminer les concentrations de fond pour fixer les objectifs d'assainissement.

Pour l'établissement des concentrations de fond, l'expert peut adopter une des trois options suivantes :

1. Reprendre les valeurs indiquées pour le sol en question par la carte régionale des concentrations de fonds établie par l'Administration (cf. Géoportail de la Wallonie : <http://geoportail.wallonie.be/>) ;
2. Proposer des valeurs de concentrations de fond différentes de celles indiquées sur la carte régionale des concentrations de fond ;
3. Proposer des valeurs de concentration de fond lorsque la carte régionale des concentrations de fond ne fournit pas de valeur pour le polluant sur la parcelle en question.

Que ce soit dans la seconde ou dans la troisième option, la démarche à adopter et le travail à réaliser par l'expert sont fondamentalement identiques. Ces deux options seront donc considérées comme équivalentes dans la suite de ce guide.

L'objectif de ce guide est de présenter les éléments sur lesquels l'expert peut s'appuyer pour proposer des valeurs de concentrations de fonds. Ce sont également les éléments qui serviront à l'Administration pour juger du bien-fondé des propositions de l'expert.

Démarche proposée à l'expert

Une démarche en trois étapes est proposée à l'expert pour lui permettre de réaliser au mieux sa mission.

Etape 1. Recherche d'informations sur l'environnement industriel et les caractéristiques pédogéologiques du sol pour lequel on souhaite proposer une concentration de fond. Ces informations permettront d'établir un plan d'échantillonnage et d'analyse adapté au contexte, et d'interpréter correctement les résultats pour la proposition d'une valeur de concentration de fond.

Etape 2. Prélèvement et analyse de huit sols suivant un protocole décrit ci-dessous et qui a été établi spécifiquement pour la détermination des concentrations de fond. Les huit sols sont prélevés à l'extérieur de la limite supposée de la zone polluée, tout en restant à proximité de cette limite. L'échantillonnage par l'expert et les analyses doivent être exécutés selon les protocoles du CWEA et réalisés par un laboratoire agréé.

Etape 3. Interprétation des résultats d'analyse à l'aide de raisonnements statistiques et pédologiques et proposition de valeurs comme concentration de fond par l'expert. Le traitement des résultats et les raisonnements sous-jacents seront communiqués suivant un mode de présentation qui permet à l'Administration de décider du bien-fondé des valeurs proposées comme concentration de fond.

Étape 1. Recherche d'informations sur l'environnement industriel et pédogéologique

Circonstances justifiant la proposition de concentrations de fond

La carte régionale des concentrations de fond établie par l'Administration se base sur l'ensemble des analyses de sols disponibles actuellement en Wallonie (sols agricoles et forestiers). La carte régionale constitue le meilleur outil disponible actuellement pour prédire les concentrations de fond qui prévalent localement. Cependant, il existe **deux circonstances** dans lesquelles les valeurs fournies par la carte régionale pourraient avoir tendance à sous-estimer les concentrations de fond :

1. lorsqu'il y a présence de **pollution atmosphérique de proximité** (PAP) donnant lieu, par retombée de poussières et de fumées, à un enrichissement de l'horizon de surface du sol en polluants organiques ou inorganiques ;
2. lorsqu'en raison du **contexte géologique local**, la présence d'anomalies géochimiques donne lieu à une concentration inhabituelle en polluants inorganiques dans le sol.

La recherche d'informations sur l'environnement industriel et pédogéologique va permettre à l'expert d'apprécier si le sol se trouve dans l'une ou l'autre de ces deux circonstances, et si, pour cette raison, les concentrations de fond fournies par la carte régionale sous-estiment les concentrations de fond réellement présentes.

Circonstance 1 : pollution atmosphérique de proximité (PAP)

Sur base de la connaissance des sources de pollution actuelles ou historiques¹ de la région dans laquelle se situe le terrain, l'expert peut estimer que les concentrations de fond résultent pour une part substantielle de la présence de PAP. Ce cas se présente lorsque le sol se situe à proximité directe d'un contexte urbain et/ou industriel (actuel ou ancien). On remarque la présence d'un enrichissement du sol pour plusieurs polluants organiques et/ou inorganiques. Cet enrichissement se marque principalement dans l'horizon de surface du sol (0-20cm).

Circonstance 2 : anomalie géochimique

Sur base de la connaissance du contexte géologique local, l'expert estime que les concentrations de fond résultent pour une part substantielle de la présence d'une anomalie géochimique localisée. Ce cas se présente lorsque le sol se localise dans une région où le contexte géologique a

¹ Les informations pertinentes seront par exemple : la localisation, le nombre et la hauteur de cheminées, le type d'activité industrielle et le procédé industriel utilisé, les quantités produites, etc.

permis la formation de filons et de gisements métallifères, ou a amené les roches à renfermer des concentrations inhabituellement élevées en certains métaux ou en composés organiques. Dans ces circonstances, on remarque généralement la présence d'un enrichissement du sol pour plusieurs polluants, tant dans les horizons de surface que dans les horizons profonds (les concentrations ont tendance à être plus élevées dans les horizons profonds). Pour aider l'expert à identifier le contexte géologique local, l'Administration met à disposition de nombreuses informations utiles sur le Géoportail de la Wallonie (<http://geoportail.wallonie.be/>).

Étape 2. Prélèvement et analyse de huit sols

1. Plan d'échantillonnage

La méthode proposée pour la détermination de la concentration de fond d'un sol consiste à se baser sur les concentrations mesurées dans huit sols témoins adjacents. Pour la réalisation du plan d'échantillonnage et d'analyse de ces huit sols témoins, il faut être attentif à plusieurs aspects, qui diffèrent selon que l'on soit en présence de PAP ou d'une anomalie géochimique naturelle locale. Ces deux circonstances sont donc traitées séparément dans le texte qui suit.

La diversité des situations qui peuvent se présenter en Wallonie rend impossible de proposer un protocole unique adapté à toutes les situations. Il est possible, par exemple, que le sol pour lequel on est amené à déterminer les concentrations de fond soit situé à la fois dans une zone touchée par la PAP et dans une zone d'anomalie géochimique naturelle locale. Dans ce cas, on combinera les principes et les recommandations présentées séparément ci-dessous pour chacune de ces circonstances.

Circonstance 1 : pollution atmosphérique de proximité (PAP)

Dans une situation de pollution atmosphérique de proximité, la méthode proposée pour la détermination de la concentration de fond d'un sol consiste à se baser sur les concentrations mesurées en profondeur et en surface dans huit sols témoins adjacents. Dans la suite du texte, nous utiliserons les abréviations suivantes :

- « sol P » : le **sol de la parcelle** pour lequel l'expert souhaite proposer à l'Administration une valeur de concentration de fond ;
- « sol T » : un **sol témoin**, constituant une référence en ce qui concerne les concentrations de fond qui prévalent localement.

Le plan d'échantillonnage optimum consiste à prélever les huit sols T (témoins) suivant les quatre points cardinaux (N, S, O, E) et les quatre points intercardinaux (NE, NO, SE, SO). Les huit sols T devront se trouver à l'extérieur de la limite du sol de la parcelle P, pour laquelle on cherche à déterminer les concentrations de fond², tout en restant à proximité de cette limite. Le schéma suivant illustre le principe général du plan d'échantillonnage :

² Pour les sols T adjacents au sol P, l'Article 7 du Décret « sols » accorde le droit de réaliser des travaux d'échantillonnage.

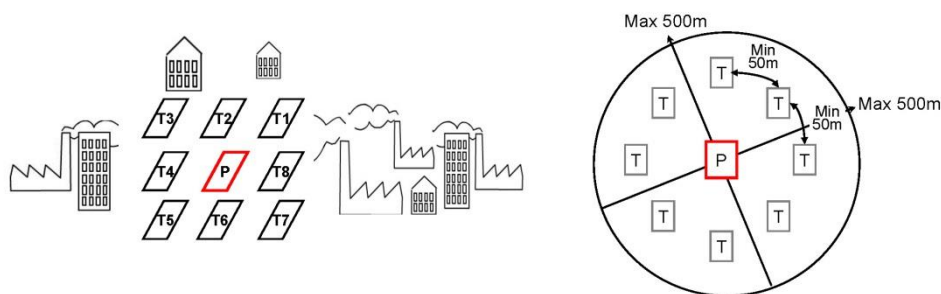


Figure 1 : Plan d'échantillonnage optimum dans une situation de pollution atmosphérique de proximité

Critère pour le choix de sols témoins représentatifs de la pollution atmosphérique de proximité

Afin de s'assurer que les huit sols T soient représentatifs de la pollution atmosphérique de proximité locale, il convient de respecter un ensemble de conditions. Les principales conditions sont détaillées dans ce qui suit.

1. Les huit sols T sont trouvés à proximité de la limite du sol P. Des situations peuvent se présenter où il n'est pas possible d'implanter les points d'échantillonnage à proximité directe du sol P (par exemple, le sol P se situe au bord de la Meuse). Les sols T pourront alors être recherchés sur des parcelles plus éloignées du sol P. Il est cependant recommandé de ne pas dépasser une distance de 500 m de la limite du sol P, car la quantité de retombées de PAP sur les sols peut varier sur de courtes distances. Il sera alors utile de justifier les emplacements choisis sur base de la connaissance des sources de pollution à l'origine de la PAP³.
2. Les sols T devront provenir d'un sol formé sur un matériau parental qui soit, dans la mesure du possible, identique à celui du sol P. Si les concentrations de fond recherchées concernent une zone très fortement touchée par la PAP, des sols T ayant des propriétés générales (texture et charge caillouteuse) similaires à celles retrouvées (ou ayant dû être retrouvées) sur le sol P peuvent convenir.
3. Il faut que les concentrations sur les huit sols ne soient pas dues à une pollution locale/ponctuelle⁴. Si à l'occasion de ces investigations, les sols T situés à la limite du sol P se révèlent être touchés par une pollution locale, il pourra être

³ Les informations pertinentes seront par exemple : le type d'activité industrielle, la localisation, le nombre et la hauteur de cheminées, la quantité produite, le procédé industriel utilisé, etc.

⁴ Contamination des sols affectant une aire relativement faible et due à une ou plusieurs sources bien identifiées et souvent très proches (quelques mètres à quelques kilomètres). Il s'agit généralement d'apports massifs, souvent associés aux exploitations minières, aux installations industrielles et à d'autres installations, tant en cours d'exploitation qu'après leur fermeture.

nécessaire de les considérer comme non représentatives des concentrations de fond.

4. Lors de la collecte d'échantillons, il convient de donner la préférence à des sols T dans lesquels l'enregistrement des pollutions atmosphériques de proximité est le mieux conservé. Il s'agit des sols « naturels » (qui ne sont pas des remblais⁵, et qui contiennent moins de 5 % d'artefacts) agricoles, de parcs ou de pelouses. Si l'on prélève des échantillons dans les prairies, les parcs ou les pelouses, il faut s'assurer qu'il s'agit de sols anciens et non d'une simple couche de « terre végétale » épandue, par exemple, sur un matériau de remblai. Il est fortement déconseillé de prendre comme échantillon de sol des échantillons provenant de remblais. En effet, dans l'état des connaissances actuelles, il est encore impossible de certifier qu'un remblai en un point donné puisse être considéré comme représentatif d'un hypothétique remblai « habituellement rencontré dans la région ». Les remblais d'une région donnée ont pu être déposés à différentes époques, et donc avoir reçu une quantité variable de retombées de PAP. Enfin, les remblais présentent des concentrations en polluants qui peuvent être très variables, allant de teneurs inférieures ou comparables aux sols « en place » jusqu'à des teneurs beaucoup plus élevées. Dans ce dernier cas, il est probable que les teneurs rencontrées relèvent d'une pollution locale (ex : remblai contenant des déchets industriels polluants), et ne conviennent donc pas pour déterminer les concentrations de fond.

Circonstance 2 : anomalie géochimique

Dans une situation d'anomalie géochimique, la méthode proposée pour déterminer la concentration de fond pour un sol (« sol P ») consiste à se baser sur les concentrations mesurées en profondeur et en surface dans huit échantillons de sols représentatifs de l'anomalie géochimique, provenant de huit sols témoins adjacents (« sols T »). Le plan d'échantillonnage optimum consiste à prélever les huit sols T suivant les quatre points cardinaux (N, S, O, E) et les quatre points intercardinaux (NE, NO, SE, SO). Les sols témoins T choisis doivent être situés à proximité du sol P de façon à être représentatif de l'anomalie géochimique locale⁶. Il est recommandé de trouver des sols T distants entre eux d'une vingtaine de mètres au minimum, et situés à une distance

⁵Les sols de remblais se reconnaissent à la présence d'artefacts (scories, débris de construction, charbon, schistes brûlés, verre, mâchefer, etc.). Le profil du sol n'y présente pas une succession naturelle d'horizons. Enfin, on peut y trouver des polluants organiques en concentrations plus élevées dans les horizons profonds (>50cm).

⁶ Pour les sols T adjacents au sol P, l'Article 7 du Décret « sols » accorde le droit de réaliser des travaux d'échantillonnage.

inférieure à 100 m des limites du sol P. Le schéma suivant illustre ce plan d'échantillonnage :

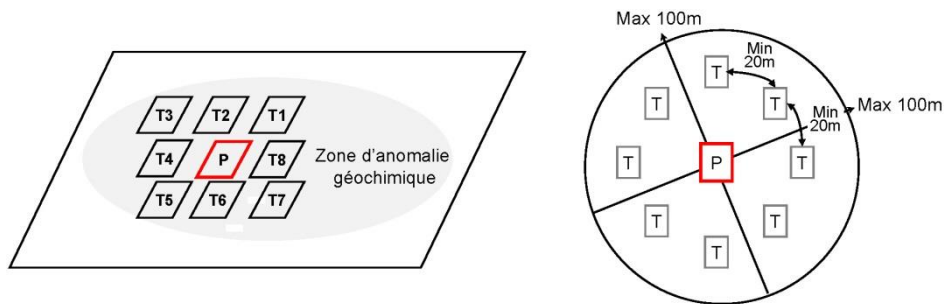


Figure 2: Plan d'échantillonnage optimum dans une situation d'anomalie géochimique. L'exemple donné ici correspond à une parcelle P de 10 ares. Schéma de gauche : vue en perspective. Schéma de droite : vue en plan.

Critère pour le choix de sols témoins représentatifs de l'anomalie géochimique

Pour s'assurer que les huit sols T soient représentatifs de l'anomalie géochimique lorsque l'on cherche à déterminer les concentrations de fond, il s'agit d'observer les conditions suivantes :

1. L'échantillonnage et l'analyse des résultats devront avoir pour objectif de montrer que les concentrations en polluants dans les sols témoins sont représentatives de l'anomalie géochimique et ne peuvent pas être expliquées par des causes liées à une pollution locale/ponctuelle (apports massifs, souvent associés aux installations industrielles, etc.) ou à une origine technogénique (technosols/remblais) des matériaux du sol. En particulier, les déchets d'exploitation minière ne peuvent pas être considérés comme représentatifs d'une anomalie géochimique.
2. L'emplacement des sols témoins T doit se faire sur base des informations disponibles sur l'extension supposée ou connue de l'anomalie géochimique, l'orientation de l'allongement de la formation géologique ou des filons métallifères, l'orientation générale des structures géologiques, la direction possible de migration des colluvions en réponse à la topographie, etc.
3. L'expert peut envisager de démontrer qu'il s'agit bien d'une anomalie géochimique. Pour cela, il pourra prélever une partie de ses sols témoins T (5 sur 8, par exemple) dans la zone d'anomalie, et le restant dans des sols témoins qui se trouvent dans la même situation géologique (en se basant sur la carte géologique de Wallonie) et pédologique (en se basant sur la carte des sols de Wallonie), mais en dehors de la zone d'anomalie.
4. Au sein des sols témoins, on privilégiera l'échantillonnage de sols « naturels » (qui ne sont pas des remblais⁷, et qui contiennent

⁷Les sols de remblais se reconnaissent à la présence d'artefacts (scories, débris de construction, charbon, schistes brûlés, verre, mâchefer, etc.). Le profil du sol n'y présente pas une succession naturelle d'horizons. Enfin, on peut y trouver des polluants organiques en concentrations non négligeables dans les horizons profonds (>50 cm).

moins de 5 % d'artefacts) agricoles ou forestiers, de parcs ou de pelouses. Les sols devront avoir une origine et des propriétés géopédologiques semblables au sol P.

5. Pour pouvoir être considéré comme représentatifs de l'anomalie géochimique, les sols témoins voisins devront présenter des teneurs anormales pour les mêmes polluants et à un niveau équivalent de celles retrouvées sur le sol P. L'existence d'une liaison entre les concentrations mesurées en surface et les teneurs en profondeurs devra être investiguée, ainsi que la présence en profondeur de concentrations importantes (ou même supérieures) aux concentrations en surface devra être mise en évidence.

2. Critères pour le prélèvement et l'analyse d'échantillons représentatifs

Afin d'obtenir dans les sols témoins (sols T) des échantillons qui permettent de déterminer les concentrations de fond, il est indispensable de respecter les conditions détaillées ci-dessous :

1. Il convient de sélectionner avec soin l'échantillon représentatif de la parcelle de sol T. Pour un sol agricole, il est indispensable de s'éloigner des bords de la parcelle, des endroits où des fertilisants auraient pu être entreposés, ainsi que du passage d'entrée du tracteur sur la parcelle. Pour un sol forestier, il faut s'éloigner des lisières et chemins, et éviter les sols remaniés (arbres renversés, terrier, etc.). Pour un sol de parc ou une pelouse, il faut se tenir à distance des murs de bâtiments, des chemins de passage et des bords de la parcelle.
2. Il est important d'utiliser des outils appropriés permettant de prélever un échantillon représentatif sans en modifier ses concentrations en polluants. Il convient notamment de faire attention à la contamination de l'échantillon par l'acier inoxydable (risque d'enrichir l'échantillon en Cr et Ni) et par le PVC (risque d'enrichir l'échantillon en certains polluants organiques). La prise d'échantillon de sol pour les polluants organiques exige des précautions particulières de conservation avant l'envoi au laboratoire d'analyse.
3. Deux échantillons doivent être prélevés dans chaque profil : un échantillon de sol représentatif de l'horizon de surface (0-20 cm) et un échantillon de sol représentatif dans un horizon de sol profond (>50 cm).
4. Les sols sous couvert forestier peuvent présenter des difficultés lors de l'échantillonnage : il convient de prendre un échantillon représentatif en surface (0-20 cm) en écartant l'humus qui le surmonte.
5. Également afin d'aider à l'interprétation des analyses pour la détermination des concentrations de fond, il est nécessaire de décrire le profil de sol et de positionner avec précision l'endroit dans le profil où a été prélevé l'échantillon de sol. La description doit comporter pour chaque horizon : épaisseur, couleur, texture (estimation de terrain), nature et proportion de la charge caillouteuse et/ou des artefacts.
6. Si l'on cherche à déterminer les concentrations de fond des polluants inorganiques, l'interprétation des résultats est facilitée si l'on analyse également les principaux facteurs pédologiques explicatifs des concentrations (teneur en fer, argile et matière organique).

Étape 3. Interprétation des résultats

L'objectif de cette étape d'interprétation des résultats d'analyse des huit sols témoins T est de vérifier si la concentration trouvée sur le sol P (parcelle investiguée) peut relever des concentrations de fond, ou de proposer une concentration de fond pour P. Pour atteindre cet objectif, il sera nécessaire au préalable de vérifier que chacune des concentrations mesurées sur les huit sols T est bien représentative des concentrations de fond locales au niveau du sol P. En pratique, cela consiste à vérifier (1) qu'il n'y a pas de valeurs mesurées aberrantes (anomalie analytique, pollution localisée, remblai non représentatif, etc.) et (2) que les rapports entre les concentrations trouvées en profondeur et en surface sont du même ordre sur tous les sols T (selon la situation : enrichissement identique par la PAP, ou même niveau d'anomalie géochimique).

La procédure d'interprétation des résultats devra donc répondre aux deux questions suivantes :

1. Les huit sols T relèvent-ils bien des concentrations de fond ?
2. Quelle concentration de fond proposer pour P ?

La procédure proposée passe par une représentation graphique des résultats obtenus. L'avantage attendu de cette représentation graphique est de permettre à l'expert de justifier et de communiquer à l'Administration le raisonnement sur lequel il s'appuie pour proposer la valeur de la concentration de fond. D'autre part, la représentation graphique des résultats doit permettre à l'Administration de juger de la façon plus complète possible du bien-fondé de la proposition de l'expert.

Cette procédure est expliquée à l'aide de l'exemple suivant :

Soit un sol (sol P) avec une concentration en polluant X de 18 mg/kg en surface et de 2 mg/kg en profondeur. On a échantillonné huit sols témoins (sols T1 à T8) selon la procédure décrite précédemment et l'on obtient les résultats présentés dans ce tableau :



Parcelle P	
Surface	Profond
18 mg/kg	2 mg/kg

Parcelle	Concentration (mg/kg)	
	Surface	Profond
T1	10	1.6
T2	140	2.2
T3	12	1.1
T4	120	1.6
T5	11	1.6
T6	15	1.8
T7	20	1.7
T8	13	1.8

Question 1. Les huit sols T relèvent-ils bien des concentrations de fond ?

Malgré le soin que l'expert aura mis pour obtenir des échantillons de sol représentatifs, il est probable que les huit concentrations puissent présenter des écarts les uns par rapport aux autres. Cette variabilité des mesures peut provenir de plusieurs sources. Par exemple, même après description du profil et identification des horizons, il n'a pas été possible de se rendre compte que l'on échantillonnait en réalité un remblai ou un sol témoin touché par une pollution locale. Une autre source de variabilité est l'effet de pépité. Cet effet se produit lorsque le polluant n'est pas réparti de façon homogène dans toute la masse du sol, mais se trouve sous forme concentrée au sein de particules peu nombreuses. Lors de la mesure des concentrations au laboratoire, le protocole d'analyse prévoit le prélèvement de quelques grammes de sol de l'échantillon, qui seront effectivement analysés. Il est possible, que lors de ce prélèvement, ces quelques grammes renferment une proportion de particules supérieure ou inférieure à la proportion présente dans le sol.

Afin de vérifier si chacun des huit sols T relève bien des concentrations de fond, il convient de réaliser des *diagrammes de dispersion* et des *diagrammes probabilité-probabilité* :

Diagramme de dispersion (en une dimension)

Les mesures de concentration des sols de surface, en profondeur et le rapport surface/profondeur dans les sols T sont représentées dans un diagramme de dispersion en une dimension, chaque point représentant une valeur. Les valeurs de la moyenne et de la médiane sont représentées par des symboles différents (ici : croix rouge pour la moyenne, barre rouge horizontale pour la médiane). Pour l'axe, on veillera à utiliser une échelle arithmétique afin de faciliter la lecture des résultats.

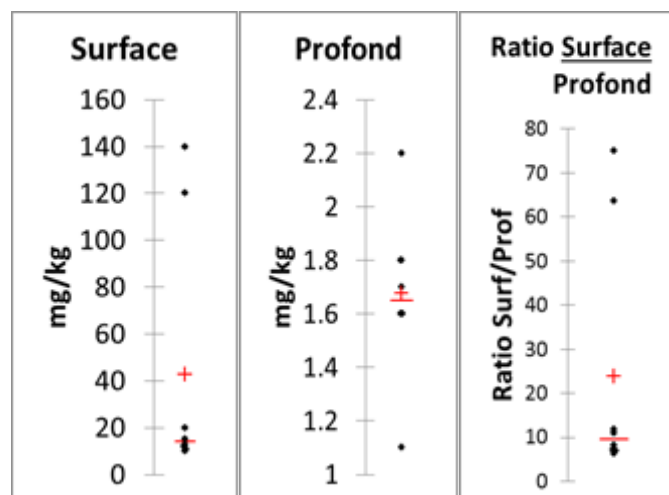


Figure 3 : Diagrammes de dispersion des mesures de sol de surface (Fig 3.1, à gauche), des mesures de sol profond (Fig 3.2, au centre) et des rapports surface/profond (Fig 3.3, à droite).

Diagramme probabilité-probabilité (P-P plot)

Les mesures de concentration en surface et en profondeur, ainsi que les ratios surface/profond (concentration mesurée en surface divisée par la concentration mesurée en profondeur) sont représentés dans un diagramme probabilité-probabilité (diagramme intitulé P-P plot, ci-dessous). Ce type de diagramme permet d'apprécier graphiquement s'il y a concordance entre une distribution observée et une distribution modèle théorique. Sur ce graphe, l'axe des abscisses indique les fréquences cumulées des concentrations observées, tandis que l'axe des ordonnées indique les probabilités cumulées correspondantes de la loi théorique. Le nuage des points s'aligne sur la droite en pointillé lorsque les concentrations mesurées suivent la distribution théorique (la loi de distribution théorique considérée ici est la loi normale). Si un sous-ensemble de points s'aligne sur une droite qui n'est pas orientée suivant la droite à 45°, c'est que ces points appartiennent à une distribution normale dont les paramètres sont différents de ceux de la distribution obtenue en considérant l'ensemble des points. Si le cas se présente, il sera par exemple possible de montrer à l'aide du diagramme P-P plot que les points appartiennent à deux populations. La droite sur laquelle s'alignent les points appartenant à la première population a une pente et une position différentes de la droite sur laquelle s'alignent les points appartenant à la seconde population. Ce diagramme peut-être facilement obtenu à l'aide d'un grand nombre de logiciels (le logiciel gratuit R, par exemple) ou d'un tableur, comme le tableur EXCEL de Microsoft. Sur base d'un exemple concret, l'annexe 1 de ce guide explique comment obtenir ces graphes en utilisant le tableur EXCEL.

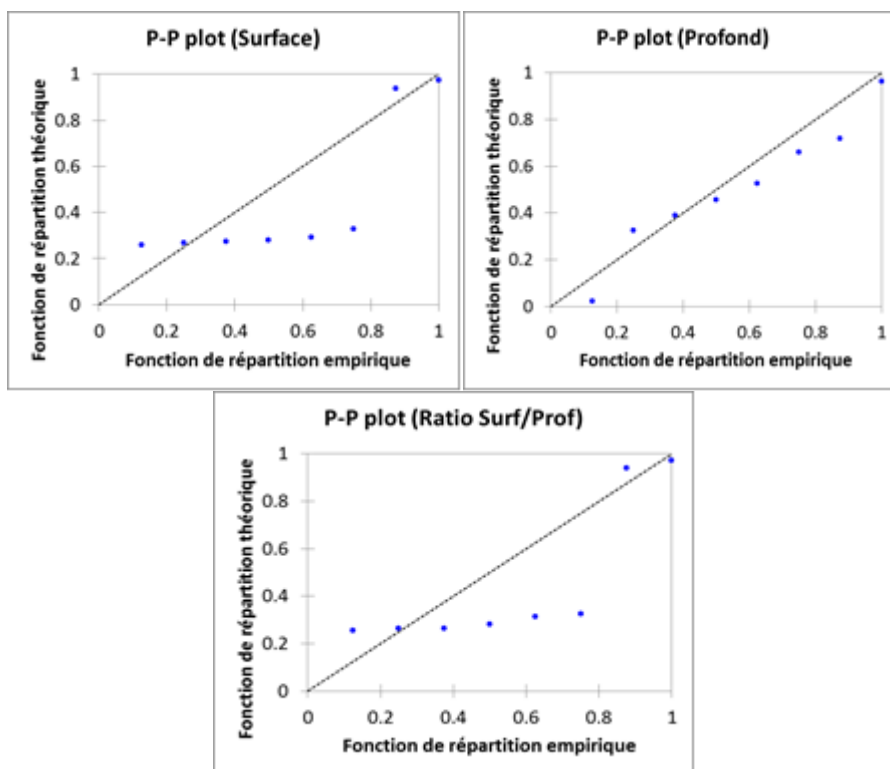


Figure 4 : Diagrammes probabilité-probabilité des mesures de sol de surface (Fig 4.1, en haut à gauche), des mesures de sol profond (Fig 4.2, en haut à droite) et des rapports surface/profond (Fig 4.3, en bas)

Les diagrammes (diagrammes de dispersion, voir Figure 3, et diagrammes probabilité-probabilité, voir Figure 4) sont ensuite examinés par l'expert pour détecter s'il y a des valeurs extrêmes ou plusieurs populations de concentrations :

Détection des valeurs extrêmes

Dans l'exemple de la Figure 4, les deux points les plus élevés (correspondant aux parcelles T2 et T4) dans le diagramme de dispersion des mesures en surface constituent des valeurs extrêmes (valant presque 10 fois les 6 autres concentrations). On peut suspecter que ces valeurs ne sont pas représentatives des concentrations de fond. Elles peuvent être dues par exemple à un effet de pépité analytique, ou à une pollution locale. La première hypothèse peut-être testée et répétant l'analyse des deux échantillons.⁸

⁸ Dans d'autres situations, il serait aussi possible de trouver des points anormalement bas. Par exemple, dans le cas d'une région touchée par la PAP, un point bas dans un diagramme de dispersion représentant les valeurs de concentrations trouvées en surface sur les huit sols T peut être dû au fait que ce point est relatif à un sol importé qui a été déposé postérieurement aux principales émissions de PAP dans la région du sol P.

Détection de la présence de plusieurs populations de concentrations

Dans l'exemple de la Figure 4, en profondeur, les points représentatifs des concentrations dans les huit sols témoins s'alignent sur la droite bissectrice (passant par les points (0,0) et (1,1)). Ceci indique que toutes les mesures de sol en profondeur appartiennent à la même population. Il n'y a donc pas de valeurs extrêmes ou aberrantes. Ce n'est pas le cas en surface, car deux points (Pop. 2 dans la Figure 5) s'alignent sur une droite dont les paramètres sont différents de la droite tracée sur base des six autres points :

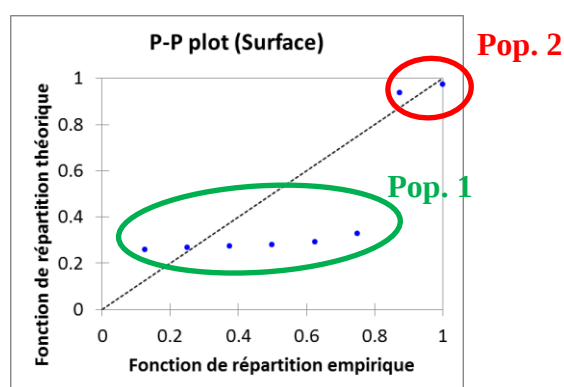


Figure 5 : Diagramme de probabilité-probabilité pour les résultats obtenus en surface. Présence de deux populations : la première est constituée par les six premiers points bas (Pop. 1, en vert), la seconde est constituée par les deux points hauts (Pop. 2, en rouge).

Ceci indique qu'il y a deux populations. L'existence de plusieurs populations peut être due à la présence de plusieurs types de sol dont l'un est plus riche en polluant. Le constat d'une population présentant des valeurs d'enrichissement différentes en surface peut être confirmé à l'aide du P-P plot représentant les ratios surface/profond (voir Figure 6).

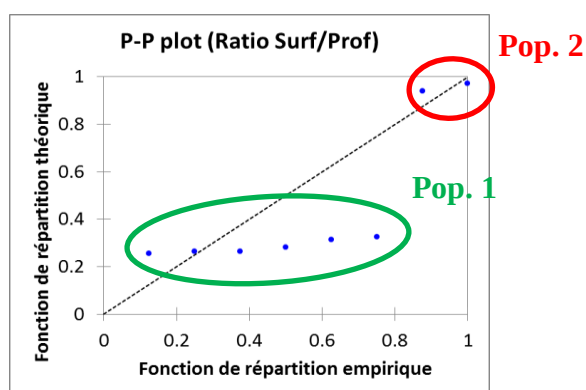


Figure 6 : Diagramme de probabilité-probabilité pour les ratios surface/profond. Présence de deux populations d'enrichissement des horizons de surface par rapport aux horizons profonds : la première population est constituée par les six premiers points bas (Pop. 1, en vert), la seconde est constituée par les deux points hauts (Pop. 2, en rouge).

Question 2. Quelle concentration de fond proposer pour P ?

La concentration de fond qui sera proposée devra tenir compte du fait qu'il puisse y avoir, dans les huit sols mesurés, l'un ou l'autre résultat présentant des valeurs extrêmes ou la présence de plusieurs populations (cf. Question 1). Le principe de la méthode proposée est d'utiliser les concentrations trouvées dans les sols T dont on a déterminé qu'ils sont représentatifs des concentrations de fond pour proposer une valeur de concentration de fond. Pour arriver à cette population de sols T représentatifs des concentrations de fond, il est possible que certaines concentrations mesurées sur des parcelles T, doivent être écartées. D'une façon générale, les concentrations écartées et les raisonnements pour les écarter doivent être clairement énoncés par l'expert.

Dans notre exemple, il semble raisonnable de considérer qu'il y a deux populations : la première population (Pop. 1 dans la Figure 5 et la Figure 6) représentative des concentrations de fond, et la seconde population (Pop. 2 dans la Figure 5 et la Figure 6) constituée de sols à écarter (pollution locale ou effet pépète analytique).

Comment savoir si la concentration trouvée sur P (le sol de la parcelle d'intérêt) peut être considérée comme une concentration de fond à partir des concentrations trouvées sur les sols T représentatifs des concentrations de fond ? On peut répondre à cette question par une méthode graphique, en représentant les valeurs de concentrations en surface des sols T représentatifs avec la valeur mesurée sur P dans un P-P plot, afin de vérifier que la valeur mesurée sur P appartienne bien à la population des concentrations de fond déterminée à l'aide des sols T.

La Figure 7 reprend, dans un P-P plot, les six valeurs de sols T représentatifs et la valeur de 18 mg/kg mesurée sur P de notre exemple :

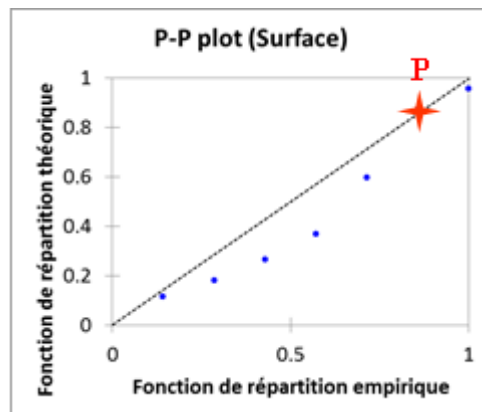


Figure 7 : Diagramme de probabilité-probabilité pour le sol P et les six sols T déterminés comme étant représentatifs des concentrations de fond lors de l'étape précédente.

On observe dans la Figure 7 que les sept points s'alignent relativement bien le long de la droite bissectrice (en pointillé). La valeur mesurée sur P (18 mg/kg, croix rouge) peut donc bien être considérée comme appartenant à la population des concentrations de fond.

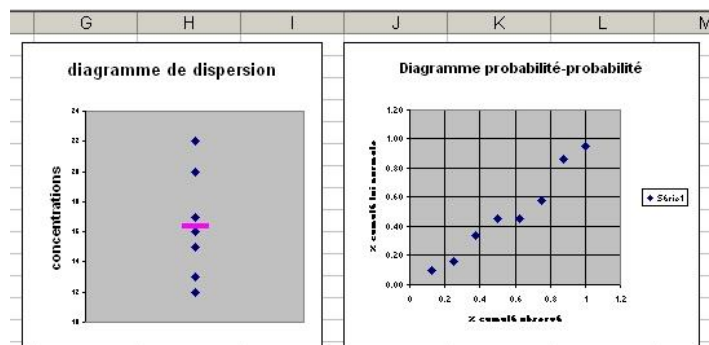
Pour obtenir la valeur de concentration de fond, on calcule la moyenne des valeurs mesurées sur les sols T dont on a déterminé qu'ils étaient représentatifs des concentrations de fond. Dans notre exemple, la moyenne des six sols T représentatifs = 13.5 mg/kg.

A titre illustratif, deux exemples supplémentaires d'interprétation des résultats sont donnés dans l'Annexe 2.

Annexe 1 : Comment obtenir le diagramme de dispersion et le diagramme probabilité-probabilité à l'aide de Microsoft Excel ?

L'exemple suivant montre comment obtenir le diagramme de dispersion et le diagramme probabilité-probabilité à l'aide du tableur Excel.

E3	=LOI.NORMALE(A3;A\$11;A\$13;VRAI)					
	A	B	C	D	E	F
1	concentrations		rangs	fréquence cumulée	prob. cumulée loi normale	
2	12		1	0.125	0.09	
3	13		2	0.25	0.16	
4	15		3	0.375	0.34	
5	16		4	0.5	0.46	
6	16		5	0.625	0.46	
7	17		6	0.75	0.57	
8	20		7	0.875	0.86	
9	22		8	1	0.95	
10	moyenne					
11	16.375					
12	écart-type					
13	3.335416016					
14						
15						



La démarche à effectuer pour obtenir ces graphes la suivante :

- Ranger les huit concentrations mesurées dans les sols témoins par ordre décroissant dans la colonne A (utiliser, si nécessaire, dans le menu Données, l'onglet Trier pour effectuer ce rangement en ordre croissant).
- calculer la moyenne (taper =MOYENNE(A2:A9) dans la cellule A11) et l'écart-type (taper =ECARTYPE(A2:A9) dans la cellule A13)
- créer une colonne comportant le rang des concentrations (colonne C, obtenue en donnant à la teneur la plus basse le rang 1 et à la teneur le plus élevée le rang 8)
- calculer les fréquences cumulées (colonne D = colonne des rangs (colonne C) multipliée par 1/8)
- calculer la probabilité cumulée de la loi normale (ou log-normale, si nécessaire) en utilisant la formule LOI.NORMALE(x;espérance;ecart_type;cumulative) (voir l'exemple du contenu de la cellule E3 dans la figure ci-dessus,

qui s'écrit dans le cas présent :

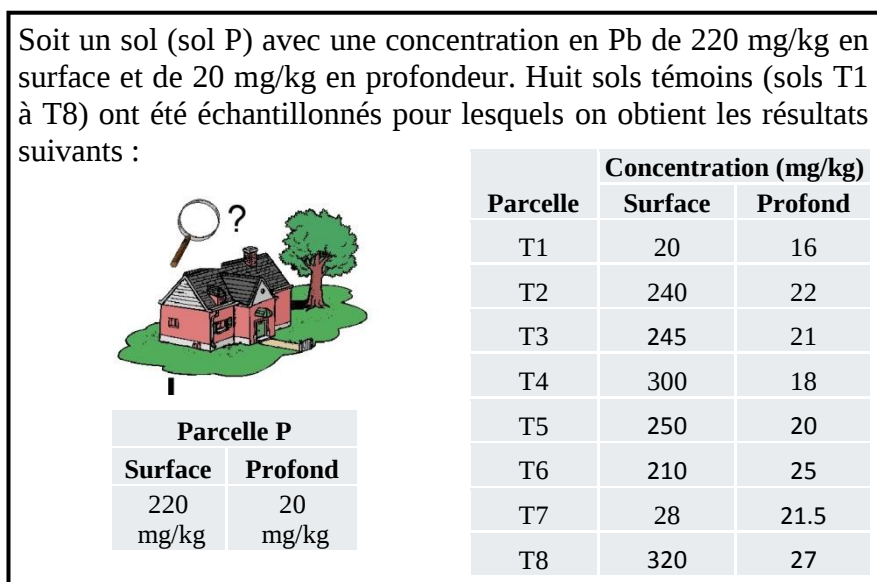
=LOI.NORMALE(A3;A\$11;A\$13;VRAI))

- f. créer un diagramme de dispersion portant les valeurs de la colonne A en ordonnées. Pour cela, créer une colonne de huit cellules de K2 à K9 contenant chacune la valeur 1. Le graphique s'obtient en choisissant, dans le menu Insertion : Graphique/Nuage de points/Plage de données, Série en colonne =Feuil1!\$A\$2:\$A\$9/Série/ Valeurs X =Feuil1!\$K\$2:\$K\$9. Indiquez la moyenne en faisant Série/Ajouter/Valeur X =Feuil1!\$K\$2 et Valeur Y =Feuil1!\$A\$11/Terminer. Ensuite, double cliquer sur l'axe des x du graphique pour choisir Echelle/Maximum et entrer la valeur 2 et, enfin, dans Motif/Graduation principale et Etiquette de graduation, choisir l'option Aucune. Finalement, cliquer sur la légende et l'effacer.
- g. créer un diagramme probabilité-probabilité comportant la colonne D en abscisses et la colonne E en ordonnées. Le graphique s'obtient en choisissant, dans le menu Insertion : Graphique/Nuage de points/Plage de données, Série en colonne =Feuil1!\$E\$2:\$E\$9/Série/ Valeurs X =Feuil1!\$D\$2:\$D\$9/Suivant/Quadrillage/ Quadrillage principal pour x et y/Terminer. Ensuite, double cliquer sur l'axe des abscisses et choisir Echelle/Maximum =1 et Unité principale = 0.2/. et faire la même chose pour l'axe des y. Finalement, supprimer la légende.

Annexe 2 : Exemples d'interprétation des résultats

Exemple 1 : Une concentration en Pb de 220 mg/kg sur un sol P. L'expert souhaite montrer que la concentration mesurée sur P est une concentration de fond explicable par la PAP.

Cette procédure est expliquée à l'aide de l'exemple suivant :



1. Quels sont les sols T représentatifs des concentrations de fond ?

En surface, le diagramme de dispersion montre qu'il y a deux points beaucoup plus bas que les autres (voir Figure 8.1).

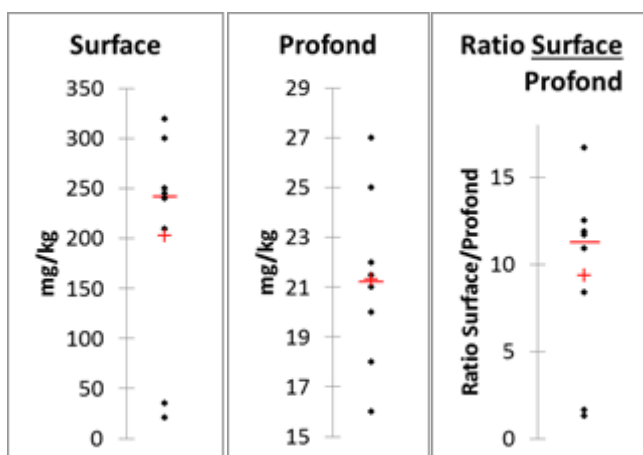


Figure 8 : Diagrammes de dispersion des mesures de sol de surface (Fig 8.1, à gauche), des mesures de sol profond (Fig 8.2, au centre) et des rapports surface/profond (Fig 8.3, à droite).

D'après le P-P plot, il y a deux populations de points, les deux points bas étant alignés sur une autre droite que les six points hauts (cf. Figure 9).

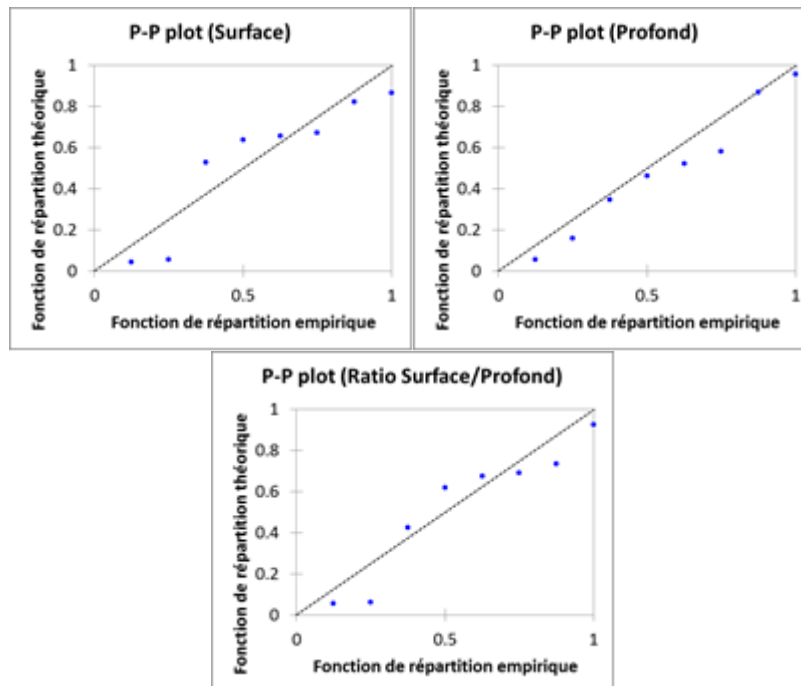


Figure 9 : Diagrammes probabilité-probabilité des mesures de sol de surface (Fig 9.1, en haut à gauche), des mesures de sol profond (Fig 9.2, en haut à droite) et des rapports surface/profond (Fig 9.3, en bas)

Ces deux points appartiennent à une autre population de points que celle des six points hauts. En profondeur, le diagramme de dispersion indique que les points sont bien répartis autour de la moyenne (croix rouge, environ 21.5 mg/kg), et le P-P plot montre que ces points sont bien alignés sur la bissectrice (en pointillé). Il n'y a donc pas de valeur aberrante à écarter au niveau des concentrations rencontrées en profondeur. Nous pouvons ensuite regarder le P-P plot du ratio surface/profond⁹. Le diagramme de dispersion indique un enrichissement variable de l'horizon de surface. L'horizon de surface est en moyenne environ 12 fois plus riche que l'horizon profond, avec un maximum d'environ 17 fois et un minimum d'environ 1.5 fois (pour deux points). Le P-P plot indique deux populations d'enrichissement en surface : les deux premiers points et l'alignement des six points qui suivent (cf. Figure 10).

⁹ Si on détecte qu'une valeur en profondeur est aberrante, le ratio surface/profond sera alors également aberrant pour le sol correspondant. Il faudra dès lors en tenir compte pour l'interprétation du diagramme probabilité-probabilité du ratio surface/profond.

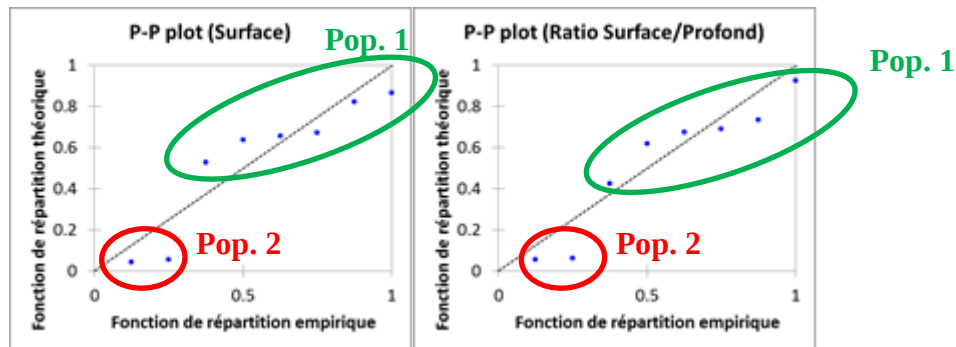


Figure 8 : Interprétation des diagrammes de probabilité-probabilité pour la surface et le ratio surface/profond

Ceci permet de justifier l'écartement des deux points bas de la population des concentrations de fond.

Il peut être utile de fournir d'autres éléments pour appuyer la justification de l'écartement des deux points bas. Ces éléments n'ont pas été fournis dans l'énoncé du problème, mais dans le cas présent, l'enquête terrain montre que ces deux points sont vraisemblablement des remblais (car on a trouvé des artéfacts, des fragments de briques, dans l'horizon profond), et les résultats analytiques indiquent qu'ils ont un enrichissement en Pb en surface inférieur aux six autres sols avoisinants. Ces sols ont donc probablement été déposés postérieurement aux principales émissions de PAP qui ont affecté la région du sol P dans le passé.

2. La concentration en Pb mesurée sur le sol de la parcelle P peut-elle être considérée comme concentration de fond ?

Pour répondre à cette question, on réalise un diagramme de probabilité-probabilité avec les six valeurs de T que l'on a déterminé comme étant représentatives des concentrations de fond (Figure 11). On y reporte ensuite la valeur mesurée sur P (220 mg/kg) :

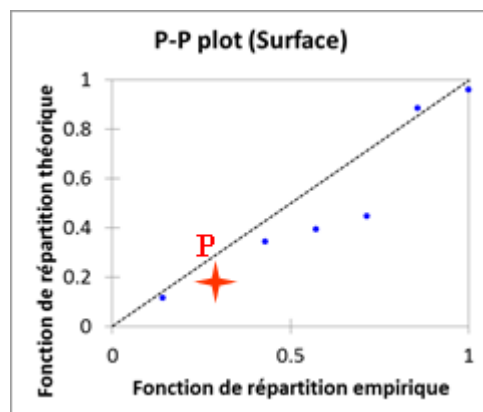


Figure 11 : Diagramme de probabilité-probabilité des mesures de surface sur lequel la valeur mesurée sur P a été reportée. Seules les six valeurs qui ont été déterminées comme étant représentatives des concentrations de fond sont considérées sur ce diagramme.

On observe ici que les sept points s'alignent raisonnablement bien dans l'axe de la droite bissectrice (en pointillé). La valeur mesurée sur P (220 mg/kg, croix rouge) peut donc bien être considérée comme appartenant à la population des concentrations de fond.

Exemple 2 : Une concentration en Cu de 90 mg/kg sur un sol P. L'expert souhaite montrer que 90 mg/kg est une concentration de fond explicable par un contexte géologique particulier.

Soit un sol (sol P) avec une concentration en Cu de 90 mg/kg en surface et de 320 mg/kg en profondeur. Huit sols témoins (sols T1 à T8) ont été échantillonnés pour lesquels on obtient les résultats suivants :



Parcelle P	
Surface	Profond
90 mg/kg	320 mg/kg

Parcelle	Concentration (mg/kg)	
	Surface	Profond
T1	95	350
T2	100	330
T3	110	380
T4	85	310
T5	40	100
T6	38	90
T7	35	80
T8	45	115

1. Quels sont les sols T représentatifs des concentrations de fond ?

En surface et en profondeur, les diagrammes de dispersion (Figure 12) indiquent qu'il y a deux populations de valeurs : les points élevés, avec des concentrations supérieures à 80 mg/kg en surface et à 300 mg/kg en profondeur, et les points bas, avec des concentrations inférieures à 50 mg/kg en surface et inférieures à 120 mg/kg en profondeur.

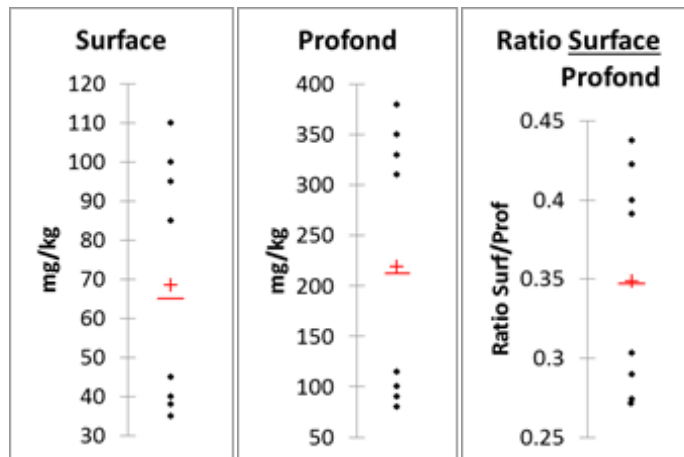


Figure 12 : Diagrammes de dispersion des mesures de sol de surface (Fig 12.1, à gauche), des mesures de sol profond (Fig 12.2, au centre) et des rapports surface/profond (Fig 12.3, à droite).

Ces deux populations sont aussi particulièrement bien discriminées à l'aide des P-P plot (Figure 13). On observe en effet que chacun des deux groupes de points s'alignent sur une droite qui lui est propre.

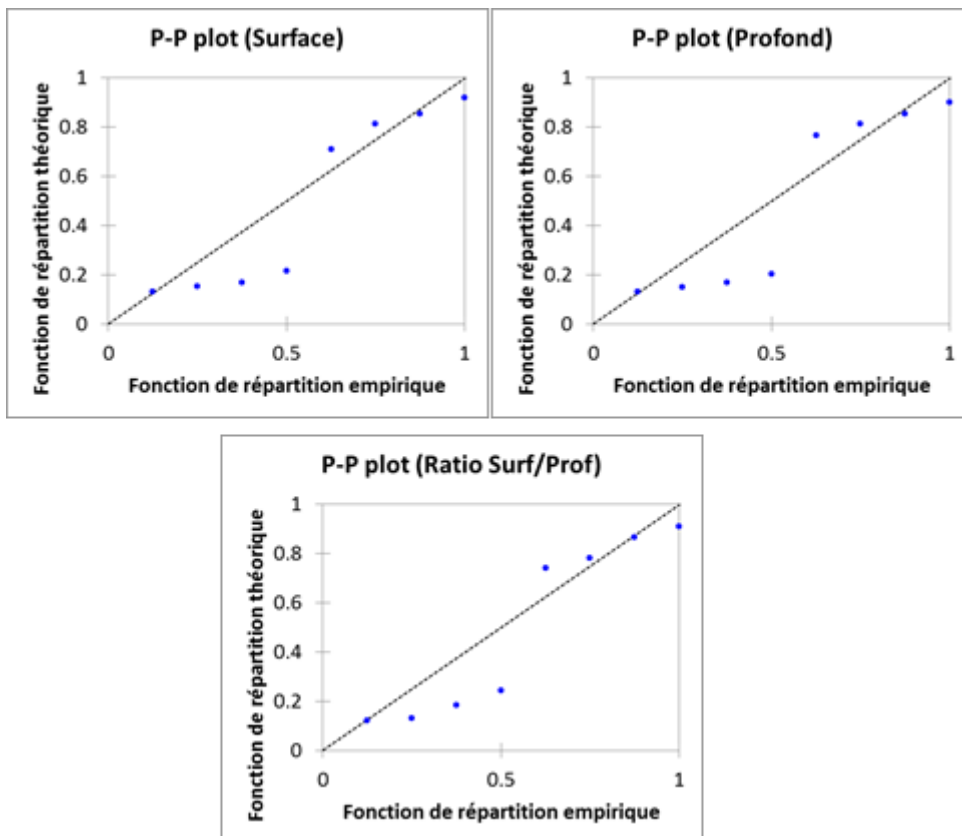


Figure 13 : Diagrammes de dispersion des mesures de sol de surface (Fig 13.1, à gauche), des mesures de sol profond (Fig 13.2, au centre) et des rapports surface/profond (Fig 13.3, à droite).

Il est ici particulièrement utile de reporter sur le plan de situation les résultats de l'échantillonnage en surface :

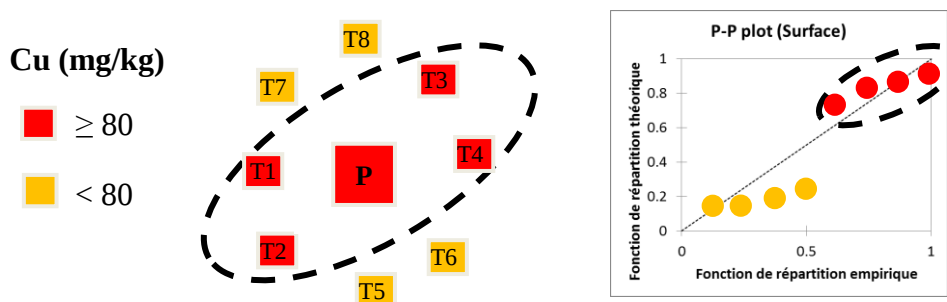


Figure 14 : Plan des situations des sols échantillonnés et P-P plot correspondant. Des couleurs différentes ont été attribuées aux points selon que les mesures en surface sont inférieures ou supérieures à 80 mg/kg.

La recherche d'informations sur l'environnement géologique du sol P indique qu'il est vraisemblable qu'un gîte métallifère soit présent en profondeur sous forme d'un filon disposé suivant un axe SO-NE, susceptible d'engendrer une anomalie géochimique dans les sols adjacents. Les valeurs plus élevées (T1, T2, T3, T4) correspondent au cœur de l'anomalie géochimique, avec un rapport de concentration surface/profond de l'ordre de 0.3 (diagramme de dispersion, voir Figure 12), tandis que les valeurs plus faibles (T5, T6, T7, T8) correspondent à des sols moins influencés par cette anomalie géochimique, avec un rapport de concentration surface/profond de l'ordre de 0.4. Le sol P est situé au cœur de la zone supposée d'anomalie géochimique, et présente un rapport de concentration surface/profond de 0.28, soit comparable à celui observé dans la population de valeurs hautes (T1, T2, T3, T4). La population de sols T représentatifs des concentrations de fond de la parcelle P sont ici les quatre sols T présentant les valeurs en Cu les plus élevées (T1, T2, T3, T4).

2. La concentration en Cu mesurée sur P peut-elle être considérée comme concentration de fond ?

Dans le cas présent, nous avons trop peu de points pour réaliser une interprétation graphique permettant de répondre à la question. Cependant, les quatre sols T représentatifs des concentrations de fond (T1, T2, T3, T4) ont des teneurs en Cu allant de 85 à 110 mg/kg. La valeur mesurée sur P, 90 mg/kg, est comprise dans cette gamme de concentrations. On peut donc conclure que la concentration en Cu de P peut être considérée comme une valeur relevant de la concentration de fond.

La population des points T5, T6, T7 et T8, bien qu'ayant des teneurs plus basses que les points T1, T2, T3 et T4, a néanmoins un rapport de concentration surface/profond de l'ordre de 0.4, ce qui traduit le fait que, pour ces points, les valeurs en profondeur sont beaucoup plus élevées qu'en surface. Si P ne s'était pas trouvé géométriquement au centre de l'anomalie, mais en bordure de celle-ci (par exemple, entre les points T7 et T8), c'est la population de sols T5, T6, T7 et T8 qui aurait été représentative des concentrations de fond pour la parcelle P.