

Intérêt des cartes des sols pour l'élaboration d'une stratégie d'échantillonnage en sols contaminés par retombées atmosphériques : application à l'étude de l'effet sol sur le devenir des éléments traces métalliques

Amandine Liénard, Laurent Bock, Gilles Colinet

Univ. Liège - Gembloux Agro-Bio Tech. Département des Sciences et Technologie de l'Environnement. Unité de Science du Sol. Passage des Déportés, 2. B-5030 Gembloux (Belgique). E-mail : Amandine.Lienard@ulg.ac.be

Les sites contaminés par des retombées d'éléments traces métalliques (ETM) tels que le cadmium, le plomb et le zinc ne sont pas rares en Wallonie (Belgique). Ces milieux enrichis en ETM sont dénommés « sites calaminaires » et sont le résultat du passé industriel de la région. L'objectif principal de cette étude est la caractérisation de la distribution multi-échelle des ETM dans ces sols et paysages contaminés. La stratégie d'échantillonnage développée dans cet article est basée sur l'étude de l'influence du type de sol et de son occupation sur la distribution des ETM, ceci en vue d'évaluer les risques encourus par des changements environnementaux, par exemple en cas d'exploitation agricole de zones boisées.

Mots-clés. Sol, éléments traces métalliques, spéciation, utilisation des terres, échantillonnage de sol, site calaminaire, Belgique.

Interest of soil maps to elaborate a sampling strategy in soils contaminated by atmospheric fallouts: application to the study of soil effect on the fate of metallic trace elements. As a result of pollution from atmospheric dusts, some sites of Wallonia (Belgium) are contaminated by metallic trace elements (MTE) such as cadmium, lead and zinc. These metalliferous soils are called 'calaminary sites'. The major aim of this study concerns the multi-scalar characterization of MTE distribution in these contaminated soils and landscapes. The strategy of sampling described in this paper is based on the influence of soil type and its land use on the fate of MTE. After analysis of collected samples, it will be possible to have an idea of the distribution of MTE among soil components, and therefore, to evaluate the risks caused by environmental changes such as an agricultural use of afforested areas.

Keywords. Soil, metallic trace elements, speciation, land use, soil sampling, metalliferous site, Belgium.

1. INTRODUCTION

Au cours des deux siècles passés, des usines présentes en Wallonie (Belgique) se sont spécialisées dans la transformation de minerais riches en métaux. Suite à leurs activités, elles ont émis des poussières chargées en éléments traces métalliques (ETM), principalement du cadmium, du plomb, du zinc et des fumées riches en oxydes acides (SO_2 , SO_3 , NO_2 , etc.) (Graitson, 2005). Ces retombées ont favorisé la formation de sites calaminaires¹, dont le sol est enrichi en ETM induisant une forte toxicité du milieu (Graitson, 2005 ; Graitson et al., 2005 ; Rosengarten, 2010). La majorité des sites calaminaires wallons se situent en province de Liège

dans les bassins de la Gueule, de la Vesdre et de la Basse Ourthe ainsi que dans la vallée de la Meuse. Leur surface est estimée à 360 ha (Graitson, 2005) (**Figure 1**). Les sites sont classés en trois grands types selon l'origine de la contamination :

- les sites primaires, qui sont les affleurements et les filons de minerais,
- les sites secondaires, qui sont soit les déblais résultant de l'exploitation des mines et des excavations, soit les cendrées et scories sous-produits des usines produisant le métal,
- les sites tertiaires qui résultent des retombées atmosphériques de particules métalliques (Duvigneaud et al., 1993 ; Saintenoy-Simon et al., 1996).

¹ Calaminaire : vient de Calamine, nom donné à un minerai de zinc silicaté. Il s'applique par extension à tous les milieux renfermant des teneurs élevées en zinc et en autres métaux lourds associés, tels que le plomb et le cadmium (Graitson, 2005).

Depuis longtemps, les naturalistes portent un grand intérêt à ces milieux calaminaires. La diversité de leur faciès ainsi que leurs origines diverses ont

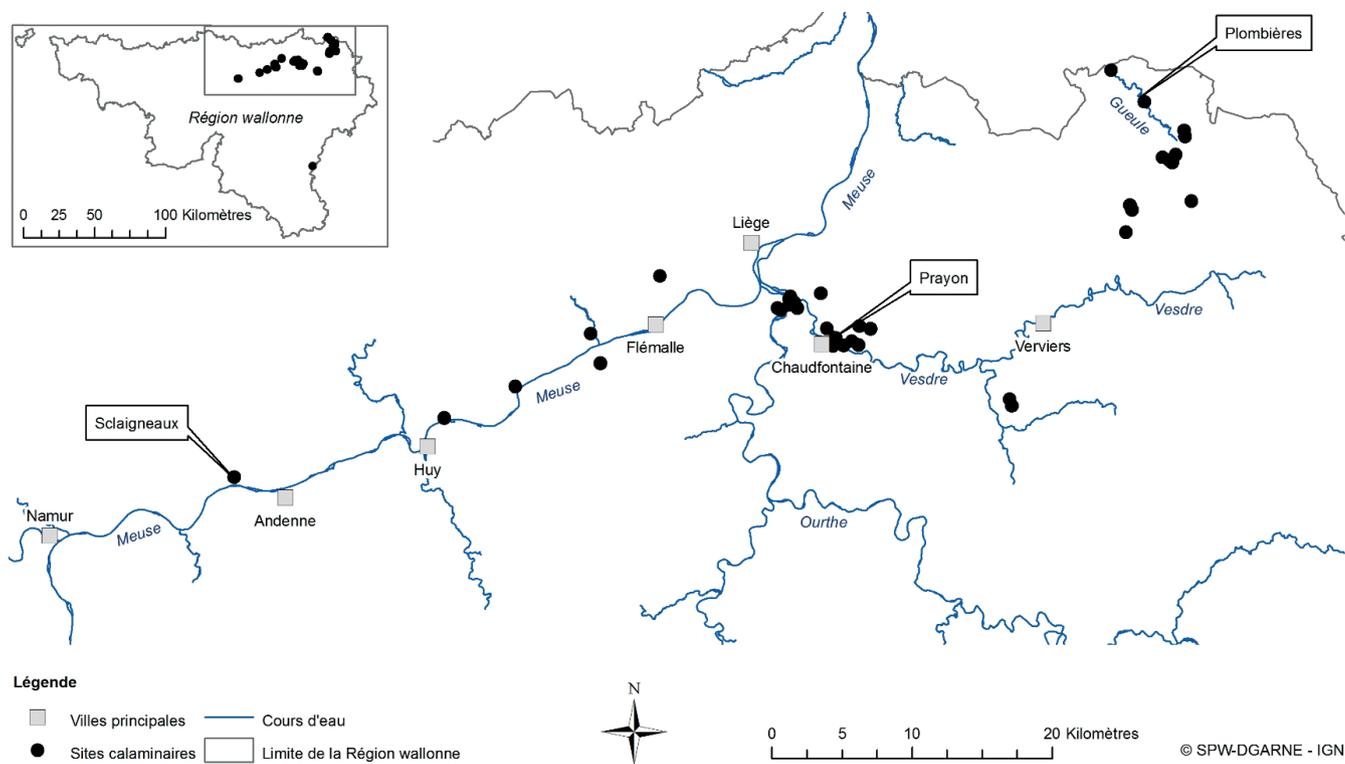


Figure 1. Répartition des sites calaminaires en Région wallonne — *Distribution of metalliferous sites in Walloon Region.*

permis le développement d'une flore spécifique, la flore calaminaire (Faucon et al., 2011). Cette flore est capable de coloniser ces milieux ouverts, pauvres en matières organiques et en nutriments mais riches en éléments toxiques comme les ETM (Bizoux et al., 2004 ; Faucon et al., 2011). Les taxons rares et endémiques de ces milieux sont classés en deux groupes (Lambinon et al., 1963 ; Graitson, 2005) : les métalphytes (taxons présents uniquement sur les sols calaminaires dans une région déterminée) et les pseudométalphytes (taxons également présents sur les sols non calaminaires). Grâce à cette diversité de milieux, les sites calaminaires attirent également une entomofaune formée pour la plupart d'espèces thermophiles. Ces insectes apprécient la végétation rase et éparse, ainsi que le microclimat chaud et sec des haldes² (Ertz et al., 2001 ; Graitson et al., 2005 ; Quoilin et al., 2007 ; Rosengarten, 2010).

Sans la présence des usines de traitements de minerais, la très grande majorité des sites calaminaires n'existerait pas. En effet, seuls quatre sites sur les trente-sept que compte la Wallonie sont de type primaire (Graitson, 2005). De fait, c'est en partie suite à la production de poussières dans l'environnement

proche des usines et par leur altération minérale dans les cours d'eau voisins que l'étendue des sols contaminés a dépassé largement les limites des sites calaminaires (Tordoff et al., 2000). Cette pollution diffuse peut avoir un impact sur la qualité des terres arables environnantes et engendrer des risques en matière de santé publique. Dans la région de Prayon (Province de Liège, Vallée de la Vesdre), dès 1964, Ramaut avait constaté que la contamination en zinc et les dégâts engendrés par les fumées chargées en SO₂ provenant des usines de la Société Métallurgique de Prayon (Nouvelle Montagne) s'étaient étendus au-delà de la vallée. L'ampleur de la dégradation des écosystèmes dépend de la nature et des quantités des retombées polluantes, de la direction des vents dominants, des précipitations atmosphériques, du relief, du type de sol et de la végétation originelle (Denaeyer-De Smet et al., 1974).

Outre leur action toxique sur la végétation, les poussières provoquent une contamination importante de l'horizon de surface des sols (Ramaut, 1964). Cette contamination de surface peut engendrer un risque pour la durabilité des écosystèmes, la qualité des productions végétales et la santé humaine et ceci même quand la contamination est moins lourde (Cambier et al., 2009). Dans ce cas, le risque n'est pas seulement dû à la quantité totale d'éléments traces présents dans le sol, mais bien à la capacité du sol à retenir un ETM et à empêcher son transport, soit à l'intérieur de la matrice solide, soit à l'extérieur de celle-ci (Blanchard, 2000).

² Halde : terme local d'origine germanique, désignant la station où ont été amassés les résidus provenant de l'exploitation ou de la transformation des minerais de zinc.

Les phases réactives des sols que sont les argiles, les carbonates, les oxydes métalliques, les silicates et la matière organique influencent la mobilité des ETM dans les sols. Ces divers constituants jouent en effet un rôle direct dans les relations d'échange (sorption, complexation et précipitation) entre phase aqueuse et solide (Blanchard, 2000 ; Citeau, 2004 ; Lamy et al., 2006).

Le devenir des ETM apportés aux sols dépend des constituants et des propriétés des sols, mais également de la végétation qui s'y développe ou de l'usage qui est fait du sol (Fernandez-Cornudet, 2006). L'objectif de nos recherches s'inscrit dans l'évaluation des risques liés à la mobilité environnementale des constituants métalliques. Les objectifs spécifiques sont d'évaluer les contributions respectives des facteurs sol, occupation et direction des vents sur l'ampleur de la contamination et sur l'évolution des contaminants dans le sol. Ce papier présente et discute la méthodologie d'échantillonnage qui a été conçue et appliquée à trois paysages contaminés, chacun d'eux entourant un site calaminaire.

2. MATÉRIEL ET MÉTHODES

2.1. Contexte historique des sites calaminaires

Les zones d'étude sont toutes trois centrées sur un site calaminaire de type secondaire et/ou tertiaire. Le choix des sites calaminaires s'est porté sur :

- le site de Sclaigneaux repris dans le site Natura 2000 « Vallée de la Meuse de Marche-les-Dames à Andenne » (Code BE35006), dont l'entière superficie est une réserve naturelle (Maingeot, 2003 ; Michaux, 2010),
- le site calaminaire de Prayon (La Rochette) qui fait partie du site Natura 2000 « Basse vallée de la Vesdre » (Code BE33016),
- l'ancien site minier de Plombières (Bleiberg) intégré dans le site Natura 2000 « Vallée de la Gueule en aval de Kelmis » (Code BE33006) dont une partie est érigée en réserve naturelle (Graitson, 2005).

Le contexte historique de formation des trois sites calaminaires (Sclaigneaux, Prayon et Plombières) est décrit dans les paragraphes suivants.

Dès le Moyen Âge, des veines de zinc et de plomb ont été découvertes à proximité du site de Sclaigneaux, au lieu-dit « Haies-Monet » (Dejonghe, 1998 ; Maingeot, 2003). Entre 1848 et 1873, une concession a été ouverte pour des mines de plomb, de zinc et de pyrite sur les anciennes communes de Landenne et Seilles (Dejonghe, 2010). Cette concession a fourni 40 000 tonnes de minerai concentré, soit environ 75 000 tonnes de minerai brut extrait (Dejonghe, 2010).

Parallèlement, dès 1856, la société Dumont installe ses fours à zinc au pied des falaises de Sclaigneaux (Michaux, 2010). Elle achète alors un ravin entre le ruisseau de Loysse et les rochers de Sclaigneaux, ravin qu'elle va combler à l'aide des déchets du traitement des minerais (De Nul, 2010). Vers 1880, de hautes cheminées sont construites sur la crête, elles sont reliées à l'usine et rejettent ainsi, jusqu'en 1940, des fumées fortement chargées en métaux lourds (plomb, zinc, cuivre, cadmium, arsenic, etc.) et oxydes gazeux de soufre et d'azote (Michaux, 2010). L'usine cesse toute activité en 1971 et les cheminées sont abattues au début des années 1980 (Michaux, 2010).

Les minerais de plomb du site de Prayon, plus précisément du lieu-dit « La Rochette », n'ont été découverts qu'au cours du 16^e siècle et seulement exploités à partir de 1730. De 1902 à 1925, la S.A. Vieille Montagne a extrait du plomb, du zinc et de la pyrite de la concession (Dejonghe et al., 1993). Auparavant vers 1829, l'industrie du traitement des minerais avait installé les premiers fours à zinc à proximité de Prayon. Ces derniers ont été transformés en une fonderie à zinc et plomb en 1851 (Jadot, 2007). Durant toute cette période et jusqu'en 1976, huit cheminées ont émis des fumées chargées en poussières métalliques à partir du complexe de traitement des minerais posté dans la vallée (Duvigneaud et al., 1987 ; Meerts et al., 2001 ; Jadot, 2007).

L'ancien site minier de Plombières apparaît dans la littérature pour la première fois en 1365. Cependant, son exploitation n'a démarré réellement qu'en 1828 (Dejonghe et al., 1993). En 1882, les gisements sont abandonnés par manque de rentabilité et suite aux problèmes d'exhaure dus à la Gueule toute proche. Cette fermeture a eu lieu après que quelque 115 000 tonnes de galène (sulfure de plomb) et 110 000 tonnes de blende (sulfure de zinc) aient été extraites (Dejonghe et al., 1993 ; Saintenoy-Simon et al., 1996). Malgré la fermeture de la mine, la fonderie a fonctionné avec cinq fours jusqu'en 1922 grâce aux tonnes de minerai importées par la société. Toutes les activités ont cessé entièrement en 1969 (Saintenoy-Simon et al., 1996 ; Dispas, 2009).

Le développement d'usines de traitements de minerais est à l'origine des trois sites. Dans un premier temps, les usines ont exploité les gisements existants : ceux de Plombières et Sclaigneaux qui sont dans les calcaires ou la dolomie du Dinantien et ceux de Prayon dans des calcaires plus anciens du Frasnien et du Givetien (Dejonghe, 1998). Chacune des concessions a été fermée par manque de rentabilité, l'extraction devenant trop contraignante. Les usines se sont alors tournées vers des minerais étrangers, plus riches en plomb et en zinc (Dejonghe et al., 1993).

Au niveau floristique, les trois sites se distinguent les uns des autres. L'ancien site minier de Plombières

(20 ha) présente la plus grande diversité d'espèces calaminaires avec cinq espèces métallophytes, le site de Prayon (75 ha) compte cinq espèces métallophytes dont deux introduites récemment, tandis qu'aucune flore métallophyte n'a été observée au sein de la réserve de Sclaigneaux (39 ha) (Graitson, 2005).

2.2. Délimitation des zones d'étude

Sur les sites calaminaires, la présence de teneurs élevées en ETM se remarque par une végétation rase et spécifique (Graitson, 2005 ; Rosengarten, 2010). Cependant, un amendement organique apporté aux sols peut détruire cette flore en donnant l'avantage absolu aux plantes classiques de la prairie pâturée (Hermanns et al., 1996). Dans ce cas, il est difficile de différencier sur le terrain un sol sain d'un sol contaminé sans en mesurer les teneurs. La tâche est d'autant plus complexe que les sols contaminés peuvent être urbains, agricoles ou forestiers et peuvent s'étendre sur une distance de plusieurs kilomètres (Cambier et al., 2009).

Actuellement en Europe, de nombreuses études ont été réalisées afin de diagnostiquer et modéliser l'ampleur et les effets toxicologiques des contaminations atmosphériques en ETM (Hough et al., 2004 ; Verma et al., 2007 ; Descamps et al., 2009 ; Gillet et al., 2009 ; Mench et al., 2009 ; van Oort et al., 2009). Un échantillonnage de qualité doit prendre en compte la complexité du milieu contaminé et présenter une échelle de perception adaptée à la question posée (van Oort et al., 2009). Cependant, il n'existe pas d'instructions ou de directives européennes en matière d'échantillonnage de sols contaminés (Theocharopoulos et al., 2001). Chaque pays a sa propre démarche et ses propres critères de sélection. Il n'est donc pas aisé de choisir un plan et un périmètre d'étude en se basant uniquement sur la littérature. De plus, les principaux critères qui orientent les campagnes d'échantillonnage sont généralement d'ordre économique (Back, 2007). Néanmoins, la caractérisation du milieu biophysique (relations entre géologie, relief, sols, utilisation des sols et historique des activités humaines) sur base des documents existants semble indispensable pour orienter l'échantillonnage dès qu'on souhaite évaluer les redistributions d'éléments dans les paysages en dehors des sites identifiés comme contaminés.

Dans le cadre de cette étude, le périmètre défini est une maille de 3 km de rayon centrée sur l'emplacement historique des cheminées des usines de traitements de minerai. Cette échelle de perception est suffisante pour à la fois prendre en considération le facteur de distance et rencontrer une importante diversité d'unités paysagères. De plus, la superficie d'environ 2800 ha de chaque zone d'étude est entièrement circonscrite dans un seul bassin versant : la Meuse aval, la Vesdre et la Gueule respectivement pour les zones de Sclaigneaux, Prayon et Plombières.

2.3. Méthodologie d'échantillonnage

La répartition des poussières contaminantes au sein d'un paysage est influencée par :

- la distance à la source de contamination,
- la direction des vents qui crée des zones plus exposées à la contamination,
- la nature des sols et leur position dans le relief qui conditionnent les redistributions d'éléments suite aux phénomènes d'érosion et aux migrations verticales, de même que leur vocation agricole ou forestière (Meshalkina et al., 1996 ; Fernandez-Cornudet, 2006 ; van Oort et al., 2009).

Par le plan d'échantillonnage développé ci-après, nous entendons déterminer l'importance relative des facteurs influençant la distribution spatiale des teneurs en ETM dans le paysage et leur devenir dans le sol.

L'échantillonnage a été stratifié en fonction des trois critères : position par rapport à la source, nature du sol et occupation. La même procédure a été appliquée aux trois zones d'étude. Les données cartographiques utilisées pour orienter l'échantillonnage sont :

- la Carte des Principaux Types de Sols de Wallonie à 1/250 000 (Bock et al., 2006), basée sur la Carte des Sols de la Belgique éditée à 1/20 000 par l'IRSIA de 1947 à 1991 (Legrain et al., 2011),
- la Carte d'Occupation des Sols de Wallonie (COSW) de 2005 à 1/10 000. Les données cartographiques sont exploitées à l'aide du logiciel *ArcGis 9.3*.

La procédure de sélection des plages de sols échantillonnées comporte six étapes (**Figure 2**) :

1. La CNSW250 et la COSW sont projetées et découpées à la dimension de la zone étudiée, soit un *buffer* de 3 km autour de l'emplacement des cheminées.
2. Parmi les principaux types de sols (PTS) de la CNSW250 répartis sur la zone, certains sont abandonnés faute de caractérisation suffisante. Ce sont les sols non cartographiés ou artificiels et les regroupements de complexes de sols de textures différentes ou sur fortes pentes et de sols de fonds de vallons limoneux ou rocailleux.
3. La COSW est utilisée pour sélectionner les occupations étudiées :
 - les terres arables, les cultures permanentes et les friches agricoles,
 - les surfaces enherbées,
 - les forêts et milieux semi-naturels respectivement dénommés dans cette étude culture, prairie et forêt.
4. Les deux nouvelles couches cartographiques ainsi créées sont croisées pour donner des entités « Sol Occupation ». Suite à cette étape, seule la superficie de sol conservée est celle couverte par les trois occupations choisies.

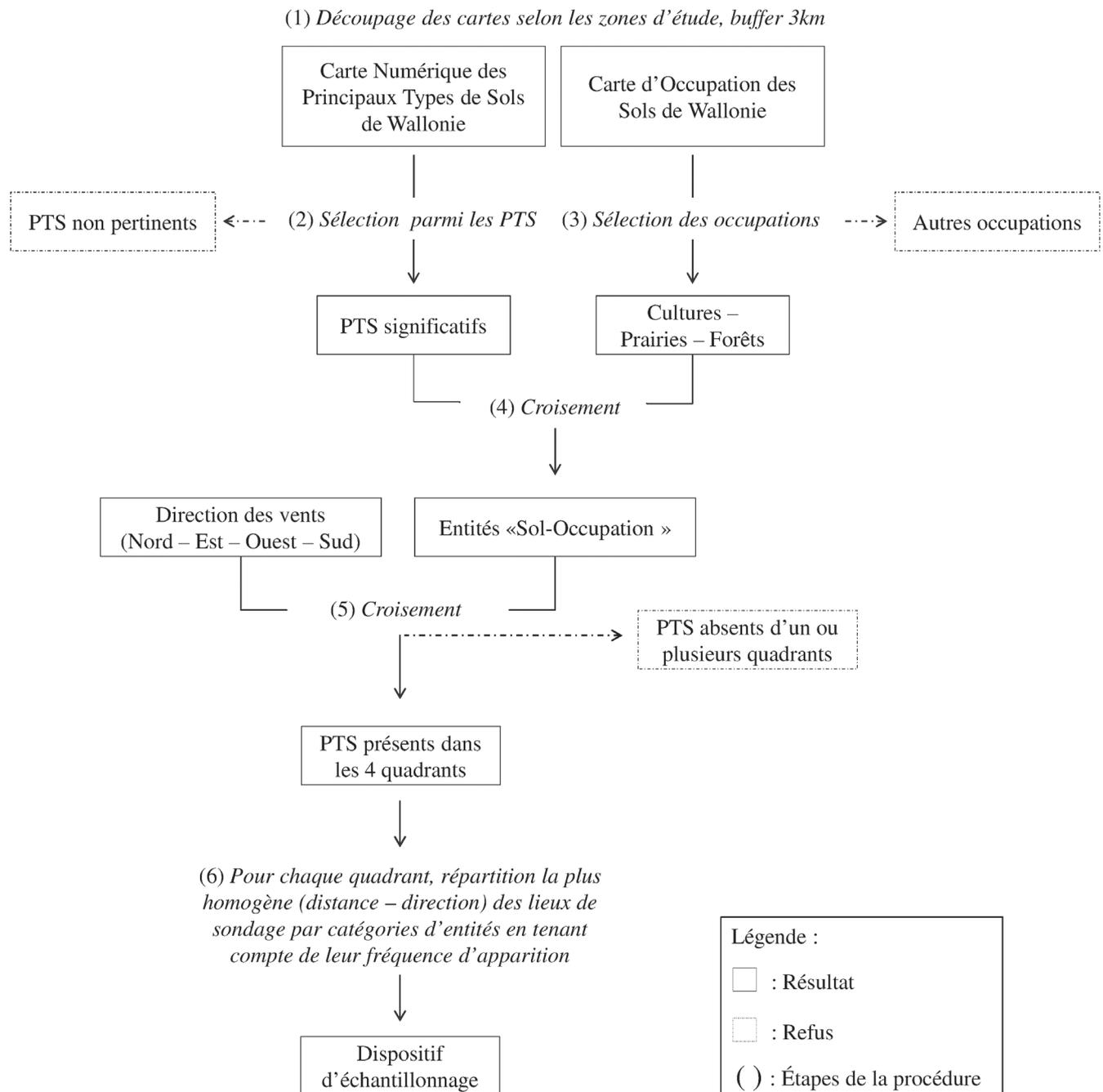


Figure 2. Procédure de sélection des principaux types de sols (PTS) échantillonnés — *Selection process of the main soil types sampled.*

5. Le troisième facteur pris en considération pour l'échantillonnage est la direction des vents. Pour le représenter, les zones d'étude sont divisées en quatre quadrants chacun orienté dans une direction, soit le Nord, le Sud, l'Est et l'Ouest. Seules les entités « Sol-Occupation » présentes dans tous les quadrants sont retenues pour les prélèvements. Par zone d'étude, il ne reste que trois principaux types de sols qui répondent aux critères précités.

6. La dernière étape consiste à identifier des points d'échantillonnage au sein des plages cartographiques retenues de manière à couvrir un maximum de gammes de distances au centre de la zone d'étude. Seules les plages de dimension pertinente, soit minimum 300 m², sont reprises dans le dispositif. Les combinaisons « Sol-Occupation » sont échantillonnées en fonction de leur importance surfacique. Cette approche doit permettre d'équilibrer le positionnement des échantillons sur l'ensemble du quadrant.

2.4. Analyse spatiale

La dispersion de la distribution spatiale des lieux de sondages est évaluée à l'aide de l'outil *Average Nearest Distance* du logiciel *ArcGis 9.3*. Cet outil mesure, pour chaque point, la distance comprise entre ce point et le point voisin le plus proche dans une zone d'étude de dimension fixe. Le traitement des points est réalisé séparément pour chaque type de sol et chaque occupation des zones d'étude. Le mode de calcul des distances se base sur la distance euclidienne, distance en ligne droite à vol d'oiseau. Les coordonnées métriques X et Y correspondent au système de projection belge Lambert 72.

La méthode repose sur la comparaison entre la moyenne de toutes les distances au plus proche voisin (D) et une moyenne calculée pour une distribution aléatoire hypothétique (d). Si D est significativement supérieure à d, les points sont considérés comme dispersés, si D est significativement inférieure à d, les points tendent à être groupés. Les *p-values* et les *z-scores* indiquent le niveau de signification statistique du test de l'hypothèse nulle du caractère aléatoire de la distribution des points dans l'espace, à savoir ni agrégée ni dispersée.

Une analyse variographique a ensuite été réalisée pour les trois principaux types de sols retenus et les 3 occupations du sol dans les différentes zones d'étude. Six variables binaires ont été créées pour chaque point de prélèvement, correspondant à une fonction d'appartenance à la classe considérée (PTS ou occupation). Chaque point forestier s'est ainsi vu attribuer la valeur 1 à la variable « Forêt » et 0 aux variables « Culture » et « Prairie », et ainsi de suite pour chaque variable. Un variogramme est alors modélisé pour chacune de ces variables. Celui-ci exprime la continuité spatiale des différents facteurs et leur degré d'autocorrélation spatiale.

3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

Le dispositif d'échantillonnage obtenu par cette méthodologie (**Figure 3**) est de type stratifié et raisonné. Stratifié car les points sont classés suivant l'importance de chaque facteur : type de sol, occupation et orientation. Raisonné car le positionnement des lieux de sondage a été choisi et pointé manuellement sur écran de manière équilibrée sur l'ensemble des quadrants et de la zone. Le nombre d'échantillons récoltés par campagne est variable, soit 196, 231 et 256 respectivement pour Prayon, Plombières et Sclaigneaux (**Tableau 1**). Cette différence quantitative est due à la fréquence de rencontre des entités « Sol-Occupation » par quadrant. Leur nombre a permis dans certains cas de répéter les sondages jusqu'à 14 fois.

L'échantillonnage est donc proportionnel plutôt qu'équilibré, chaque entité étant échantillonnée en fonction de son importance surfacique. Lorsque des répétitions sont possibles, plusieurs positionnements sont prévus afin de répartir l'échantillonnage sur différentes gammes de distance à la source (**Figure 4** et **Tableau 2**). Néanmoins, la répartition des sondages selon la distance n'est pas comparable entre les zones car elle dépend fortement des modèles de distribution des sols et de leurs occupations.

Un des sols retenus est commun aux trois zones étudiées, il s'agit du sol limoneux à drainage naturel modéré ou imparfait (code 4020) (**Tableau 1**). Ce type de sol permettra une comparaison entre les zones. Les sols uniquement présents sur une zone reflètent les caractéristiques intrinsèques de celle-ci.

3.1. Relation entre type de sol et occupation du sol

Les types de sols étudiés sur la zone de Sclaigneaux sont des sols limoneux dont le drainage naturel est « favorable » (code 4010) ou « modéré ou imparfait » (code 4020) et des sols limono-caillouteux à charge de silexite ou de gravier ou de conglomérat et à drainage naturel principalement favorable (code 7610) (**Tableau 1**). Ces trois types de sols représentent 67 % de la superficie de sols pouvant être choisis lors de la procédure de sélection (**Tableau 3**). C'est dans la partie centrale de la zone d'étude traversée par la Meuse que se rencontrent les sols à charge de silexite et de graviers issus des dépôts de terrasse et/ou d'anciennes alluvions de la Meuse. Ces dépôts sont très caillouteux et constitués de fragments rocheux aux arêtes émoussées (cailloux roulés) de nature très diverse (Oldenhove de Guertechin, 1973). Au nord du sillon, les plateaux sont principalement recouverts de sols limoneux à drainage variable selon leur disposition dans le relief. Cette partie nord de la zone correspond à la bordure sud de la région limoneuse également dénommée « Hesbaye ». Celle-ci est exploitée par de grandes cultures annuelles et des prairies en fonds humides pour laisser les quelques boisements sur les sols moins profonds et les sols de versants (Oldenhove de Guertechin, 1973). Par contre, la partie sud de la zone marque la bordure nord du plateau condruzien et l'apparition de sols gréseux à drainage variable entrecoupés de sols schisteux et de placages limoneux. Le mode d'exploitation agricole qui y est pratiqué se rapproche d'un type mixte agriculture-élevage (Oldenhove de Guertechin, 1973). Les pratiques agricoles de la zone sont centrées sur la culture et la prairie qui se partagent équitablement les surfaces arables (Feltz et al., 2010). Le relief mouvementé conditionne la présence de nombreux bois sur les pentes des ruisseaux affluents de la Meuse (Feltz et al., 2010). Cette répartition des occupations dans les paysages de la zone d'étude se traduit par un

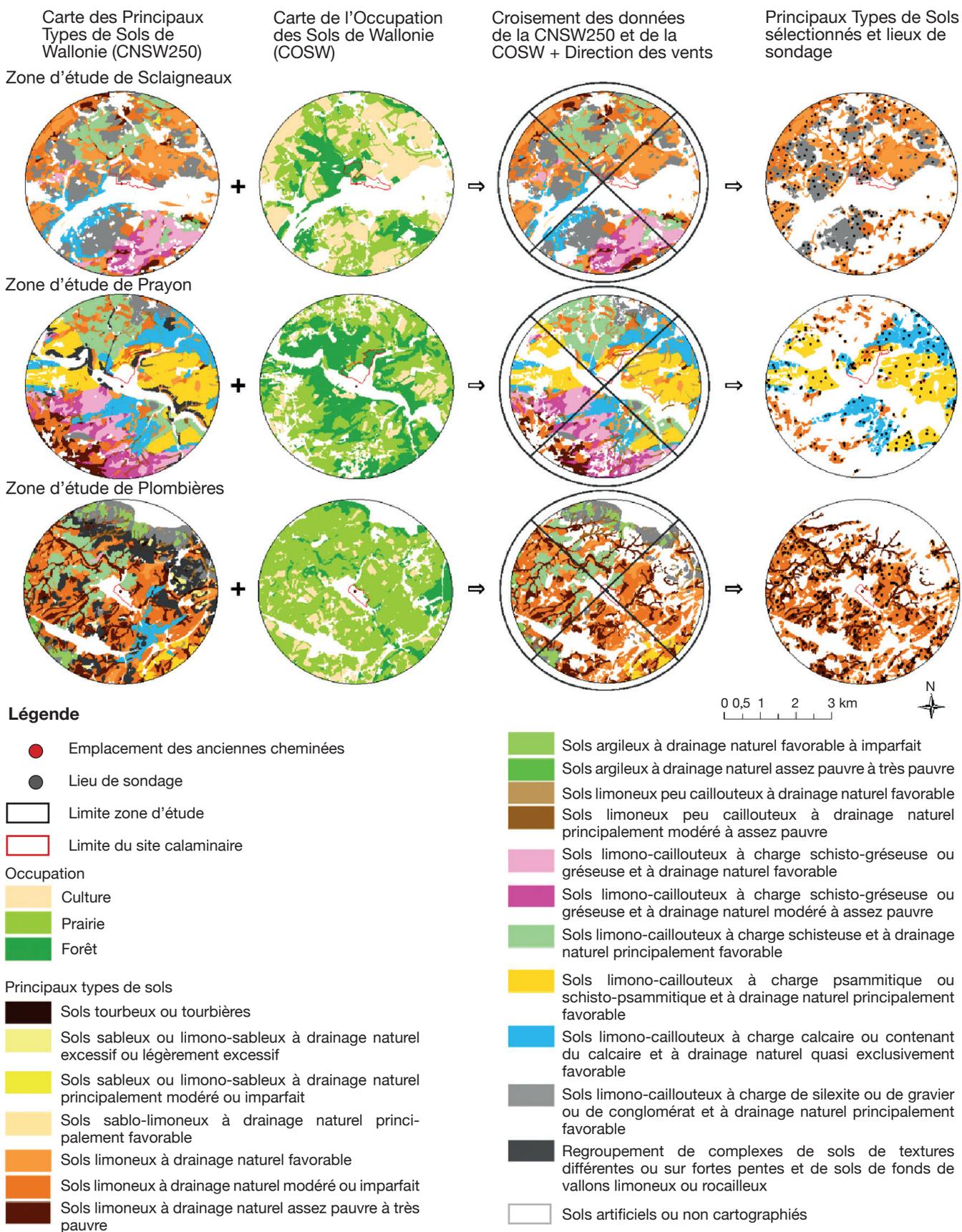


Figure 3. Description de la méthodologie utilisée afin de définir les plans d'échantillonnage (Licence d'utilisation SPW-DGO3 n°391) — Description of methodology used in order to define sampling design (Licence of use SPW-DGO3 n°391).

Tableau 1. Nombre d'échantillons prévus par le plan d'échantillonnage pour chaque zone d'étude suivant le type de sol, l'occupation du sol et la direction des vents — *Number of samples planned by device of sampling for each zone of study by soil type, land use and wind direction.*

Type de sol	Culture					Forêt					Prairie					Total
	Est	Nord	Ouest	Sud	Total	Est	Nord	Ouest	Sud	Total	Est	Nord	Ouest	Sud	Total	
Zone d'étude de Sclaigneaux																
4010	8	9	11	7	35	1	8	10	2	21	7	12	8	3	30	86
4020	6	10	11	13	40	1	8	2	3	14	2	11	6	11	30	84
7610	7	8	10	10	35	2	6	10	2	20	1	10	8	12	31	86
Total	21	27	32	30	110	4	22	22	7	55	10	33	22	26	91	256
Zone d'étude de Prayon																
4020	3	5	4	6	18	2	5	2	5	14	5	8	7	6	26	58
7410	7	3	3	3	16	5	5	9	5	24	7	6	6	6	25	65
7510	5	5	3	5	18	8	5	5	7	25	8	6	7	9	30	73
Total	15	13	10	14	52	15	15	16	17	63	20	20	20	21	81	196
Zone d'étude de Plombières																
4010	6	4	8	4	22	5	3	4	3	15	9	4	10	9	32	69
4020	6	5	10	10	31	5	2	2	7	16	9	9	10	9	37	84
4030	5	5	6	6	22	5	5	5	3	18	8	7	14	9	38	78
Total	17	14	24	20	75	15	10	11	13	49	26	20	34	27	107	231

4010 : sols limoneux à drainage naturel favorable — *loamy soils with good natural drainage* ; 4020 : sols limoneux à drainage naturel modéré ou imparfait — *loamy soils with moderate or imperfect natural drainage* ; 4030 : sols limoneux à drainage naturel assez pauvre à très pauvre — *loamy soils with fairly poor to very poor natural drainage* ; 7410 : sols limono-caillouteux à charge psammitique ou schisto-psammitique et à drainage naturel principalement favorable — *loamy-stony soils, micaceous flagstone or shale/micaceous flagstone load, with mainly good natural drainage* ; 7510 : sols limono-caillouteux à charge calcaire ou contenant du calcaire et à drainage naturel quasi exclusivement favorable — *loamy-stony soils, limestone load, with almost exclusively good natural drainage* ; 7610 : sols limono-caillouteux à charge de silexite ou de gravier ou de conglomérat et à drainage naturel principalement favorable — *loamy-stony soils, silicite or gravel or conglomeratic load, with mainly good natural drainage*.

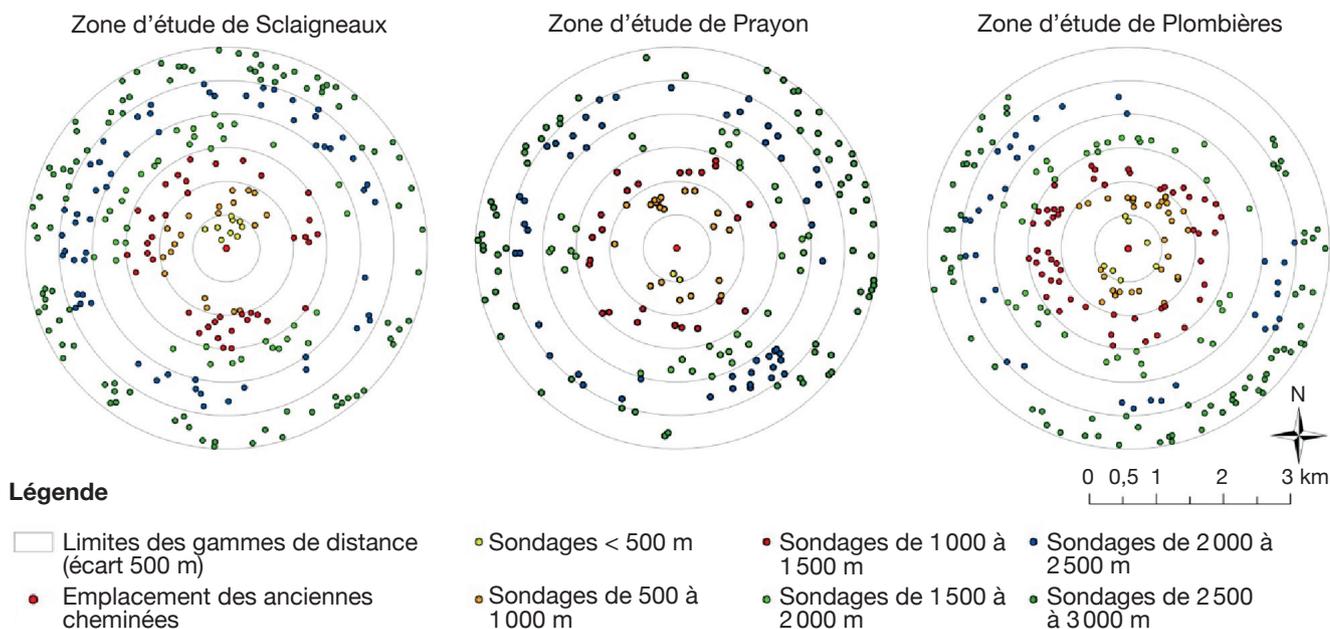
**Figure 4.** Répartition des échantillons selon la distance à la source de contamination — *Distribution of samples according to the distance from contamination source.*

Tableau 2. Nombre d'échantillons prévus par gamme de distance à la source de contamination selon le type de sol et l'occupation du sol — *Number of samples planned by range of distance according to soil type and land use.*

Distance (m)	Superficie (ha)	Total sondage	Sondage (Quantité·km ²)	Nombre de sondage / Type de sol			Nombre de sondage / Occupation		
				4010	4020	7610	Culture	Forêt	Prairie
Zone d'étude de Sclaingneaux				4010	4020	7610			
500	78	9	12	1	1	7	3	5	1
500-1000	235	19	8	10	2	7	4	10	5
1000-1500	392	38	10	11	13	14	20	8	10
1500-2000	549	36	7	13	8	15	18	9	9
2000-2500	706	60	8	16	21	23	21	9	30
2500-3000	863	94	11	35	39	20	44	14	36
Zone d'étude de Prayon				4020	7410	7510			
500	78	2	3	0	0	2	1	1	0
500-1000	235	20	9	5	6	9	3	9	8
1000-1500	392	25	6	9	9	7	5	12	8
1500-2000	549	34	6	9	12	13	8	10	16
2000-2500	706	49	7	13	24	12	13	14	22
2500-3000	863	66	8	22	14	30	22	17	27
Zone d'étude de Plombières				4010	4020	4030			
500	78	7	9	5	1	1	0	2	5
500-1000	235	30	13	8	13	9	11	7	12
1000-1500	392	52	13	16	18	18	19	11	22
1500-2000	549	36	7	12	12	12	13	5	18
2000-2500	706	34	5	7	12	15	8	7	19
2500-3000	863	72	8	21	28	23	24	17	31

Type de sol : voir légende du **tableau 1** — *soil type: see legend of table 1.*

nombre de prélèvements élevé en cultures et en prairies avec, respectivement, 43 % et 35,5 % des prélèvements (**Tableau 4**). Les forêts occupent souvent les pentes escarpées des ruisseaux ou certaines crêtes sur des sols non représentatifs de la zone et ne représentent que 21,5 % des échantillons prélevés sur les trois sols sélectionnés.

La zone de Prayon se situe entre le bocage occidental du pays de Herve (au nord), le massif de la Vesdre (au centre) et l'Ardenne liégeoise (au sud) (Pahaut, 1963). Les sols y sont très différents et très diversement distribués. De fait, la partie du bocage occidental regroupe des sols limoneux à drainage modéré ou imparfait et des sols à charges psammitiques et schisteuses. Le massif de la Vesdre comprend les sols de versants sur calcaire qui alternent avec des sols psammitiques, le tout entrecoupé de placages limoneux. Tandis que la partie située en Ardenne liégeoise est majoritairement gréseuse avec, sur ses plateaux, des sols limoneux peu caillouteux à

drainage naturel imparfait à pauvre (Pahaut, 1963). Il existe une grande diversité pédologique sur cette zone mais les exigences de l'échantillonnage excluent les matériaux mal répartis. Le choix s'est orienté vers les sols limono-caillouteux à charge calcaire ou contenant du calcaire et à drainage naturel quasi exclusivement favorable (code 7510), les sols limono-caillouteux à charge psammitique ou schisto-psammitique et à drainage naturel principalement favorable (code 7410) et les sols de type limoneux à drainage naturel modéré ou imparfait (code 4020) (**Tableau 1**). Au niveau surfacique, ils représentent 47 % des sols pouvant faire partie de l'échantillonnage (**Tableau 3**). Le sol 4020 ne couvre que 10 % de la surface, mais est un des rares PTS à être présent dans tous les quadrants de manière homogène. D'un point de vue paysager, la zone de Prayon se situe dans la Basse Vesdre, partie la plus encaissée de la vallée avec un relief entaillant des versants abrupts et fermée par des fonds étroits (Godart et al., 2007a). Les occupations du sol sont influencées

Tableau 3. Superficie couverte (en ha) par chaque type de sol toutes occupations confondues et pour les trois occupations sélectionnées, pour chaque zone d'étude et leur proportion (%) par rapport à la surface totale recouverte par tous les sols exceptés les sols non cartographiés ou artificiels et les regroupements de complexes de sols de textures différentes ou sur fortes pentes et de sols de fonds de vallons limoneux ou rocailloux, par zone d'étude — *Surface covered (in ha) by each soil type all merged land uses and for the three selected land uses, for each study area and their proportion (%) according to the surface covered by all soils excepted artificial and unmapped soils and group of soil complexes of different textures or on steep slopes and soils of rocky or loamy dale floors, by studied area.*

Type de sol	Superficie (toutes occupations)		Superficie (culture, forêt, prairie) (ha)
	ha	%	
Zone d'étude de Sclaigheaux			
4010	605	29	517
4020	313	15	284
7610	481	23	386
Zone d'étude de Prayon			
4020	219	10	160
7410	488	23	424
7510	300	14	269
Zone d'étude de Plombières			
4010	247	13	211
4020	726	37	631
4030	297	15	266

Type de sol : voir légende du **tableau 1** — *soil type: see legend of table 1.*

par ce relief et les propriétés des sols. On rencontre principalement des boisements, occupation dominante dans le paysage mais confinée sur les versants de la Vesdre et de ses affluents (Godart et al., 2007a). Ils n'occupent pas toujours les trois sols étudiés sur la zone et ne représentent que 31,2 % des sondages prévus (**Tableau 4**). L'occupation la plus échantillonnée est la prairie, soit 41,3 % des prélèvements. Le reste est échantillonné dans le peu de cultures mises en labour sur les anciennes couronnes de prairies entourant les villages. Les cultures ne pouvant s'accommoder des sols de faible aptitude agricole, acides et peu profonds des versants (Pahaut, 1963 ; Godart et al., 2007a).

Les sols de Plombières sont des sols limoneux peu caillouteux relativement épais. La minorité de sols de type limono-caillouteux que la zone présente se situe sur les plateaux. Dans ce cas, le manteau mixte comprend des éléments du substrat et une couverture limoneuse plus ou moins épaisse (Pahaut, 1965). De fait, les trois

Tableau 4. Représentativité des différentes combinaisons d'objets « type de sol » et « occupation du sol » par zone d'étude (en %) — *Representativeness of the various combinations of the objects, "soil type" and "land use" by zone of study (in %).*

Type de sol	Culture	Forêt	Prairie
Zone d'étude de Sclaigheaux			
4010	40,7	24,4	34,9
4020	47,6	16,7	35,7
7610	40,7	23,3	36,0
Zone d'étude de Prayon			
4020	31,0	24,1	44,8
7410	24,6	36,9	38,5
7510	24,7	34,2	41,1
Zone d'étude de Plombières			
4010	31,9	21,7	46,4
4020	36,9	19,0	44,0
4030	28,2	23,1	48,7

Type de sol : voir légende du **tableau 1** — *soil type: see legend of table 1.*

sols sélectionnés par la méthodologie d'échantillonnage sont tous des sols limoneux dont le drainage naturel varie de « favorable » (code 4010) à « assez pauvre à très pauvre » (code 4030) en passant par « modéré ou imparfait » (code 4020) (**Tableau 1**). À eux trois, ces types de sols couvrent 65 % de la zone d'étude (**Tableau 3**). La zone est située dans l'aire paysagère de la Vallée de la Gueule herbagère (Godart et al., 2007b). On y rencontre de grands espaces dédiés au pâturage et entourés de haies, sans pour autant parler de bocage strict (Godart et al., 2007b). La prairie est l'occupation la plus représentée dans l'échantillonnage avec quasiment la moitié des prélèvements prévus (46,5 %) (**Tableau 4**). Entre les parcelles dédiées au pâturage, on retrouve des cultures qui seront échantillonnées à raison de 32,5 %. Les boisements sont souvent regroupés sur les sols des crêtes moins profonds (Godart et al., 2007b), d'où leur plus faible représentation dans la campagne d'échantillonnage (21,2 %).

3.2. Analyse spatiale

Le traitement des points à l'aide de l'outil *Average Nearest Distance* montre que les distributions des lieux de prélèvement des trois zones d'étude ne peuvent pas être considérées comme aléatoires (**Tableau 5**). Le *z-score* mesure l'écart entre moyenne observée et moyenne attendue rapporté à l'écart-type. La *p-value* est la probabilité de se tromper en rejetant l'hypothèse du caractère aléatoire de la distribution spatiale

Tableau 5. Évaluation de la dispersion des points de sondage selon la zone d'étude et le facteur testé — *Evaluation of the distribution of sampling points according to the study area and the studied factor.*

PTS/Occupation	D/d	z-score	p-value	Patron
Zone d'étude de Sclaigneaux				
4010	1,06	1,02	> 0,05	Ni groupé ni dispersé
4020	0,91	-1,53	> 0,05	Ni groupé ni dispersé
7610	0,88	-2,18	< 0,05	Groupé
Culture	0,84	-3,17	< 0,01	Groupé
Forêt	0,84	-2,21	< 0,05	Groupé
Prairie	0,86	-2,49	< 0,05	Groupé
Zone d'étude de Prayon				
4020	0,80	-2,85	< 0,01	Groupé
7410	0,85	-2,27	< 0,05	Groupé
7510	0,73	-4,41	< 0,01	Groupé
Culture	1,00	-0,01	> 0,05	Ni groupé ni dispersé
Forêt	1,08	1,15	> 0,05	Ni groupé ni dispersé
Prairie	1,04	0,70	> 0,05	Ni groupé ni dispersé
Zone d'étude de Plombières				
4010	0,81	-2,99	< 0,01	Groupé
4020	1,06	-2,99	< 0,01	Dispersé
4030	0,94	-1,06	> 0,05	Ni groupé ni dispersé
Culture	0,79	-3,45	< 0,01	Groupé
Forêt	0,67	-4,46	< 0,01	Groupé
Prairie	1,03	0,69	> 0,05	Ni groupé ni dispersé

D : moyenne de toutes les distances au plus proche voisin — *observed mean distance* ; d : moyenne calculée pour une distribution aléatoire hypothétique — *expected mean distance* ; D/d : rapport au voisin le plus proche — *nearest neighbor ratio* ; z-score : écart entre moyenne observée et moyenne attendue rapportée à l'écart-type — *difference between observed mean and expected mean compared to standard deviation* ; p-value : niveau significatif pour lequel l'hypothèse nulle (H_0 = dispersion aléatoire) peut être rejetée — *significant level for which the null hypothesis (H_0 = dispersion random) may be rejected* ; Type de sol : voir légende du **tableau 1** — *soil type: see legend of table 1.*

des points. Sur base du seuil de 5 %, 7 tests sur les 18 réalisés sont compatibles avec une distribution aléatoire. On y retrouve les trois occupations du sol de Prayon, les prairies de Plombières et les PTS limoneux de Sclaigneaux et Plombières, à l'exception des sols limoneux à drainage naturel favorable de Plombières. Les autres modalités peuvent être considérées comme présentant des distributions spatiales en grappes, sans risque élevé de se tromper. C'est particulièrement le cas pour les cultures (Sclaigneaux et Plombières), les forêts de Plombières, les sols limoneux à drainage naturel favorable (Plombières) ou modéré ou imparfait (Prayon) et les sols limono-caillouteux à charge calcaire de Prayon.

Les résultats de l'analyse variographique des variables liées à la nature des sols et leur occupation, exprimées sous forme d'un indice présence/absence

du caractère étudié, sont donnés au **tableau 6**. Le rapport $C/(C_0+C)$ exprime la part de la variance qui présente une continuité spatiale et la portée, la distance au-delà de laquelle deux points ne sont plus corrélés spatialement.

Deux cas de figure se présentent. Premièrement, la moitié des variables étudiées ne présente pas de continuité spatiale (effet pépité pur). Les PTS à Sclaigneaux et à Plombières et l'occupation à Prayon. Cela signifie qu'il y a autant de différences (de PTS ou d'occupation) entre deux points distants de 300 m qu'entre deux points distants de 3000 m pour ces modalités. Cela témoigne d'un morcellement important de ces variables dans le plan d'échantillonnage. Deuxièmement, l'autre moitié des variables présente une structure de continuité spatiale modélisable par un modèle sphérique. La portée pour les PTS de Prayon est

Tableau 6. Analyse variographique de la distribution des points d'échantillonnage en relation avec les différents facteurs par zone d'étude — *Variographic analysis of the distribution of the points of sampling in relation to the various factors by study area.*

PTS/ Occupation	Modèle	C/(C0+C)	Portée (m)
Zone d'étude de Sclaigheaux			
4010	Pépité	0,00	-
4020	Pépité	0,00	-
7610	Pépité	0,00	-
Culture	Sphérique	0,33	655
Forêt	Sphérique	0,33	1 390
Prairie	Sphérique	0,22	785
Zone d'étude de Prayon			
4020	Sphérique	0,57	1 940
7410	Sphérique	0,61	870
7510	Sphérique	0,50	1 455
Culture	Pépité	0,00	-
Forêt	Pépité	0,00	-
Prairie	Pépité	0,00	-
Zone d'étude de Plombières			
4010	Pépité	0,00	-
4020	Pépité	0,00	-
4030	Pépité	0,00	-
Culture	Sphérique	0,32	500
Forêt	Sphérique	0,59	850
Prairie	Sphérique	0,28	475

Type de sol : voir légende du **tableau 1** — *soil type: see legend of table 1.*

comprise entre 870 et 1 940 m. Les portées des cultures et prairies sont inférieures à celles des forêts dans les deux autres zones. La longueur des portées traduit la dimension des ensembles spatiaux caractérisés par une même modalité. Toutefois, cela peut correspondre à des réalités différentes en termes de dimensions des plages cartographiques, comme on peut le voir à la **figure 3** pour les PTS de Prayon. Les sols limoneux et les sols à charge calcaire présentent des portées relativement similaires, mais là où les seconds sont présents sous forme de plages continues relativement importantes, les premiers présentent un morcellement marqué. L'existence d'une continuité spatiale dans ce cas est liée à l'absence des PTS voisins du 4020 dans le plan d'échantillonnage.

L'analyse spatiale des motifs et de l'autocorrélation entre les points présente des éléments de convergence.

Les points, quelle que soit l'occupation du sol, à Prayon et sur les cultures et les prairies de Plombières, apparaissent peu ou pas groupés et peuvent être considérés comme spatialement indépendants à très faible distance (moins de 500 m). Cela s'explique en partie par le fait que sur la zone d'étude de Prayon, les cultures et prairies sont relativement dispersées dans le paysage, contrairement aux forêts qui, malgré une grande superficie, se concentrent davantage dans les vallées. À Plombières, la prairie est le mode d'exploitation le plus courant et le mieux distribué sur l'ensemble de la zone, d'où un mode de répartition ni groupé ni dispersé. En pratique, cela signifie que pour l'interpolation future des résultats des teneurs en ETM, le facteur occupation du sol ne devrait jouer qu'un rôle limité pour les faibles gammes de distance pour les cultures et les prairies. Pour les forêts et les PTS à Prayon, l'influence des facteurs, si elle s'avérait significative, pourrait porter sur des distances plus grandes, de 1 500 à 2 000 m.

4. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Les trois dispositifs d'échantillonnage obtenus par la stratégie de sélection des plages de sols développée dans ce papier permettront l'étude de l'influence des facteurs sol, occupation et direction des vents sur la distribution spatiale des ETM et leur répartition au sein des phases porteuses du sol, après analyse des différents teneurs en laboratoire.

Le schéma opéré repose sur un équilibre statistique de l'échantillonnage et sur une représentativité des facteurs sur l'ensemble des zones étudiées. Ce ne sont donc pas des critères comme la relation cout-efficacité ou les exigences des autorités en charge du projet qui ont dicté la stratégie, comme dans de nombreux programmes d'échantillonnages à large échelle en sols contaminés (Back, 2007).

Pour conclure, la compilation des données de terrain et de laboratoire permettra d'évaluer les risques encourus par la valorisation agricole et forestière actuelle de ces terres plus ou moins contaminées, ce en vue de proposer des solutions adaptées selon le mode d'exploitation sans pour autant compromettre leur valorisation économique future.

Bibliographie

- Back P.E., 2007. A model for estimating the value of sampling programs and the optimal number of samples for contaminated soil. *Environ. Geol.*, **52**, 573-585.
- Bizoux J.P. et al., 2004. Ecology and conservation of Belgian populations of *Viola calaminaria*, a metallophyte with a restricted geographic distribution. *Belg. J. Bot.*, **137**, 91-104.

- Blanchard C., 2000. *Caractérisation de la mobilisation potentielle des polluants inorganiques dans les sols pollués*. Thèse de doctorat : INSA Lyon, Institut national des Sciences appliquées (France).
- Bock L., Bah B., Veron P. & Lejeune P., 2006. *Carte des Principaux Types de Sols de Wallonie à 1/250 000. Convention financée par la Région Wallonne (DGA, MRW)*. Gembloux, Belgique : Unité Sol-Écologie-Territoire (Laboratoire de Géopédologie) et Unité de Gestion des Ressources.
- Cambier P., Schwartz C. & van Oort F., 2009. *Contaminations métalliques des agrosystèmes et écosystèmes péri-industriels*. Versailles, France : Éditions Quæ.
- Citeau L., 2004. *Étude des colloïdes naturels présents dans les eaux gravitaires de sols contaminés : relation entre nature des colloïdes et réactivité vis-à-vis des métaux (Zn, Cd, Pb, Cu)*. Thèse de doctorat : Institut National d'Agronomie Paris-Grignon, Unité de Science du Sol, Versailles (France).
- De Nul R., 2010. Les minéraux des scories métallurgiques de Sclaigneaux (Andenne). In : Goemaere E., éd. *L'exploitation des ressources naturelles minérales de la commune d'Andenne : géologie, industries, cadre historique et patrimoines culturel et biologique*. Bruxelles : Service géologique de Belgique, 349-372.
- Dejonghe L., 1998. Zinc-lead deposits of Belgium. *Ore Geol. Rev.*, **12**, 329-354.
- Dejonghe L., 2010. Les gisements plombo-zincifères de la région d'Andenne. In : Goemaere E., éd. *Terres, pierres et feu en vallée mosane. L'exploitation des ressources naturelles minérales de la commune d'Andenne : géologie, industries, cadre historique et patrimoines culturel et biologique*. Bruxelles : Service géologique de Belgique, 285-310.
- Dejonghe L., Ladeuze F. & Jans D., 1993. *Atlas des gisements plombo-zincifères du synclinorium de Verviers (Est de la Belgique)*. Bruxelles : Service géologique de Belgique.
- Denaeyer-De Smet S. & Duvigneaud P., 1974. Accumulation de métaux lourds toxiques dans divers écosystèmes terrestres pollués par des retombées d'origine industrielle. *Bull. Soc. R. Bot. Belg.*, **107**, 147-156.
- Descamps M. et al., 2009. Biodisponibilité des métaux et faune invertébrée du sol. In : Cambier P., Schwartz C. & van Oort F., éd. *Contaminations métalliques des agrosystèmes et écosystèmes péri-industriels*. Versailles, France : Éditions Quæ, 207-217.
- Dispas J., 2009. Plombières et son site minier. *Le petit sourcier*, **18**, 3-11.
- Duvigneaud J. & Jortay A., 1987. Un site intéressant de la région liégeoise : la partie méridionale du vallon des Fonds de Forêt (Forêt et Magnée, province de Liège). *Nat. Belg.*, **68**, 33-48.
- Duvigneaud J., Pauquet F. & Saintenoy-Simon J., 1993. Une réserve naturelle d'Ardenne et Gaume : la pelouse calaminaire située au sud du parc communal de Kelmis-La Calamine (anciennement Moresnet Neutre). *Parcs Nationaux*, **508**, 66-76.
- Ertz D. & Graitson E., 2001. Effectifs des populations, répartition et statut du petit nacré, *Issoria lathonia* L., sur les terrains calaminaires du bassin de la Vesdre (province de Liège, Belgique) (Lepidoptera : Nymphalidae). *Linneana Belgica*, **18**, 87-92.
- Faucon M.P. et al., 2011. May rare metallophytes benefit from disturbed soils following mining activity? The Case of the *Crepidiorhapon tenuis* in Katanga (D.R. Congo). *Restor. Ecol.*, **19**, 333-343.
- Feltz C. et al., 2010. *Atlas des paysages de Wallonie. Le Plateau condrusien : bordure agro-forestière du Samson*. Namur, Belgique : Conférence Permanente du Développement Territorial.
- Fernandez-Cornudet C., 2006. *Devenir du Zn, Pb et Cd issus de retombées atmosphériques dans les sols, à différentes échelles d'étude. Influence de l'usage des sols sur la distribution et la mobilité des métaux*. Thèse de doctorat : Institut National d'Agronomie Paris-Grignon (France).
- Gillet S. & Ponge J.F., 2009. Dynamique du peuplement de collemboles sous l'effet d'une pollution croissante par des ETM. In : Cambier P., Schwartz C. & van Oort F., éd. *Contaminations métalliques des agrosystèmes et écosystèmes péri-industriels*. Versailles, France : Éditions Quæ, 219-227.
- Godart M.-F. et al., 2007a. *Atlas des paysages de Wallonie. L'Entre-Vesdre-et-Meuse : La Basse Vesdre*. Namur, Belgique : Conférence Permanente du Développement Territorial.
- Godart M.-F. et al., 2007b. *Atlas des paysages de Wallonie. L'Entre-Vesdre-et-Meuse : Vallée de la Gueule herbagère*. Namur, Belgique : Conférence Permanente du Développement Territorial.
- Graitson E., 2005. Inventaire et caractérisation des sites calaminaires en Région wallonne. *Natura Mosana*, **58**, 83-124.
- Graitson E., San Martin G. & Goffart P., 2005. Intérêt et particularités des halde calaminaires wallonnes pour l'entomofaune : le cas des Lépidoptères Rhopalocères et des Orthoptères. *Notes Fauniques de Gembloux*, **57**, 49-57.
- Hermanns J.F. & Duvigneaud J., 1996. Gestion biologique d'un site calaminaire : les options prises dans la réserve naturelle du Rocheux à Theux. *Parcs Réserves*, **51**, 2-14.
- Hough R.L. et al., 2004. Assessing potential risk of heavy metal exposure from consumption of home-produced vegetables by urban populations. *Environ. Health Perspect.*, **112**, 215-221.
- Jadot P., 2007. *Prayon, du zinc à la chimie*. Liège, Belgique : Éditions Cefal.
- Lambinon J. & Auquier P., 1963. La flore et la végétation des terrains calaminaires de la Wallonie septentrionale et

- de la Rhénanie aixoise (types chorologiques et groupes écologiques). *Natura Mosana*, **16**, 113-132.
- Lamy I., van Oort F., Dere C. & Baize D., 2006. Use of major- and trace-element correlations to assess metal migration in sandy Luvisols irrigated with wastewater. *Eur. J. Soil Sci.*, **57**, 731-740.
- Legrain X. et al., 2011. Cartographie des sols en Belgique : aperçu historique et présentation des travaux actuels de valorisation et de révision de la Carte Numérique des Sols de Wallonie. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.*, **15**(S2), 647-656.
- Maingeot M., 2003. Étude des populations d'orthoptères de la réserve de Sclaigneaux. *Notes Fauniques de Gembloux*, **50**, 63-74.
- Meerts P. & Grommesch C., 2001. Soil seed banks in a heavy-metal polluted grassland at Prayon (Belgium). *Plant Ecol.*, **155**, 35-45.
- Mench M. et al., 2009. Exposition de végétaux aux éléments traces, évaluation et gestion des risques. In : Cambier P., Schwartz C. & van Oort F., eds. *Contaminations métalliques des agrosystèmes et écosystèmes péri-industriels*. Versailles, France : Éditions Quæ, 86-116.
- Meshalkina J.L., Stein A. & Makarov O.A., 1996. Spatial variability of soil contamination around a sulphurous acid producing factory in Russia. *Water Air Soil Pollut.*, **92**, 289-313.
- Michaux J., 2010. Richesse faunistique et floristique de la réserve naturelle de Sclaigneaux. In : Goemaere E., éd. *L'exploitation des ressources naturelles minérales de la commune d'Andenne : géologie, industries, cadre historique et patrimoines culturel et biologique*. Bruxelles : Service géologique de Belgique, 511-516.
- Oldenhove de Guertechin F.B., 1973. *Carte des Sols de la Belgique. Texte explicatif de la planchette n°145 W*. Gent, Belgique : Centre de Cartographie des Sols, I.R.S.I.A.
- Pahaut P., 1963. *Carte des Sols de la Belgique. Texte explicatif de la planchette n°135 W*. Gent, Belgique : Centre de Cartographie des Sols, I.R.S.I.A.
- Pahaut P., 1965. *Carte des Sols de la Belgique. Texte explicatif des planchettes n°109 W & n°109 E*. Gent, Belgique : Centre de Cartographie des Sols, I.R.S.I.A.
- Quoilin D., Poumay J. & Dethier M., 2007. Les hétéroptères de la réserve du Rocheux (Commune de Theux, Province de Liège). *Natura Mosana*, **60**, 1-20.
- Ramaut J.L., 1964. Un aspect de la pollution atmosphérique : l'action des poussières de zinc sur les sols et les végétaux dans la région de Prayon. *Nat. Belg.*, **45**, 133-146.
- Rosengarten D., 2010. Les milieux calaminaires, la biodiversité au service du patrimoine. *Érable*, **2**, 2-9.
- Saintenoy-Simon J. & Duvigneaud J., 1996. Le site calaminaire de Plombières (Bleiberg). *Ardenne Gaume*, **51**, 5-9.
- Theocharopoulos S.P. et al., 2001. European soil sampling guidelines for soil pollution studies. *Sci. Total Environ.*, **264**, 51-62.
- Tordoff G.M., Baker A.J.M. & Willis A.J., 2000. Current approaches to the revegetation and reclamation of metalliferous mine wastes. *Chemosphere*, **41**, 219-228.
- van Oort F. et al., 2009. Pollutions métalliques : distributions hétérogènes du Zn, Pb, Cd, et Cu et relations avec l'usage des sols. In : Cambier P., Schwartz C. & van Oort F., eds. *Contaminations métalliques des agrosystèmes et écosystèmes péri-industriels*. Versailles, France : Éditions Quæ, 15-44.
- Verma P., George K.V., Singh H.V. & Singh R.N., 2007. Modeling cadmium accumulation in radish, carrot, spinach and cabbage. *Appl. Math. Modell.*, **31**, 1652-1661.

(46 réf.)