

Une analyse des stratégies d'échantillonnage des réseaux de surveillance de la qualité des sols en Europe

X. Morvan^(1,2), A. Richer de Forges⁽¹⁾, D. Arrouays⁽¹⁾, C. Le Bas⁽¹⁾, N. Saby⁽¹⁾,
R.J.A. Jones⁽³⁾, F.G.A. Verheijen⁽³⁾, P. Bellamy⁽³⁾, M. Kibblewhite⁽³⁾, M. Stephens⁽³⁾,
A. Freudenschuss⁽⁴⁾, P. Strauss⁽⁵⁾, H. Spiegel⁽⁶⁾, A. Verdoodt⁽⁷⁾, E. Goidts⁽⁸⁾, G. Colinet⁽⁹⁾,
T. Sishkov⁽¹⁰⁾, N. Kolev⁽¹⁰⁾, V. Penizek⁽¹¹⁾, J. Kobza⁽¹¹⁾, T. Balström⁽¹²⁾, P. Penu⁽¹³⁾,
T. Köster⁽¹⁴⁾, C. Jolivet⁽¹⁾, R. Baritz⁽¹⁵⁾, C. Kosmas⁽¹⁶⁾, J. Berényi Üveges⁽¹⁷⁾, G. Becher⁽¹⁸⁾,
J.P. Renaud⁽¹⁹⁾, A.H. Arnoldussen⁽²⁰⁾, P. Pavlenda⁽²¹⁾, P. Neville⁽²²⁾, P. Michopoulos⁽²³⁾,
E. Herzberger⁽²⁴⁾, P. Simoncic⁽²⁵⁾, D. Fay⁽²⁶⁾, V.V. Buivydaite⁽²⁷⁾, A. Karklins⁽²⁸⁾, J. Kobza⁽²⁹⁾,
S. Camilleri⁽³⁰⁾, S. Sammut⁽³⁰⁾, A. Higgins⁽³¹⁾, C. Jordan⁽³¹⁾, M. Rutgers⁽³²⁾, J. Niedzwiecki⁽³³⁾,
T. Stuczynski⁽³³⁾, M. C. Goncalves⁽³⁴⁾, R. Dias Mano⁽³⁵⁾, C. Simota⁽³⁶⁾, A. Lilly⁽³⁷⁾,
G. Hudson⁽³⁷⁾, M. Olsson⁽³⁸⁾, H. Lilja⁽³⁹⁾, I. Simo Josa⁽⁴⁰⁾, M. Zupan⁽⁴¹⁾ et S. Sleutel⁽⁴²⁾

- (1) INRA, Unité Infosol, US1106, Centre de recherche d'Orléans, BP 20619, 45166 OLIVET Cedex, France
- (2) Université de Reims Champagne-Ardennes, Gegena, EA 3795, CREA, 51100 REIMS, France
- (3) Cranfield University, Silsoe Bedfordshire, MK45 4DT UK, United Kingdom
- (4) Umweltbundesamt GMBH, Spittelauer Lände 5, 1090 Wien, Austria
- (5) Institute for Land and Water Management Research, Federal Agency for Water Management, Pollnbergstraße 1; A-3252 Petzenkirchen, Austria
- (6) Austrian Agency for Health and Food Safety; Spargelfeldstraße 191, A-1226 Wien, Austria
- (7) Ghent University, Laboratory of Soil Science, Krijgslaan 281 (S8), B-9000 Gent, Belgium
- (8) Université Catholique de Louvain, Unité de Géographie, Bâtiment Mercator, Place Pasteur, 3, B-1348 Louvain-la-Neuve, Belgium
- (9) Faculté Universitaire des Sciences Agronomiques de Gembloux, Laboratoire de Géopédologie, Passage des déportés 2, B-5030 Gembloux, Belgique.
- (10) Institute of Soil Science Nikola Poushkarov, 7 Shosse Bankya str., 1369, 1080 Sofia, Bulgaria
- (11) University of Life Sciences Prague, Department of Soil Science and Geology, Kamycka 129, 165 21 Prague, Czech Republic.
- (12) Institute of Geography & Geology, University of Copenhagen, Oster Voldgade 10, DK-1350 Copenhagen K, Denmark
- (13) Agricultural Research Centre, Teaduse 4-6, Saku, 75501 Harjumaa, Estonia
- (14) Estonian University of Life Sciences, Kreutzwaldi 1, 51014 Tartu, Estonia
- (15) Bundesanstalt fuer Geowissenschaften Und Rohstoffe, Stilleweg, Hannover, 30655, Germany
- (16) Agricultural University of Athens, Laboratory of Soils and Agricultural Chemistry, Iera Odos 75, Athens 11855, Greece
- (17) Central Service for Plant Protection and Soil Conservation, H-1118 Budapest, Budaörsi út 141-145, Hungary
- (18) Institute for World Forestry, Leuschnerstr. 91, 21031 Hamburg, Germany
- (19) Inventaire forestier national, 45290 Nogent-sur-Vernisson, France
- (20) Norwegian Forest and Landscape Institute, Raveien 9, N-1431 Aas, Norway
- (21) National Forest Centre, T. G. Masaryka st. 22, SK-96092 Zvolen, Slovakia
- (22) Coillte, The Irish Forestry Board, Newtownmountkennedy, Co. Wicklow, Ireland

- (23) Forest Research Institute of Athens, Terma. Alkmanos, Athens 11528, Greece
- (24) Federal Research and Training Centre for Forests, Natural Hazards and Landscape, Seckendorff-Gudent-Weg 8, A-1131 Vienna, Austria
- (25) Slovenian Forestry Institute, Vecna pot 2, SI 1000 Ljubljana, Slovenia
- (26) Teagasc – The Irish Agriculture and Food Development Authority, Oak Park, Carlow, Ireland
- (27) Agronomy Faculty, Lithuanian University of Agriculture, Studentu St. 11, LT-53361, Akademija, Kaunas R., Lithuania
- (28) Institute of Soil and Plant Sciences, Latvia University of Agriculture, Liela iela 2, Jelgava, LV 3001, Latvia
- (29) Soil Fertility Research Institute, Gagarinova 10, SK-82713, Bratislava, Slovakia
- (30) Ministry for Rural Affairs and the Environment, National Agricultural Research & Development Centre, Ghammieri, Marsa, Malta
- (31) Agri-Food & Biosciences Institute, Newforge Lane, Belfast BT9 5PX, Northern Ireland, UK
- (32) Laboratory for Ecological Risk Assessment, National Institute for Public Health and the Environment (RIVM), P.O. BOX 1, 3720 BA Bilthoven, The Netherlands
- (33) Institute of Soil Science and Plant Cultivation – National Research Institute, ul. Czartoryskich 8, 24-100 Pulawy, Poland
- (34) Estação Agronómica Nacional, Quinta do Marquês, 2784-505 Oeiras, Portugal
- (35) INRB, Laboratory of Agricultural Chemistry Rebelo da Silva (LQARS), Tapada da Ajuda Apartado 3228, P-1301-903 Lisboa, Portugal
- (36) Research Institute for Soil Science and Agrochemistry, Bd. Marasti, no. 61, 71331 Bucharest, Romania
- (37) Macaulay Institute, Craigiebuckler, Aberdeen, AB15 8QJ, United Kingdom.
- (38) Department of Forest Soils, Swedish University of Agricultural Sciences, Box 7001, SE 750 07 Uppsala, Sweden
- (39) MTT, Plant Production Research, Soil and Plant Nutrition, 31600 Jokioinen, Finland
- (40) Secció d'Avaluació de Recursos Agraris, Departament d'Agricultura, Ramaderia i Pesca, Generalitat de Catalunya, Av. Rovira Roure 191, 25198, Lleida, Spain
- (41) University of Ljubljana, Biotechnical Faculty, Agronomy department, Jamnikarjeva 101, 1000 Ljubljana, Slovenia
- (42) Ghent University, Department of Soil Management and Soil Care, Coupure Links 653, Gent, Belgium

RÉSUMÉ

Dans le cadre du projet ENVASSO (Environmental assessment of soil for monitoring), qui vise à proposer un cadre commun pour l'harmonisation de la surveillance des sols en Europe, nous avons réalisé une synthèse, la plus exhaustive jusqu'à maintenant à notre connaissance, des différentes stratégies d'échantillonnage utilisées par les différents réseaux de suivi de la qualité des sols en Europe. Des réseaux de mesure existent dans les 27 pays européens, la plupart membres de l'Union Européenne, leurs stratégies d'échantillonnage (sélection des sites de surveillance, surface des sites, nombre de sous-échantillons prélevés, pas de temps d'échantillonnage, stratégie d'échantillonnage du sol) sont toutefois très hétérogènes. L'harmonisation des stratégies des réseaux représente donc un problème délicat : en effet, la plupart des changements proposés entraînerait la quasi impossibilité de comparer les résultats avec ceux des campagnes de mesure précédentes. Il paraît cependant nécessaire d'harmoniser les réseaux de surveillance européens afin de pouvoir les comparer entre eux. Les propositions formulées vont dans ce sens. Nous estimons que plus de 4000 sites devraient être ajoutés aux sites existants pour obtenir une couverture satisfaisante des sols d'Europe. Nous recommandons que la taille minimale d'un site soit de 100 m², et n'excède en général pas plus de 1 ha. La recommandation faite afin d'harmoniser les réseaux de mesure européens est de prélever au moins 4 sous-échantillons, ce nombre étant à adapter en fonction de la surface du site de surveillance et/ou de la variabilité spatiale intra-site, si celle-ci est connue. Nous conseillons un pas de temps de l'ordre de 10 ans entre deux campagnes de prélèvement. Des recommandations sont également formulées quant à la stratégie verticale d'échantillonnage, la mesure des densités apparentes, la préparation et la conservation des échantillons. Il reste qu'une telle harmonisation demandera un effort considérable à de nombreux pays et il n'est pas certain qu'ils aient tous la capacité de respecter les propositions faites dans le cadre de cette étude. Quoi qu'il en soit, le projet ENVASSO permet d'asseoir une nouvelle base sur laquelle il sera possible de s'appuyer pour parvenir à cette harmonisation.

Mots clés

Sol, réseaux de surveillance, stratégie d'échantillonnage, Europe.

SUMMARY**A REVIEW OF THE SAMPLING STRATEGIES OF THE EUROPEAN SOIL MONITORING NETWORKS**

The ENVASSO project (Environmental assessment of soil for monitoring) aims to harmonise the European soil monitoring networks. As part of this project, we made a review, the most exhaustive to date, on the sampling strategies used in the different networks.

Soil monitoring networks exist in all the 27 European countries, most of them being members of the European Union. Nevertheless, their strategies are very heterogeneous (selection of monitoring sites, site area, number of sub-samples, time step, soil sampling). Therefore, harmonisation of the strategies remains a difficult issue: indeed most of the changes would make the comparison with the results of the previous campaigns quite impossible. Yet, harmonisation is necessary in order to compare the different European monitoring networks, and from this perspective, some recommendations have been made in that way. We estimate that more than 4000 additional sites should be settled in order to reach an acceptable level of coverage for the European soils. The areas of the sites should preferably be comprised between 100 m² and 1 ha. The minimal number of sub-samples should be 4, and should be adapted with regards to the within-site variability. A time step of ca 10 yr is recommended. Advices are also formulated for the vertical sampling strategy, the bulk density determination, samples preparation and archiving. However, this harmonisation would require considerable efforts and some countries may not be able to achieve all of these recommendations. Nevertheless, the framework provided in the Envasso project can be used to reach a common acceptable level of soil monitoring in Europe.

Key-words

Soil, monitoring, network, sampling strategy, Europe

RESUMEN**UN ANÁLISIS DE LAS ESTRATEGIAS DE MUESTREOS DE LAS REDES DE VIGILANCIA DE LA CALIDAD DE LOS SUELOS EN EUROPA**

En el cuadro del proyecto ENVASSO (Environmental assessment of soil for monitoring) que busca proponer un cuadro común para la armonización de la vigilancia de los suelos en Europa, se realizó una síntesis, la más exhaustiva hasta ahora a nuestro conocimiento, de las diferentes estrategias de muestreos usadas por las diferentes redes de seguimiento de la calidad de los suelos en Europa.

Redes de medición existen en los 27 países europeos, la mayoría miembros de la Unión Europea, sus estrategias de muestreos (selección de los sitios de vigilancia, superficie de los sitios, número de sub-muestras tomadas, intervalo de tiempo entre muestreos, estrategia de muestreo del suelo) están no obstante muy heterogéneas. La armonización de las estrategias de las redes representa así un problema delicado: en efecto, la mayoría de los cambios propuestos implicaría la casi imposibilidad comparar los resultados con los de las campañas de medición precedentes. Parece sin embargo necesario armonizar las redes de vigilancia europeas para poder compararlas entre ellas. Las propuestas formuladas van en este sentido. Estimamos que más de 4000 sitios deberían añadirse a los sitios existentes para obtener una cubierta satisfactoria de los suelos de Europa. Recomendamos que el tamaño mínimo de un sitio sea de 100 m², y no exceda en general no más de 1 ha. La recomendación hecha para armonizar las redes de medición europeas es tomar por lo menos 4 sub-muestras; este número está a adaptar a la superficie del sitio de vigilancia y/o de la variabilidad espacial intra-sitio, si está conocida. Aconsejamos un intervalo de tiempo del orden de 10 años entre dos campañas de muestreo. Recomendaciones están igualmente formuladas cuanto a la estrategia vertical de muestreo, la medida de las densidades aparentes, la preparación y la conservación de las muestras. Queda que una armonización de este tipo pedirá a numerosos países un esfuerzo considerable y no está cierto que todos tengan la capacidad a respetar las proposiciones hechas en el cuadro de este estudio. En cualquier caso, el proyecto ENVASSO permite sentar una nueva base sobre la cual será posible apoyarse para llegar a esta armonización.

Palabras clave

Suelo, redes de vigilancia, estrategia de muestreos, Europa

Les sols évoluent constamment sous l'effet de grands facteurs naturels et sous l'effet des activités humaines (usages, aménagements fonciers, pratiques agricoles, épandages de boues, retombées atmosphériques, pollutions accidentelles, ...). Souvent volontaires et destinées à améliorer la qualité des sols (chaulages, amendements...), ces évolutions d'origine anthropique sont cependant parfois très préjudiciables au maintien de la qualité des sols (accumulation de substances indésirables, tassement, baisse des teneurs en matière organique...). Elles sont le résultat de processus longs et cumulatifs, souvent difficilement détectables et dont certains sont parfois irréversibles à l'échelle de temps humaine. La Commission Européenne (CEC, 2002, 2006) a identifié les principales menaces qui pèsent sur les sols et souligné la nécessité de les protéger.

Il s'avère, par conséquent, nécessaire de détecter de façon précoce l'apparition et les tendances des éventuelles dégradations des sols, à l'aide de programmes d'observation et de suivi de la qualité des sols. La plupart des pays d'Europe ont mis en place des dispositifs destinés à réaliser un inventaire exhaustif de l'état de leurs sols, ou à en suivre les évolutions (FAO, 1994 ; Arrouays et al., 1998 ; King et Montanarella, 2002). Les synthèses réalisées à ce jour (FAO, 1994 ; Arrouays et al., 1998 ; Syed et al. 2000 ; King et Montanarella, 2002) ont toutes souligné l'hétérogénéité des systèmes de surveillance des sols en Europe, ainsi que la nécessité de leur harmonisation. Elles ont principalement porté sur la comparaison des indicateurs mesurés, de la densité de la couverture nationale, et de la stratégie d'implantation des sites. Aucune, à notre connaissance, n'a approfondi la question des modalités de l'échantillonnage intra-site. Cette question est cependant cruciale pour étayer la comparaison des réseaux et pour proposer des voies d'harmonisation.

L'adoption d'un protocole commun d'échantillonnage est une tâche difficile - et souvent difficilement acceptable - dans la mesure où la plupart des pays ont commencé depuis longtemps la mise en place de leurs réseaux. Changer leur protocole pourrait, dans de nombreux cas, rendre difficile ou inexploitable les comparaisons avec les campagnes précédentes. Ceci explique que les débats autour de l'adoption d'un protocole commun soient fréquemment exacerbés.

Le projet ENVASSO (Environmental assessment of soil for monitoring) vise à proposer un cadre commun pour l'harmonisation de la surveillance des sols en Europe. Dans le cadre de ce projet, nous avons réalisé une enquête sur les réseaux existants, et nous avons en particulier questionné les gestionnaires de réseaux sur leurs stratégies d'échantillonnage. En parallèle, nous avons réalisé une méta-analyse de la variabilité intra-site de quelques paramètres fréquemment mesurés. Cet article rapporte une synthèse des stratégies actuellement déployées en Europe, et tente d'en dégager des éléments de discussion et des recommandations pour le futur.

Tableau 1 - Références bibliographiques utilisées pour l'analyse de la variabilité intra-site de différents paramètres mesurés sur les échantillons de sol. Les données non publiées proviennent de communications personnelles de C. Jolivet (France), de J. Kobza et V. Penizeck (République Tchèque).

Table 1 - References used for the in-site variability analysis of several indicators measured on soil samples. Unpublished data are from personal communications of C. Jolivet (France), J. Kobza and V. Penizeck (Czech Republic).

Source	Pays
Wopereis et al., 1988	France
Johnson et al., 1990	Etats-Unis
Reichardt, 1990	Autriche
Arrouays et al., 1997	France
Jolivet, 2000	France
Homann et al., 2001	Etats-Unis
Ritz et al., 2004	Grande Bretagne
Shukla et al., 2004	Autriche
Bourennane et al., 2004	France
Lopéz-Granados et al., 2005	Espagne
Odlare et al., 2005	Suède
Stenberg et al., 2005	Suède
Rasmussen et al., 2005	Danemark
Brouder et al., 2005	Etats-Unis
Bourennane et al., 2006	France
Burgos et al., 2006	Espagne
Cox et al., 2006	Etats-Unis
Unpublished data	Slovaquie
Unpublished data	France

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Métadonnées des réseaux de suivi de la qualité des sols

Dans un premier temps, il a été nécessaire d'adopter une définition commune d'un site de surveillance. Dans le cadre du programme ENVASSO, un site de surveillance doit remplir les conditions suivantes : les limites du site doivent être géoréférencées avec une précision inférieure à 10 m et plusieurs campagnes de prélèvement doivent pouvoir être faites. Ces conditions représentent les conditions minimums nécessaires pour considérer un site

comme un site de surveillance. La qualité du site est améliorée si plusieurs sous-échantillons sont prélevés de manière à prendre en compte la variabilité spatiale, et si la précision du géoréférencement des prélèvements est inférieure à 1 mètre.

Un questionnaire a été élaboré et envoyé à l'ensemble des partenaires des 27 pays de l'Union Européenne de manière à collecter les métadonnées relatives aux réseaux de suivi de la qualité des sols. Plusieurs types d'information ont été demandés concernant le réseau de mesure (stratégie d'échantillonnage, prétraitement des échantillons, archivage), les sites de surveillance (surface des sites, profondeur d'échantillonnage, méthodes de prélèvement, nombre de sous-échantillons), ainsi que les paramètres mesurés et les méthodes d'analyse utilisées.

Ces métadonnées ont été recueillies pour un réseau international (ICP Forest) et pour 65 réseaux de surveillance nationaux ou régionaux. Ce chiffre ne représente pas le nombre exact de réseaux existants en Europe. Il en existe notamment en Italie (Filippi, 2005), en Espagne (Ibañez *et al.*, 2005), aux Pays-Bas et en Suède pour lesquels les informations n'ont pas pu être obtenues. Toutefois, cette étude représente l'état des lieux le plus exhaustif réalisé jusqu'à maintenant.

Variabilité intra-site

La variabilité spatiale des paramètres mesurés influe sur le nombre d'échantillons à prélever pour obtenir une mesure ayant une précision donnée. Une revue de la littérature a été réalisée à partir de la base de données « Web of Science » dans le but d'estimer la variabilité spatiale de quelques paramètres en fonction de la surface prélevée (*tableau 1*). Les données compilées des différentes études recensées concernent la surface des parcelles étudiées (de 1 m² à 20 ha), le nombre d'échantillons prélevés, la valeur moyenne des paramètres et différents indicateurs disponibles concernant la variabilité de la mesure (variance, coefficient de variation, écart-type). Quelques données issues d'études non publiées ont également été recueillies auprès de partenaires du projet en France et en Slovaquie. Au total, des données ont été collectées pour 120 sites caractérisés en détail.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Stratégie de sélection de sites

La localisation des sites de surveillance peut suivre différentes stratégies : une répartition aléatoire, systématique (grille), systématique renforcée (concentration locale de prélèvements dans une maille), ciblée (répartition sur la base de connaissances techniques) ou stratifiée (prélèvements dans des zones considérées comme homogènes au regard d'un critère particulier). Les stratégies utilisées dans les réseaux de mesure varient selon les réseaux, et

aucune n'est majoritaire (*figure 1*). Compte tenu de cette diversité, il ne paraît pas possible de proposer une stratégie d'échantillonnage commune sans exclure les sites de nombreux réseaux de mesure. De plus, il est évidemment préférable de s'appuyer sur des sites existants pour construire un réseau de mesure européen. Il est cependant indispensable, afin que les réseaux de mesure couvrent l'ensemble des types de sol et des modes d'occupation du sol, qu'une couverture spatiale minimale de l'Europe soit respectée. En maillant le territoire de l'Europe à partir d'une grille de 50 x 50 km, il est apparu que leur densité médiane correspondait à 8,3 sites par maille, soit environ 1 site pour 300 km². Nous avons montré par ailleurs que cette densité représentait un bon compromis entre le nombre de sites nécessaires pour couvrir l'ensemble des menaces qui pèsent sur le sol et le nombre de sites nouveaux qu'il serait financièrement acceptable d'implémenter. Ce nombre de sites nouveaux est estimé pour l'ensemble de l'Europe à 4100. Il se pourrait toutefois que ce chiffre soit légèrement surestimé compte tenu de l'existence de quelques réseaux pour lesquels les informations n'ont pas pu être obtenues. Notons qu'en ce qui concerne la France, le Réseau de mesures de la Qualité des Sols respecte les conditions que nous préconisons à l'échelle européenne dans le cadre de ce projet.

Surface des sites de surveillance

Afin de minimiser la variabilité spatiale intra-site, les placettes d'échantillonnage doivent comporter une couverture pédologique homogène. Pour cette raison, il est nécessaire que la surface échantillonnée ne soit pas trop importante. A l'inverse, pour pouvoir réaliser des répétitions de prélèvements sans perturber totalement le site il est souhaitable que cette surface ne soit pas trop petite. La surface d'échantillonnage des réseaux de surveillance pour lesquels nous avons obtenu cette information est comprise entre 10 m² et 4 ha (*figure 1*). Pour 51% des réseaux, la surface est comprise entre 300 et 1000 m². L'étude bibliographique réalisée a permis de collecter, pour 120 études, les coefficients de variations de différents paramètres du sol en fonction de la surface d'échantillonnage (*figure 2*). Pour la plupart des paramètres, le coefficient de variation augmente avec la surface de la zone étudiée avec notamment une forte augmentation pour les teneurs en éléments traces métalliques quand la surface est supérieure à 1 ha. Il semble donc préférable de limiter la taille d'un site à 1 ha. Il reste néanmoins que cette limitation de taille est principalement imposée par les moyens pouvant être mis en œuvre. Des sites de taille supérieure pourraient parfaitement convenir à la condition que leur densité de caractérisation soit suffisante. D'autre part, afin de permettre une répétition des prélèvements qui ne perturbe pas trop le site et de n'exclure qu'une faible partie des réseaux de mesure, nous recommandons que la taille minimale d'un site soit de 100 m², ce qui correspond à un carré de 10 m de côté ou à un cercle d'environ 11 m de diamètre.

Figure 1 - Caractéristiques des différentes stratégies d'échantillonnage des réseaux de suivi des sols européens (a : sélection des sites, b : surface des sites, c : nombre de sous-échantillons prélevés, d : pas de temps d'échantillonnage, e : stratégie d'échantillonnage du sol, f : température de séchage des échantillons de sol).

Figure 1 - Sampling strategy properties of the European soil monitoring networks (a: site selection, b: site areas, c: number of subsamples taken, d: sampling time step, e: sampling soil strategy, f: temperatures used for drying soil samples)

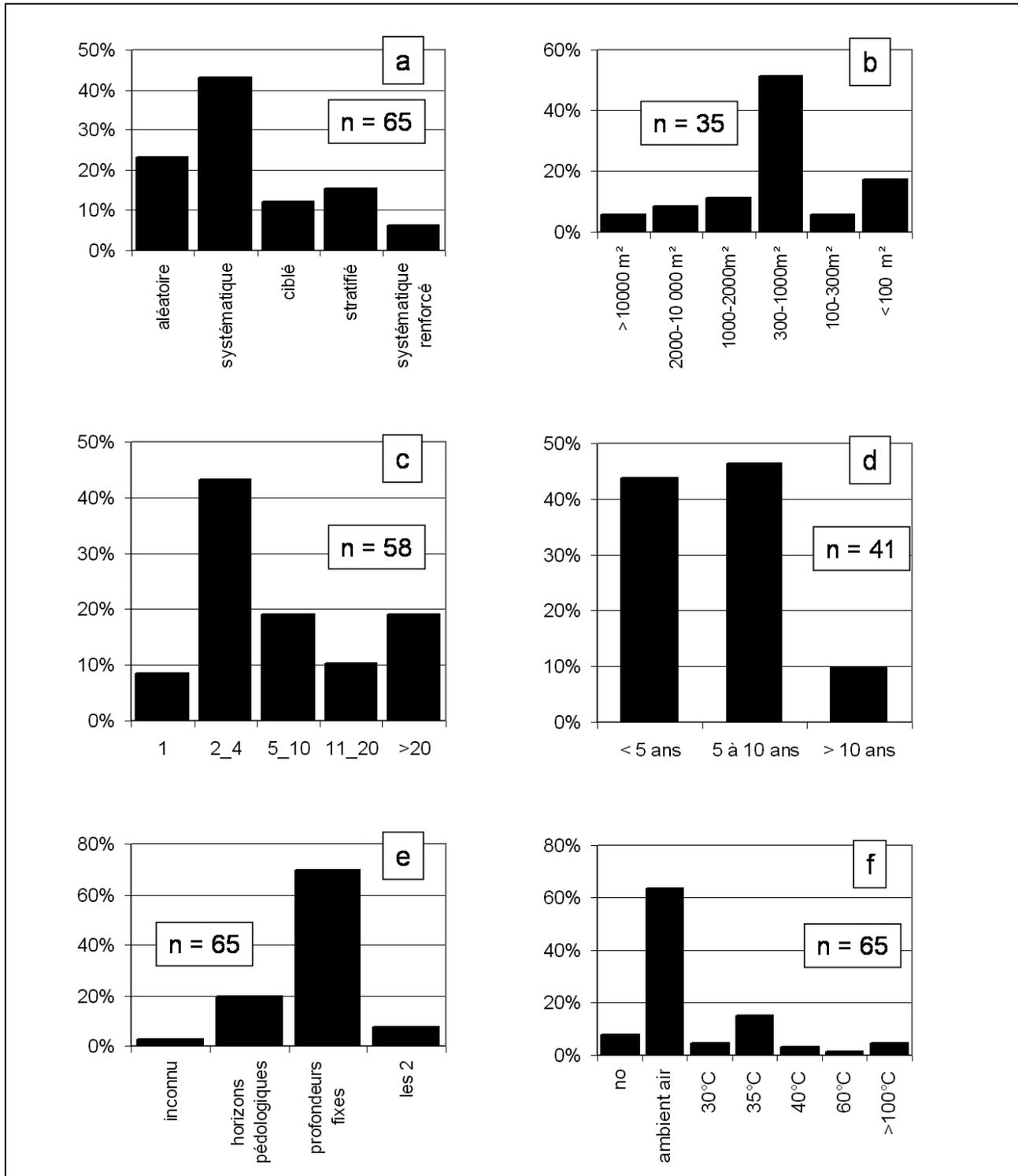
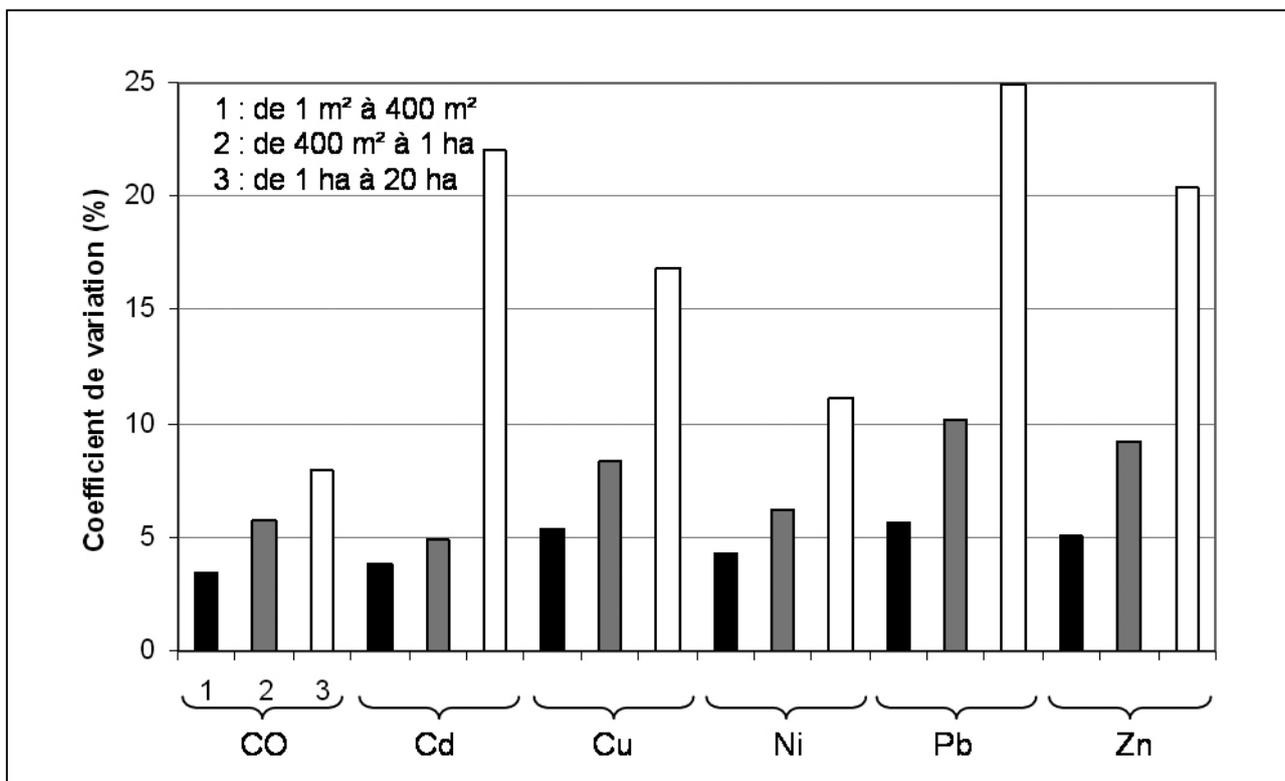


Figure 2 - Coefficient de variation médian pour 6 indicateurs (CO : teneur en carbone organique, et concentration totale en Cd, Cu, Ni, Pb, Zn) en fonction de la surface étudiée.

Figure 2 - Median coefficient of variation for 6 soil indicators (CO : organic carbon content, and total concentration in Cd, Cu, Ni, Pb, Zn) as a function of the studied area.



Sous-échantillons et échantillons composites

Dans la plupart des cas, l'échantillonnage consiste en un prélèvement de plusieurs sous-échantillons de sol regroupés en un échantillon composite dans le but de minimiser l'effet que pourrait avoir la variabilité spatiale à l'intérieur du site de surveillance. Parmi les 58 réseaux de mesure pour lesquels l'information a été obtenue, 5 ne prélèvent qu'un seul échantillon, les 53 autres prélèvent de 2 à 100 sous-échantillons (figure 1). Le nombre médian de prélèvements de sol est de 4. La recommandation faite afin d'harmoniser les réseaux de mesure européens est de prélever au moins 4 sous-échantillons, ce nombre étant à adapter en fonction de la surface du site de surveillance et/ou de la variabilité spatiale intra-site, si celle-ci est connue. En outre, un géoréférencement précis des prélèvements est recommandé de manière à ne pas prélever des échantillons aux mêmes endroits lors des campagnes futures.

Pas de temps d'échantillonnage

Les pas de temps d'échantillonnage varient en fonction des paramètres mesurés et des réseaux de mesure. Ils varient de moins d'une année à 20 ans. Les pas de temps inférieurs à 10 ans sont utilisés pour la plupart des paramètres relativement stables dans le temps et dans 90 % des réseaux sur lesquels on dispose de l'information (figure 1). Recommander un pas de temps maximum de 10 ans permet donc de prendre en compte la majorité des réseaux de mesure. Il a été montré par ailleurs que ce pas de temps permettrait de détecter des évolutions significatives dans le temps pour des paramètres tels que la teneur en carbone organique (Saby et Arrouays, 2004).

Profondeur d'échantillonnage

Deux grands types de stratégie sont utilisés pour échantillonner le sol : prélever des horizons pédologiques ou selon des profondeurs fixes. Soixante-dix-huit pourcent des réseaux de mesure européens prélèvent des échantillons de sol à des profondeurs fixes (figure 1). Cette méthode présente l'avantage d'harmoniser

les protocoles d'échantillonnage, évitant ainsi la subjectivité relative à la personne prélevant les échantillons. Elle facilite grandement la comparaison entre les résultats de différents réseaux de mesure. Pour ces raisons, il semble préférable d'utiliser la méthode de prélèvement à profondeur fixe. Toutefois, la meilleure pratique consisterait à prélever des échantillons suivant les 2 stratégies afin de n'exclure aucun réseau de mesure et afin d'assurer un lien entre les bases de données de surveillance des sols et celles d'inventaire cartographique, les objets décrits et analysés dans ces dernières étant le plus souvent des horizons.

La profondeur d'investigation est très hétérogène suivant les réseaux, compliquant ainsi fortement la comparaison des résultats entre pays. Il est néanmoins difficile de recommander des profondeurs standard à échantillonner. En effet, un changement de la profondeur des prélèvements entraînerait une quasi-impossibilité pour certains réseaux de mettre en évidence des évolutions entre 2 campagnes de mesure. Une façon d'harmoniser les réseaux serait de convertir les teneurs en une masse minérale équivalente (Ellert et Bettany, 1995). Cela conduirait toutefois à devoir mesurer la densité apparente à chaque campagne et sur l'ensemble des sites de mesure, ce qui n'est pas le cas actuellement, ce paramètre n'étant mesuré que sur la moitié des sites de surveillance environ. Compte tenu de l'importance des surfaces dont les sols sont travaillés en Europe, et considérant le fait que les changements majeurs de stocks d'éléments interviennent le plus souvent dans les horizons de surface, il apparaît néanmoins indispensable que les réseaux puissent mesurer des variations de teneurs ou de stocks sur des profondeurs comprises entre 0-15 et 0-30 cm.

Mesures de densité apparente

La densité apparente est mesurée dans certains réseaux de quelques pays. Elle n'est par exemple pas mesurée en Pologne, en République Tchèque ou au Royaume Uni. Dans le cas où l'harmonisation des prélèvements de sol passe par l'obtention d'une masse minérale équivalente, un effort important devra être réalisé dans certains pays européens.

Les méthodes de mesure de densité apparente n'ont pas été décrites pour la plupart des réseaux de mesure, probablement en raison de la variabilité des méthodes utilisées dans un même réseau en fonction de la présence ou non d'éléments grossiers dans le sol. La densité apparente, étant une mesure très variable sur une petite distance, il est préférable de réaliser au moins 3 répétitions des mesures sur des volumes supérieurs à 500 cm³. Les méthodes préconisées sont les méthodes d'excavation faites en dehors - mais à proximité - du site de surveillance car ces méthodes sont trop destructrices pour un suivi à long terme. L'estimation de la densité apparente à l'aide de fonctions de pédotransfert (FPT) est déconseillée pour les raisons suivantes : d'une part l'estimation de la densité utilise parfois comme variable la teneur en carbone organique, créant ainsi un biais lors du calcul des stocks de carbone organique, et d'autre

part, si la densité apparente est utilisée comme indicateur de la compaction des sols, son estimation par des FPT n'aurait pas de réel sens physique car les FPT ne rendent pas compte des contraintes subies par le sol.

Poids des échantillons et préparation

Le poids total des échantillons prélevés doit être suffisant pour réaliser l'ensemble des analyses et quelques éventuelles répétitions ou vérifications, notamment en cas d'apparition de nouvelles méthodes d'analyse. La méthode ISO 11464 recommande de prélever 500 g de sol, toutefois il serait préférable de prélever et de stocker environ 3 à 10 kg de sol dans le but de pouvoir réaliser de futures analyses pour lesquelles on ne connaît pas la quantité de sol nécessaire. De plus, on recommande que 10 % des sites prélevés soit ré-analysés lors des campagnes de mesures futures, le matériel prélevé servirait donc également à réaliser ces futures mesures.

Quelques recommandations concernant la préparation des échantillons doivent également être faites. La température de séchage des échantillons ne doit pas dépasser 40 °C. En effet, une température supérieure perturbe la spéciation des éléments traces métalliques, peut modifier le pH du sol (Martinez *et al.*, 2003) et certaines propriétés du sol comme la rétention en eau.

La plupart des réseaux tamisent leurs échantillons à 2 mm avant de réaliser les analyses. Cette limite granulométrique étant mondialement reconnue, nous la recommandons pour la préparation des échantillons de sol. Les fragments supérieurs à 2 mm doivent être conservés de manière à déterminer leur proportion dans l'échantillon de sol.

Archivage des échantillons

Parmi les réseaux de mesure pour lesquels on dispose de l'information, 72 % archivent leurs échantillons de sol. Il est bien évidemment recommandé d'archiver les échantillons prélevés de manière à pouvoir refaire des analyses avec de nouveaux protocoles analytiques, à pouvoir mesurer de nouveaux indicateurs, et à constituer une banque d'échantillons pour l'inter calibration entre les laboratoires. Il est recommandé de conserver les échantillons en grande quantité (3 à 10 kg), séchés à 40 °C dans des containers étanches à l'abri d'éventuelles contaminations, et placés dans des pièces subissant un minimum de variations de température et d'humidité. En raison de l'importance de l'effet de l'agrégation sur certaines dynamiques du sol, nous préconisons également qu'au moins une partie des échantillons soit séchée à 40 °C mais archivée sans tamisage préalable.

CONCLUSION

Cette étude représente l'état des lieux sur les stratégies de prélèvement utilisées par les réseaux de surveillance des sols le plus exhaustif à notre connaissance. Il existe des réseaux de mesure dans l'ensemble des 27 pays européens étudiés, dont la plupart est membre de l'Union Européenne, qui sont toutefois très hétérogènes en terme de stratégie d'échantillonnage.

L'harmonisation des stratégies des réseaux représente un problème délicat ; en effet, la plupart des changements que nous serions amenés à proposer entraînerait la quasi impossibilité de comparer les résultats avec ceux des campagnes de mesure précédentes. Il paraît cependant nécessaire d'harmoniser les réseaux de surveillance de la qualité des sols en Europe de manière à pouvoir les comparer entre eux. Les propositions que nous avons pu formuler grâce à cette revue des sites existants et à notre méta-analyse de la littérature vont dans ce sens. Toutefois, cette harmonisation demandera un effort considérable à de nombreux pays et il n'est pas certain qu'ils aient tous la capacité de respecter les propositions faites dans le cadre de cette étude. Quoi qu'il en soit, le projet ENVASSO permet d'asseoir une nouvelle base sur laquelle il sera possible de s'appuyer pour parvenir à cette harmonisation.

REMERCIEMENTS

Nous remercions la DG Recherche, Technologie et Développement de la Commission Européenne pour le financement du Projet ENVASSO (Contrat N° 022713) dans le cadre du 6^e Programme Cadre de Recherche et Développement. Nous remercions également Antonio Bispo, ainsi qu'un lecteur anonyme, pour leur relecture très constructive d'une première version de cet article.

BIBLIOGRAPHIE

- Arrouays D., Vion I., Jolivet C., Guyon D., Couturier A., Wilbert J., 1997 - Variabilité intraparcélaire de quelques propriétés des sols sableux des Landes de Gascogne (France) conséquences sur la stratégie d'échantillonnage agronomique. *Etude et Gestion des Sols*, 4, 1, pp. 5-15.
- Arrouays D., Vogel H., Eckelmann W., Armstrong-Brown S., Loveland P., Coulter B., 1998 - Soil monitoring networks in Europe. 16th World Congress of Soil Science - Montpellier, France, August 1998.
- Bourennane H., Dère C., Lamy I., Cornu S., Baize D., Van Oort F., King D., 2006 - Enhancing spatial estimates of metal pollutants in raw wastewater irrigated fields using a topsoil organic carbon map predicted from aerial photography. *Science of the Total Environment*, 361, pp. 229-248.
- Bourennane H., Nicoulaud B., Couturier A., King D., 2004 - Exploring the spatial relationship between some soil properties and wheat yields in two soil types. *Precision Agriculture*, 5, pp. 521-536.
- Brouder S. M., Hofmann B. S., Morris D. K., 2005 - Mapping Soil pH : Accuracy of Common Soil Sampling Strategies and Estimation Techniques. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 69, pp. 427-442.
- Burgos P., Madejon E., Pérez-de-Mora A., Cabrera F., 2006 - Spatial variability of the chemical characteristics of a trace-element-contaminated soil before and after remediation. *Geoderma*, 130, pp. 157-175.
- CEC, 2002 - Communication of 16 April 2002 from the Commission to the Council, the European Parliament, the Economic and Social Committee and the Committee of the Regions - Towards a Thematic Strategy for Soil Protection [COM(2002) 179 final]. At: <http://europa.eu/scadplus/leg/en/lvb/l28122.htm>. last accessed: 19/10/2006.
- CEC, 2006 - Proposal for directive of the European Parliament and of the council: establishing a framework for the protection of soil and amending Directive 2004/35/EC. Brussels, 22/09/2006, 30 p.
- Cox M. S., Gerard P. D., Abshire M. J., 2006 - Selected soil properties' variability and their relationships with yield in three mississippi fields. *Soil Science*, 171 (7), pp. 541-551.
- Ellert B. H., Bettany J. R., 1995 - Calculation of organic matter and nutrients stored in soils under contrasting management regimes. *Canadian Journal of Soil Science*, 75, pp. 529-538.
- FAO/ECE, 1994 - International Workshop on Harmonisation of Soil Conservation Monitoring Systems. FAO-FAO/ECE-RISSAC. Budapest.
- Filippi N., 2005 - Soil Mapping and Soil Monitoring : State of Progress and Use in Italy, pp. 193-200 *In*: Soil Resources of Europe, second edition. Jones, R. J. A., Houšková, B., Bullock, P., Montanarella, L. (eds). European Soil Bureau Research Report No 9, EUR 20559 EN, (2005), 420 p. Office for Official Publications for the European Communities, Luxembourg.
- Johnson C. E., Johnson A. H., Huntington T. G., 1990 - Sample size requirements for the determination of changes in soil nutrient pools. *Soil Science*, 150 (3), pp. 637-644.
- Jolivet C., 2000 - Le carbone organique des sols des Landes de Gascogne. Variabilité spatiale et effets des pratiques sylvicoles et agricoles. Thèse. Université de Bourgogne, 324 p.
- Homann P. S., Bormann B. T., Boyle J. R., 2001 - Detecting treatment differences in soil carbon and nitrogen resulting from forest manipulations. *Soil Science Society of America Journal*, 65 (2), pp. 463-469.
- Ibáñez J. J., Sánchez Díaz J., de Alba S., López Árias M., Boixadera J., 2005 - Collection of Soil Information in Spain : a review in 2003, pp. 345-356 : *In*: Soil Resources of Europe, second edition. Jones, R. J. A., Houšková, B., Bullock, P. et Montanarella, L. (eds). European Soil Bureau Research Report No 9, EUR 20559 EN, (2005), 420 p. Office for Official Publications for the European Communities, Luxembourg.
- King D., Montanarella L., 2002 - Inventaire et surveillance des sols en Europe. *Etude et Gestion des sols*, 9 (2), pp. 137-148.
- López-Granados F., Jurado-Exposito M., Pena-Barragan J. M., Garcia-Torres L., 2005 - Using geostatistical and remote sensing approaches for mapping soil properties. *European Journal of Agronomy*, 23 (3), pp. 279-289.
- Martínez C. E., Jacobson A. R., McBride M. B., 2003 - Aging and temperature effects on DOC and elemental release from a metal contaminated soil. *Environmental Pollution*, 122 (1), pp. 135-143.
- Odlare M., Svensson K., Pell M., 2005 - Near infrared reflectance spectroscopy for assessment of spatial soil variation in an agricultural field. *Geoderma*, 126, pp. 193-202.
- Rasmussen J., Aamand J., Rosenberg P., Jacobsen O. S., Sorensen S. R., 2005 - Spatial variability in the mineralisation of the phenylurea herbicide linuron within a Danish agricultural field: multivariate correlation to simple soil parameters. *Pest Management Science*, 61, pp. 829-837.
- Reichardt K., 1990 - Soil spatial variability and symbiotic nitrogen fixation by legumes. *Soil Science*, 150 (3), pp. 579-587.
- Ritz K., McNicol J. W., Nunan N., Grayston S., Millard P., Atkinson D., Gollotte A., Habeshaw D., Boag B., Clegg C. D., Griffiths B. S., Wheatley R. E., Glover L. A., McCaig A. E., Prosser J. I., 2004 - Spatial structure in soil chemical and microbiological properties in an upland grassland. *FEMS Microbiology Ecology*, 49 (2), pp. 191-205.

- Saby N., Arrouays D., 2004 - Simulation of the Use of a Soil-Monitoring Network to Verify Carbon Sequestration in Soils: Will Changes in Organic Carbon Stocks be Detectable?. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 35 (17-18), pp. 2379-2396.
- Shukla M. K., B.K.S., Lal R., Cepuder P., 2004 - Spatial variability of soil properties and potential management classification of a chernozemic field in lower Austria. *Soil Science*, 169 (12), pp. 852-860.
- Stenberg B., Jonsson A., Börjesson T., 2005 - Use of near infrared reflectance spectroscopy to predict nitrogen uptake by winter wheat within fields with high variability in organic matter. *Plant and Soil*, 269, pp. 251-258.
- Syed B, Loveland P., Arrouays D. 2000 - Towards a European soil monitoring system. EIONET workshop on a proposal for a European monitoring and assessment framework for soil. European Environment Agency. Vienna, 12-14 Oct. 1999. pp. 28-34.
- Wopereis M. C., Gascuel-Odoux C., Bourrie G., Soignet G., 1988 - Spatial variability of heavy metals in soil on a one-hectare scale. *Soil Science*, 146 (2), pp. 113-118.