
Le Réseau de Mesures de la Qualité des Sols de France (RMQS)

Etat d'avancement et premiers résultats

C. Jolivet, D. Arrouays, L. Boulonne, C. Ratié et N. Saby

Avec la collaboration technique de Philippe Berché, Didier Laloua, Sébastien Lehmann, Eugénie Tientcheu et Gérald Yart

INRA, Unité Infosol, 2163, Avenue de la Pomme de Pin - BP 20619 - ARDON - 45166 Olivet Cedex 2

RÉSUMÉ

Le Réseau de Mesures de la Qualité des sols est en cours d'installation sur le territoire français. Plus de la moitié des 1 650 sites que comptera ce réseau ont été mis en place et la première campagne de mesures devrait être achevée à la fin de l'année 2008. Les premiers examens des données collectées montrent une représentativité nationale satisfaisante en terme d'occupation des sols et vis-à-vis de quelques variables (textures de surface et teneurs en carbone organique) en comparaison avec les données issues de la Base de Données d'Analyses de Terres. L'analyse des premiers résultats du RMQS montre que ce réseau permet de mettre en évidence des gradients de contamination diffuse en éléments traces métalliques, notamment autour des grandes agglomérations et des pôles industriels. L'analyse et l'interprétation des données qui n'en sont qu'à leurs prémices nécessiteront un fort investissement scientifique, mais d'ores et déjà, la qualité des données collectées laisse présager de grandes potentialités pour le RMQS.

Mots clés

Qualité des sols, réseau de surveillance, France

SUMMARY**THE FRENCH SOIL QUALITY MONITORING NETWORK: STATE OF PROGRESS AND FIRST RESULTS**

A soil quality monitoring network is currently being implemented in France. More than half of the 1650 sites of this network have already been settled and the first campaign of sampling should be achieved by the end of 2008. Preliminary data treatments show that this network is representative for land cover, organic carbon contents and particle-size distributions of French soils when compared to a large database on French topsoil properties. Our results show that the network can provide good estimates of gradients of diffuse contamination by trace elements, especially around big cities and industrialised areas. Further data analyses and interpretations will require a lot of scientific efforts, but the quality of the collected data appears promising.

Key-words

Soil quality, monitoring network, France

RESUMEN**LA RED DE MEDIDAS DE LA CALIDAD DE LOS SUELOS DE FRANCIA (RMQS): estado de desarrollo y primeros resultados**

La red de medidas de la calidad de los suelos es en vía de instalación sobre el territorio francés. Se instaló más de la mitad de los 1650 sitios que cuenta esta red y la primera campaña de medidas debería ser terminada al fin del año 2008. Los primeros exámenes de los datos colectados muestran una representatividad nacional satisfactoria en termino de uso del suelo y en frente a algunas variables examinadas (texturas de superficie y contenidos en carbono orgánico) en comparación con los datos que provienen del banco de datos de análisis de tierras. El análisis de los primeros resultados de la RMQS muestra que esta red permite poner en evidencia gradientes de contaminación difusa en elementos en trazas, en particular en los alrededores de las grandes aglomeraciones y de los polos industriales. El análisis y la interpretación de los datos que son únicamente al principio necesitaran una grande inversión científica, pero ya, la calidad de los datos colectados deja predecir grandes potencialidades para la RMQS.

Palabras clave

Calidad del suelo, red de vigilancia, Francia

La protection des sols n'a jusqu'ici été que peu prise en compte dans les politiques publiques. Longtemps considérés par les décideurs et les aménageurs comme un bien privé et un simple support à la production agricole, les sols viennent aujourd'hui au centre des préoccupations à la faveur d'une récente prise de conscience. En position d'interface, les sols jouent en effet des rôles clés dans l'environnement : dans le changement climatique en tant que puits ou source de gaz à effet de serre, dans la protection de la qualité de la ressource en eau en tant que filtre de nombreuses matières contaminantes, dans la protection contre les inondations en tant que réservoir tampon vis-à-vis des eaux pluviales, dans le maintien de la biodiversité en tant que milieu de vie d'un patrimoine génétique encore largement inconnu, etc. La récente communication de la Commission européenne sur les sols confirme l'émergence d'une nouvelle politique environnementale de protection des sols (Commission européenne, 2002). Une future directive européenne sur les sols devrait en représenter la concrétisation.

Face au constat que la France ne disposait pas, contrairement à d'autres pays européens (le Royaume-Uni, la Suisse, la Hongrie par exemple), d'outil permettant d'évaluer et de suivre la qualité des sols (King *et al.* 1999), le Groupement d'Intérêt Scientifique Sol (GIS Sol) a décidé de mettre en place le Réseau de Mesures de la Qualité des Sols (RMQS). Ce réseau constitue un cadre national pour l'observation de l'évolution de la qualité des sols. Il produira des données quantitatives pour caractériser l'état des sols et mesurer l'évolution de leur qualité afin qu'ils puissent être pris en compte dans les décisions environnementales et territoriales et être gérés durablement (Arrouays *et al.*, 2002).

En 2003, Arrouays *et al.* (2003) ont dressé un premier bilan de l'état d'avancement du Réseau de Mesures de la Qualité des Sols. Depuis, plus de la moitié des sites, sur les 1 650 que compte ce réseau, ont été installés. Les échantillons prélevés ont été analysés et des premiers résultats commencent à être disponibles (Saby *et al.*, 2006). Après un rappel des objectifs attendus et de la configuration du réseau, cet article dresse un nouveau bilan de l'état d'avancement du RMQS et présente quelques premiers résultats.

OBJECTIFS DU RÉSEAU DE MESURES DE LA QUALITÉ DES SOLS

Le Réseau de Mesures de la Qualité des Sols produira des données quantitatives sur l'état et l'évolution des sols français qui serviront à remplir les objectifs suivants :

- **Bilan national** : ce réseau constituera un tableau de bord de la qualité des sols. Il permettra de dresser un bilan de la qualité des sols et servira de référence nationale vis-à-vis des propriétés mesurées.
- **Caractériser des gradients** : le RMQS permettra de mettre en évidence et de cartographier des gradients de valeurs de para-

mètres du sol à l'échelle du territoire. La réalisation de cartes de contamination diffuse en éléments traces métalliques sera l'une des applications possibles.

- **Détecter des évolutions** : à partir de la deuxième campagne de mesures, ce réseau permettra de mesurer et de suivre l'évolution des propriétés du sol grâce au suivi à long terme de propriétés physico-chimiques. Ces données seront utiles pour détecter de façon précoce les signes de dégradation de l'état des sols. Elles permettront en outre de mettre au point ou d'améliorer les indicateurs de la qualité des sols pouvant servir d'outils d'aide à la décision pour les acteurs potentiels du sol (agriculteurs, gestionnaires des ressources naturelles, etc.).

- **Support de validation** : le RMQS est le seul réseau d'observations des sols couvrant la totalité du territoire national. À ce titre, il constitue une base de données d'une grande richesse qui permettra, par exemple, de valider des prédictions géographiques établies à partir de modèles d'évolution.

- **Banque d'échantillons** : la totalité des échantillons prélevés sur les sites du RMQS sera conservée au Conservatoire national d'échantillons de sols. La banque d'échantillons ainsi constituée aura de multiples applications. Il sera ainsi possible de réaliser de nouvelles analyses : micro-polluants organiques, pesticides, radioéléments, populations microbiennes, par exemple.

CADRE INSTITUTIONNEL

Le Réseau de Mesures de la Qualité des Sols est développé dans le cadre du Groupement d'Intérêt Scientifique (GIS) Sol. Ce groupement réunit les ministères en charge de l'Agriculture et de l'Environnement, l'Institut National de la Recherche Agronomique (INRA), l'Institut Français de l'Environnement (IFEN), l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME) et l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD). La responsabilité de la coordination nationale du RMQS, de sa mise en place et de son suivi, de la diffusion des résultats et de leur valorisation a été confiée par le GIS Sol à l'Unité InfoSol de l'INRA d'Orléans.

MISE EN ŒUVRE

InfoSol s'appuie sur un réseau de partenaires régionaux pour assurer la mise en place du RMQS sur le territoire français (*planche 1*). Ce réseau de partenaires est constitué d'équipes appartenant à des structures régionales possédant des compétences en pédologie et l'infrastructure nécessaire pour prendre en charge l'installation sur le terrain des sites du RMQS (chambres d'agriculture, établissements d'enseignement supérieur, bureaux d'études, associations, etc.). Le travail est réalisé en partenariat, le coût de la mise en place des sites étant partagé entre le GIS Sol et les équipes partenaires.

La mise en place d'un site RMQS comporte plusieurs étapes

décrites de façon détaillée dans un manuel (Jolivet *et al.*, 2006). Ce document donne des principes et des instructions précises que chaque partenaire s'engage à respecter en passant une convention avec l'INRA. Une attention particulière a été accordée, dans la rédaction de ce cahier des charges, aux procédures relevant de l'assurance qualité afin de garantir une homogénéité et une qualité irréprochable des données collectées par les différents partenaires.

CONFIGURATION DU RMQS ET STRATÉGIE D'ÉCHANTILLONNAGE

Le RMQS repose sur le suivi de 1650 sites régulièrement répartis sur le territoire métropolitain, selon une grille systématique de maille carrée de 16 km de côté, calée sur le quadrillage Lambert II étendu (*figure 1*). Le RMQS est calé sur la même grille que le réseau européen de suivi des dommages forestiers (Union européenne et ICP-Forest niveau 1, International Cooperative Program on Assessment and Monitoring of Air Pollution Effects on Forests) déployé en 1989 et géré en France par le Département de la Santé des Forêts du ministère chargé de l'Agriculture. La configuration du RMQS a été choisie afin que ces deux réseaux soient parfaitement complémentaires et couvrent les principales combinaisons sol -

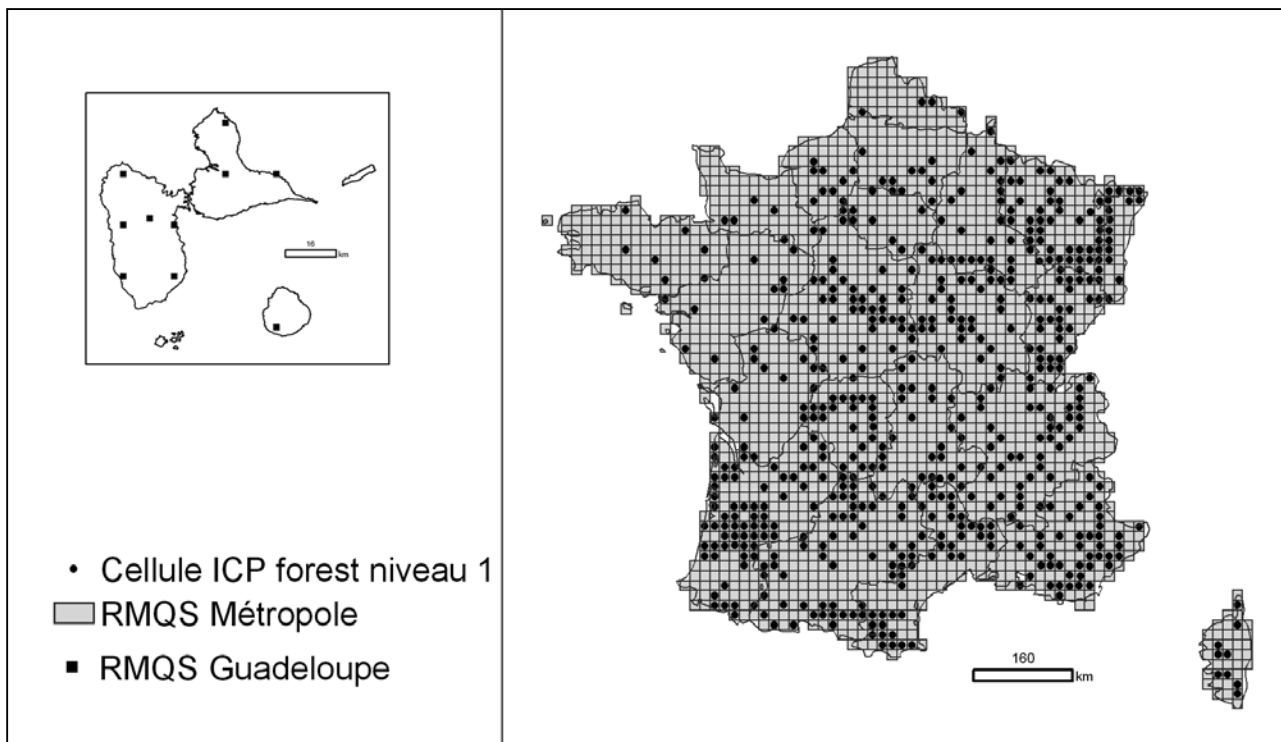
occupation rencontrées en France. Ensemble, ils représentent 2200 sites de surveillance de la qualité des sols. En outre, une analyse de représentativité des sites RMQS a été réalisée à l'échelle du territoire français pour confirmer l'intérêt du choix de la grille de 16 km x 16 km (Arrouays *et al.*, 2001). Contrairement au réseau ICP-Forest, les départements et territoires d'Outre-mer, devraient être couverts par le RMQS. Une étude de faisabilité figure dans les objectifs du GIS Sol et d'InfoSol pour la période 2006-2010. A titre d'essai, 10 sites RMQS ont été installés en Guadeloupe en mars 2006 par une équipe d'InfoSol avec l'appui de l'Unité de Recherche Agro-Pédo-Climatique du centre INRA Antilles-Guyane.

La première campagne de mesure du RMQS a démarré en 2001 et devrait s'achever en 2008. Par la suite, des mesures et des observations seront effectuées tous les 10 ans sur les 1650 sites du réseau. En ce qui concerne les 557 sites du réseau ICP-Forest niveau 1, une caractérisation écologique complète, incluant une description des sols, a été réalisée en 1993-1994. Une nouvelle campagne d'observations menée par l'IFN (Inventaire Forestier National) est prévue en 2006-2007, dans le cadre du projet européen BioSoil. Un échantillonnage des sols utilisant la stratégie d'échantillonnage du RMQS va être réalisé simultanément au deuxième inventaire européen, afin que les données produites par les réseaux RMQS et ICP-Forest niveau 1 soient homogènes et comparables.

Les sites du RMQS sont implantés au plus près du centre de

Figure 1 - Grille 16 km x 16 km du RMQS et sites du réseau ICP Forest niveau 1

Figure 1 - 16 to 16 km grid of the RMQS and sites of ICP Forest level 1 network



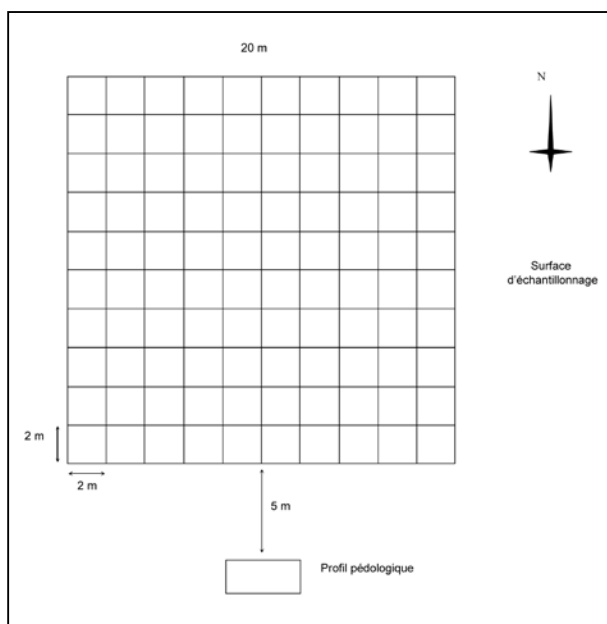
chaque cellule de la grille 16 km x 16 km. Sur chaque site, un dispositif de prélèvement de sol est mis en place avec l'accord de l'exploitant ou du propriétaire de la parcelle sélectionnée. Ce dispositif comporte une surface d'échantillonnage de 400 m² et une fosse pédologique (figure 2).

La surface d'échantillonnage doit permettre la collecte répétée d'échantillons composites au fil du temps. Le plan d'échantillonnage est de type aléatoire stratifié. Son principe est le suivant : lors de la première campagne de mesure, les 25 unités d'échantillonnage portant le numéro 1 sont échantillonnées. Lors des campagnes ultérieures, les échantillons seront prélevés au sein des unités d'échantillonnage portant les numéros 2, 3 puis 4. Dans chaque unité d'échantillonnage, l'emplacement du prélèvement est choisi aléatoirement. Les 25 échantillons, prélevés à la tarière, sont ensuite mélangés de façon à constituer un échantillon composite. Cette opération est réalisée dans la couche de surface du sol (0-30 cm) puis, si l'épaisseur du sol le permet, dans la couche sous-jacente (30-50 cm).

La fosse pédologique est réalisée pour la description du sol et à la collecte d'échantillons de chaque horizon décrit. Des échantillons volumétriques sont également prélevés pour la détermination de la masse volumique apparente, qui constitue à la fois une variable indispensable à la conversion des teneurs en stocks et un paramètre caractéristique de leur état physique.

De nombreuses autres observations sont réalisées sur chaque site :

Figure 2 - Dispositif de prélèvement et de description du sol
Figure 2 - Sampling design of soil description and collection



- géopositionnement du dispositif à l'aide d'un GPS de précision (précision inférieure à 50 cm) afin de pouvoir le réinstaller au même endroit à chaque campagne de mesures ;
- description de l'environnement du site afin de caractériser le milieu et déterminer les sources potentielles de contamination. La description de l'environnement lors de la première campagne sera aussi un élément de référence important à comparer avec celui observé lors des futures campagnes ;
- description de la végétation présente sur les parcelles non travaillées afin de caractériser précisément le milieu ;
- enquête sur l'historique et les modalités de gestion de la parcelle auprès des exploitants ou des propriétaires, notamment afin de connaître les apports anciens ou récents réalisés sur la parcelle et de caractériser précisément l'usage du sol.

Les éléments analysés en routine sont les suivants :

- Granulométrie sans décarbonatation (pipette de Robinson et tamisage sous l'eau, méthode validée par rapport à la norme NF X 31-107), 5 fractions (0-2 μm , 2-20 μm , 20-50 μm , 50-200 μm , 200-2000 μm),
- Teneur en eau résiduelle après séchage à 105 °C d'un échantillon séché à l'air,
- pH eau (NF ISO 10390, dilution au 1/5),
- Calcaire total (méthode volumétrique NF ISO 10693),
- Carbone organique sur sol décarbonaté (combustion sèche NF ISO 10694),
- Azote total (combustion sèche NF ISO 13878),
- Phosphore assimilable exprimé en P₂O₅ (méthode Olsen NF ISO 11263),
- Capacité d'échange cationique (extraction au chlorure de cobaltihexammine NF X 31-130),
- Cations échangeables : Al, Ca, Fe, K, Mg, Mn, Na, (extraction au chlorure de cobaltihexammine NF X 31-130),
- Bore soluble à l'eau (NF X 31-122),
- Eléments majeurs totaux : Al, Ca, Fe, K, Mg, Mn, Na (extraction HF + HClO₄, NF ISO 14689-1),
- Fer libre, méthode Tamm (en obscurité) et méthode Mehra-Jackson,
- Eléments traces totaux : Cr, Cu, Ni, Zn, Cd, Co, Mo, Pb, Tl (extraction HF + HClO₄ NF ISO 14689-1),
- Eléments traces Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn (extraction à l'EDTA non tamponnée méthode INRA).

Des analyses complémentaires sont également réalisées pour caractériser certains sols particuliers (sols salés, ANDOSOLS, SULFATOSOLS, HISTOSOLS, etc.) ou à la demande de partenaires qui souhaiteraient prendre en charge des déterminations supplémentaires. Toutes les analyses sont réalisées par le Laboratoire d'Analyses de Sols de l'INRA d'Arras.

Toutes les données collectées sur les sites du RMQS sont stockées dans la base de données DONESOL qui contient l'ensemble

des données gérées par l'unité InfoSol dans le cadre des programmes de surveillance (RMQS) et d'inventaire des sols (IGCS).

LE CONSERVATOIRE NATIONAL D'ÉCHANTILLONS DE SOL

La totalité des échantillons du Réseau de Mesures de la Qualité des Sols est conservée au Conservatoire national d'échantillons de sol. Les échantillons sont réceptionnés et préparés au conservatoire, selon des procédures basées sur des normes Afnor ou ISO. Ils sont ensuite archivés dans une pédothèque en conditions contrôlées de température et d'humidité. Chaque site RMQS génère de 6 à 12 échantillons de sol, ce qui représente entre 10 et 40 kg de terre. Depuis le démarrage du projet, environ 7 500 échantillons ont été préparés puis archivés, soit l'équivalent de 19 tonnes de terre !

Parmi les fonctions attendues du Réseau de Mesures de la Qualité des Sols, la conservation à long terme des échantillons de sol prélevés lors de chaque campagne s'avère d'une importance capitale et ce pour plusieurs raisons. La conservation des échantillons est en effet indispensable pour avoir la possibilité de faire une analyse *a posteriori* d'évolutions passées, c'est-à-dire de pouvoir faire analyser dans le futur des variables qui ne posent pas actuellement de question environnementale ou dont l'analyse s'avère aujourd'hui techniquement irréalisable en routine ou très coûteuse. Elle est également indispensable pour pouvoir juger d'éventuelles dérives analytiques dans le temps, notamment avec l'amélioration des techniques d'analyses et l'abaissement des seuils de détection. Enfin elle constitue une banque de matériaux pour la recherche.

ETAT D'AVANCEMENT DU RMQS ET PREMIERS RÉSULTATS

Mise en place des sites

Depuis le démarrage officiel du projet RMQS au cours de l'année 2001, plus de 950 sites ont été mis en place. Ces sites sont représentés en vert sur la *planche 2*. Le rythme actuel d'installation est d'environ 250 sites par an et concerne toutes les régions de France.

Caractérisation des sites

Bien que tous les sites n'aient pas encore été prélevés, une première caractérisation des sites du RMQS fournit

des résultats intéressants, notamment vis-à-vis de sa représentativité à l'échelle nationale.

L'occupation du sol

L'examen des données concernant l'occupation des sites RMQS montre que sur les 636 sites pour lesquels cette information a été saisie dans la base de données, 67 % sont en terre arable, 26 % en prairie et 7 % se répartissent en forêts, vignes et vergers, marais, landes, etc. (*planche 3*). Les sites du RMQS mis en place jusqu'à présent sont principalement installés en sols cultivés, mais concernent également des occupations minoritaires. Les quelques sites forestiers mis en place correspondent à des bois de petite taille qui ne sont pas pris en compte par le réseau ICP-Forest niveau 1.

Comparaison aux résultats de la BDAT

Une première confrontation des données collectées dans le cadre du RMQS et de la Base de Données d'Analyses de Terres (BDAT) (Saby *et al.*, 2004 ; Lemerrier *et al.*, 2006), qui rassemble plus d'un million de résultats d'analyses d'échantillons d'horizons de surface de sols agricoles français, fournit des résultats intéressants vis-à-vis de la représentativité du RMQS à l'échelle nationale, pour les sols cultivés. Le diagramme de la *planche 4* représente la projection dans un triangle textural du nombre d'analyses disponibles dans la BDAT ainsi que les sites RMQS. La répartition de ces derniers au sein du triangle textural montre une bonne représentativité du

Figure 3 - Distribution statistique des teneurs en carbone des horizons superficiels des sols cultivés des sites du RMQS en noir (565 sites disponibles) et de la BDAT en gris.

Figure 3 - Statistical distribution of organic carbon content of RMQS cultivated topsoil (565 available sites) in black and of the national database of soil-tests in grey

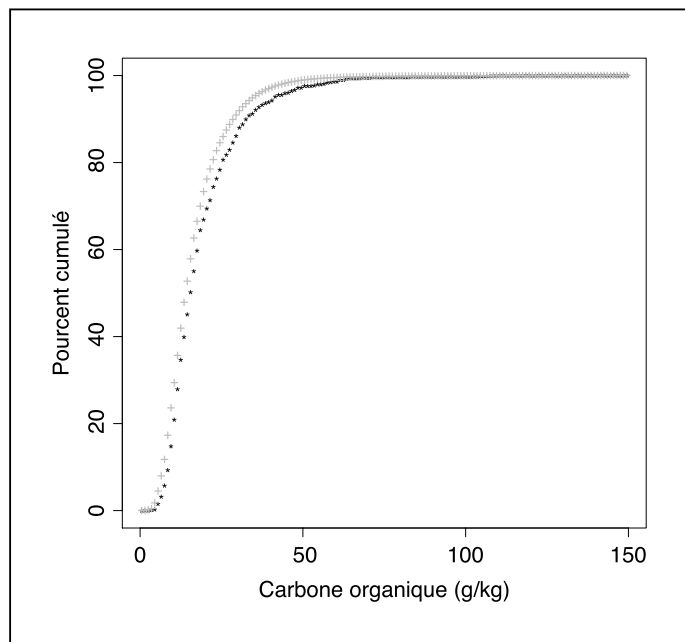


Tableau 1 - Résumé statistique des paramètres pédologiques mesurés dans la couche de sol de surface (0-30 cm) et de sub-surface (30-50 cm) des sites RMQS (les teneurs moyennes sont calculées en retirant du jeu de données les valeurs inférieures au seuil de détection)

Table 1 - Summary statistics on pedological parameters measured in topsoil (0 – 30 cm) and subsoil (30 – 50 cm) of RMQS sites (means are calculated without values smaller than the detection limit)

Couche de surface (0-30 cm)	Argile g.kg ⁻¹	Limons g.kg ⁻¹	Sables g.kg ⁻¹	Carbone organique g.kg ⁻¹	C/N	pH eau	CEC cmol ⁺ .kg ⁻¹	CaCO ₃ g.kg ⁻¹	Al échangeable cmol ⁺ .kg ⁻¹	P2O5 Olsen g.kg ⁻¹	Fer libre Tamm g.100 g ⁻¹
Minimum	33	30	9	2,6	7	4,0	1	< 1	< 0,02	< 0,002	0,20
1 ^{er} quartile	155	300	122	11,6	9	5,7	7	< 1	0,02	0,034	0,76
Médiane	208	437	269	15,9	10	6,6	11	1,0	0,04	0,060	1,11
3 ^e quartile	285	590	467	22,9	11	7,9	18	8,0	0,10	0,099	1,91
Maximum	795	798	915	109,0	21	8,8	55	759	3,33	0,293	6,92
Effectif	688	688	688	688	688	688	688	688	688	688	178
Moyenne	236	445	318	19,2	10	6,7	14	85	0,19	0,072	1,47

Couche de sub-surface (30-50 cm)	Argile g.kg ⁻¹	Limons g.kg ⁻¹	Sables g.kg ⁻¹	Carbone organique g.kg ⁻¹	C/N	pH eau	CEC cmol ⁺ .kg ⁻¹	CaCO ₃ g.kg ⁻¹	Al échangeable cmol ⁺ .kg ⁻¹	P2O5 Olsen g.kg ⁻¹	Fer libre Tamm g.100 g ⁻¹
Minimum	39	42	2	1,2	3	4,2	1	< 1	< 0,02	< 0,002	0,21
1 ^{er} quartile	181	291	116	4,4	8	6,0	6	< 1	0,02	0,009	0,85
Médiane	242	437	255	6,2	9	6,9	11	1,0	0,03	0,018	1,15
3 ^e quartile	318	577	443	9,9	10	8,0	17	4,3	0,09	0,037	1,89
Maximum	851	778	904	142,4	20	9,0	50	822	5,46	0,185	5,35
Effectif	620	620	620	620	620	620	618	620	620	620	147
Moyenne	263	434	301	8,2	9	6,9	13	109	0,21	0,029	1,49

RMQS, dont les sites couvrent une gamme de textures et une distribution comparable au sein du triangle.

Les teneurs en carbone organique des horizons de surface des sols cultivés du RMQS ont ensuite été comparés aux données issues de la BDAT. La *figure 3* montre que ces deux échantillons proviennent de la même population (test de Kolmogorov-Smirnov). Si l'on prend les données de la BDAT comme référence nationale pour les sols cultivés, on peut constater que, dans la configuration actuelle, les sites du RMQS sont déjà représentatifs des sols français, vis-à-vis des teneurs en carbone. Même provisoires, ces résultats sont importants, car ils confirment les choix méthodologiques faits quant à la configuration du RMQS et notamment l'intérêt du choix de la grille de 16 km x 16 km pour disposer d'un réseau représentatif des sols français.

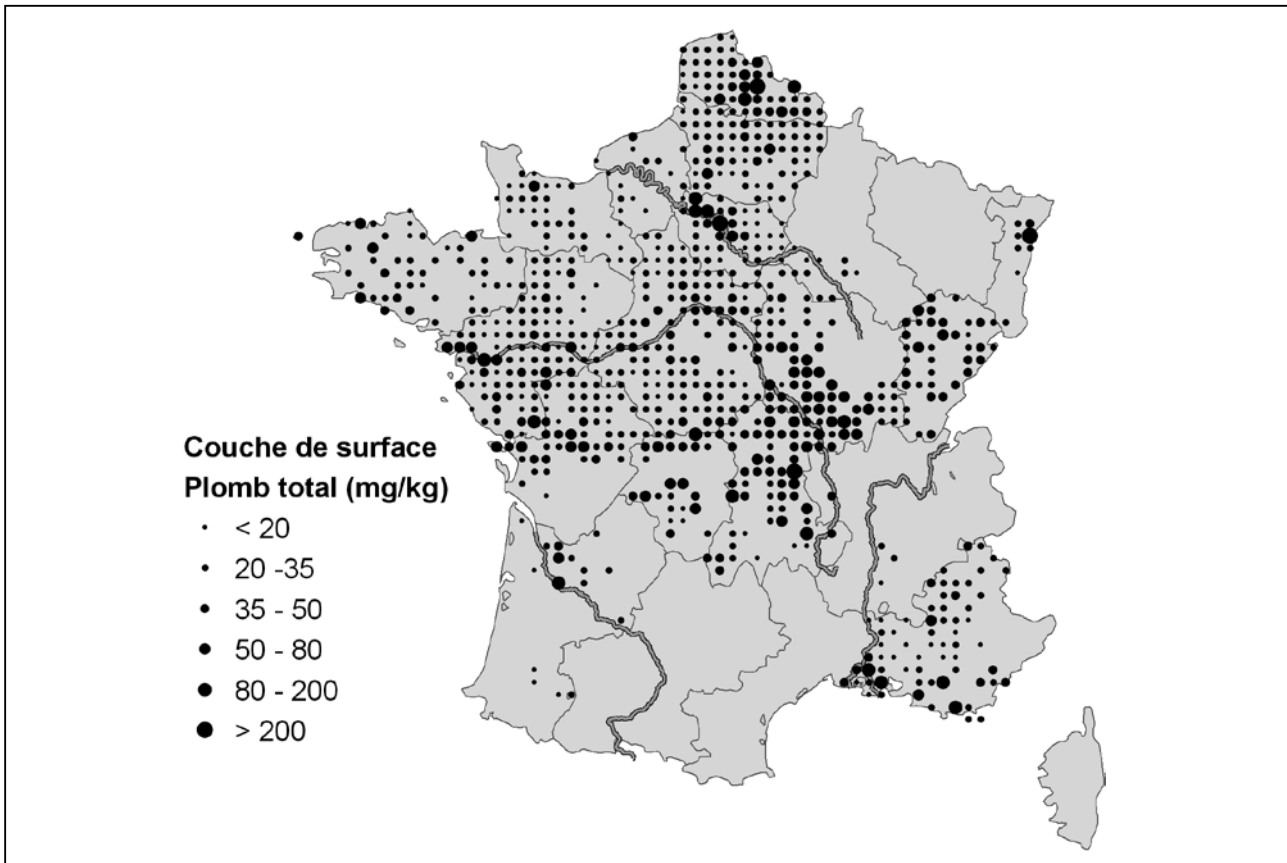
RÉSULTATS ANALYTIQUES

Le *tableau 1* présente la structure statistique de la population de sols échantillonnés dont nous disposons des résultats analytiques (688 sites). Les valeurs minimum et maximum, la moyenne, la médiane, l'effectif ainsi que le premier et le troisième quartile sont indiqués pour les principaux paramètres pédologiques mesurés. Les variables pédologiques mesurées montrent que les sols analysés jusqu'ici présentent une très grande diversité : les teneurs de la couche de surface s'échelonnent par exemple de 3 à 85 % d'argile, de 0,3 à 11 % de carbone organique ; le pH varie de 4 à 9, la CEC de 1 à 55 cmol + kg.

La détermination des teneurs en éléments traces métalliques donne des indications sur le niveau de contamination des sols. Le *tableau 2* présente la structure de la population échantillonnée pour

Figure 4A - Cartogramme de teneur totale en plomb dans la couche de sol de surface (0-30 cm) des sites RMQS

Figure 4A - Point maps of total Pb concentration measured in topsoil (0 – 30 cm) of RMQS sites



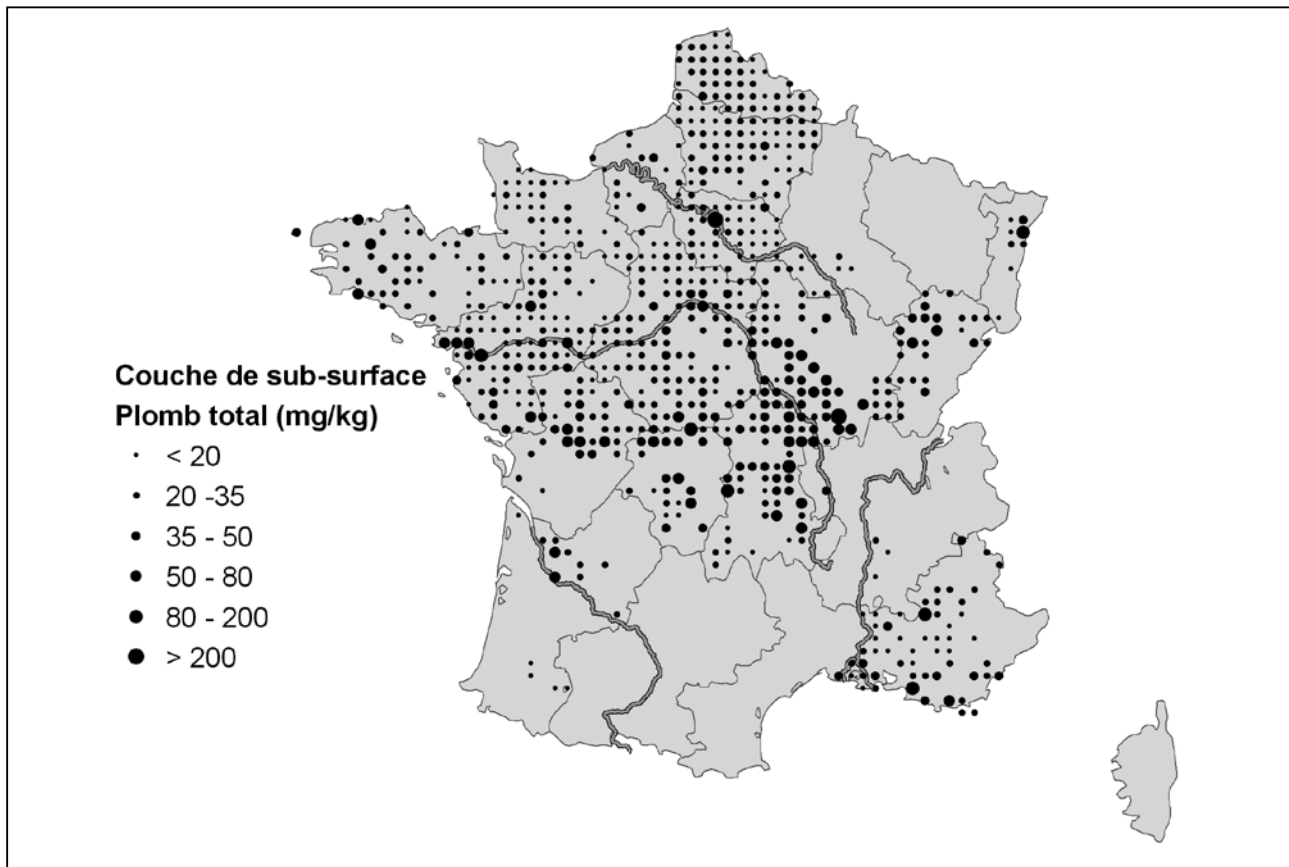
les éléments traces métalliques extraits de façon totale (extraction par l'acide fluorhydrique et l'acide perchlorique) ou partielle (extraction par l'EDTA). Ces données sont comparées aux gammes de valeurs ordinaires et d'anomalies naturelles rassemblées par Baize (1997) à partir d'un échantillon de sols français (programme ASPITET).

Les médianes mesurées pour les teneurs totales sont relativement faibles. La grande majorité des sites présente des teneurs correspondant aux gammes de valeurs couramment observées dans des sols « ordinaires » par Baize (1997). Un certain nombre de sites montre des teneurs supérieures à ces valeurs courantes, qui correspondent aux gammes de valeurs observées en cas d'anomalies naturelles modérées ou fortes. Un examen individuel approfondi de ces sites sera nécessaire pour vérifier si ces teneurs sont dues à des anomalies naturelles ou à des contaminations. Le rapport entre les teneurs mesurées dans la couche de surface et celles mesurées dans la couche sous-jacente, le rapport entre les teneurs totales et celles extraites par l'EDTA, l'analyse des sources potentielles de contamination ou encore, la comparaison avec d'autres sources de données nationales, telles que la Base

de Données d'Analyses de Terre (Saby *et al.*, 2004), ou la base de données ANADEME (Baize *et al.*, 2006), ou avec des sources de données régionales, tel que le Référentiel Pédogéochimique du Nord-Pas-de-Calais (Sterckeman *et al.*, 2002), sont autant de paramètres à confronter ou de méthodologies à mettre en œuvre pour réussir à quantifier les fractions naturelles et anthropogènes des teneurs observées et à évaluer les niveaux de contamination diffuse. Parmi les sites présentant des teneurs élevées, un certain nombre a déjà été clairement identifié comme ayant subi une contamination (cf. plus loin et Saby *et al.*, 2006).

Analyse spatiale

L'une des principales fonctions du RMQS est de mettre en évidence des gradients éventuels de contamination diffuse en éléments traces métalliques à l'échelle du territoire national. Bien que la couverture géographique du RMQS soit encore incomplète, la réalisation de cartogrammes de teneurs totales fournit déjà des informations pertinentes, notamment vis-à-vis de la capacité de ce réseau à mettre en évidence de tels gradients de contamination. A titre d'exemple, les cartogrammes de teneurs totales en plomb

Figure 4B - Cartogramme de teneur totale en plomb dans la couche de sol de sub-surface (30-50 cm) des sites RMQS**Figure 4B** - Point maps of total Pb concentration measured in topsoil subsoil (30 – 50 cm) of RMQS sites

mesurées en surface (0-30 cm) et dans la couche sous-jacente (30-50 cm) montrent clairement que ces teneurs ne sont pas distribuées de façon aléatoire et qu'elles présentent des structures spatiales nettes (*figures 4A et 4B*).

Les grands pôles urbains et industriels tels que la région parisienne, la région lilloise et le bassin minier du Nord-Pas-de-Calais, les régions nantaise et marseillaise correspondent sur ces cartogrammes à des groupes de points présentant de fortes teneurs. Ces fortes teneurs sont particulièrement nettes sur le cartogramme des teneurs de surface, alors qu'elles sont nettement atténuées sur le cartogramme des teneurs de sub-surface (à l'exception de la région nantaise). Cette différence témoigne en faveur d'une contamination par des apports anthropogènes de plomb.

D'autres motifs spatiaux qui ne correspondent pas à des zones de forte densité urbaine ou industrielle sont également visibles, notamment dans le secteur du massif du Morvan ou en Poitou-Charentes. Contrairement aux pôles urbains, ces zones de fortes teneurs se distinguent de façon identique dans les horizons de surface et de sub-surface. Ceci témoigne, dans ce cas, en faveur d'une origine naturelle du plomb (fond pédogéochimique). Certaines familles pédo-géologiques de la bordure du massif du Morvan, de même que les « terres rouges du Poitou » ont été reconnues pour pré-

senter des anomalies naturelles à l'origine de fortes teneurs en plomb (Baize, 1997).

On perçoit à travers cet exemple qu'une difficulté majeure dans l'interprétation des données du RMQS est de pouvoir distinguer dans les teneurs totales mesurées ce qui relève du fond pédogéochimique, d'une contamination diffuse ou d'une pollution ponctuelle. Un premier exercice de différenciation de l'origine du plomb et de caractérisation de la contamination diffuse des sols liée aux retombées atmosphériques a récemment été réalisé sur un secteur géographique regroupant 84 sites du RMQS en région Ile-de-France et dans les départements du Loiret et de l'Eure-et-Loir (Saby *et al.*, 2006). Cette analyse, fondée sur le calcul d'un indice d'enrichissement en plomb ou RTE (Relative Topsoil Enhancement) (Colbourn and Thornton, 1978), a permis de dresser une carte d'estimation des retombées en plomb anthropogène (réalisée par krigeage log-normal). Cette carte montre une spectaculaire auréole autour de l'agglomération parisienne (*planche 5*).

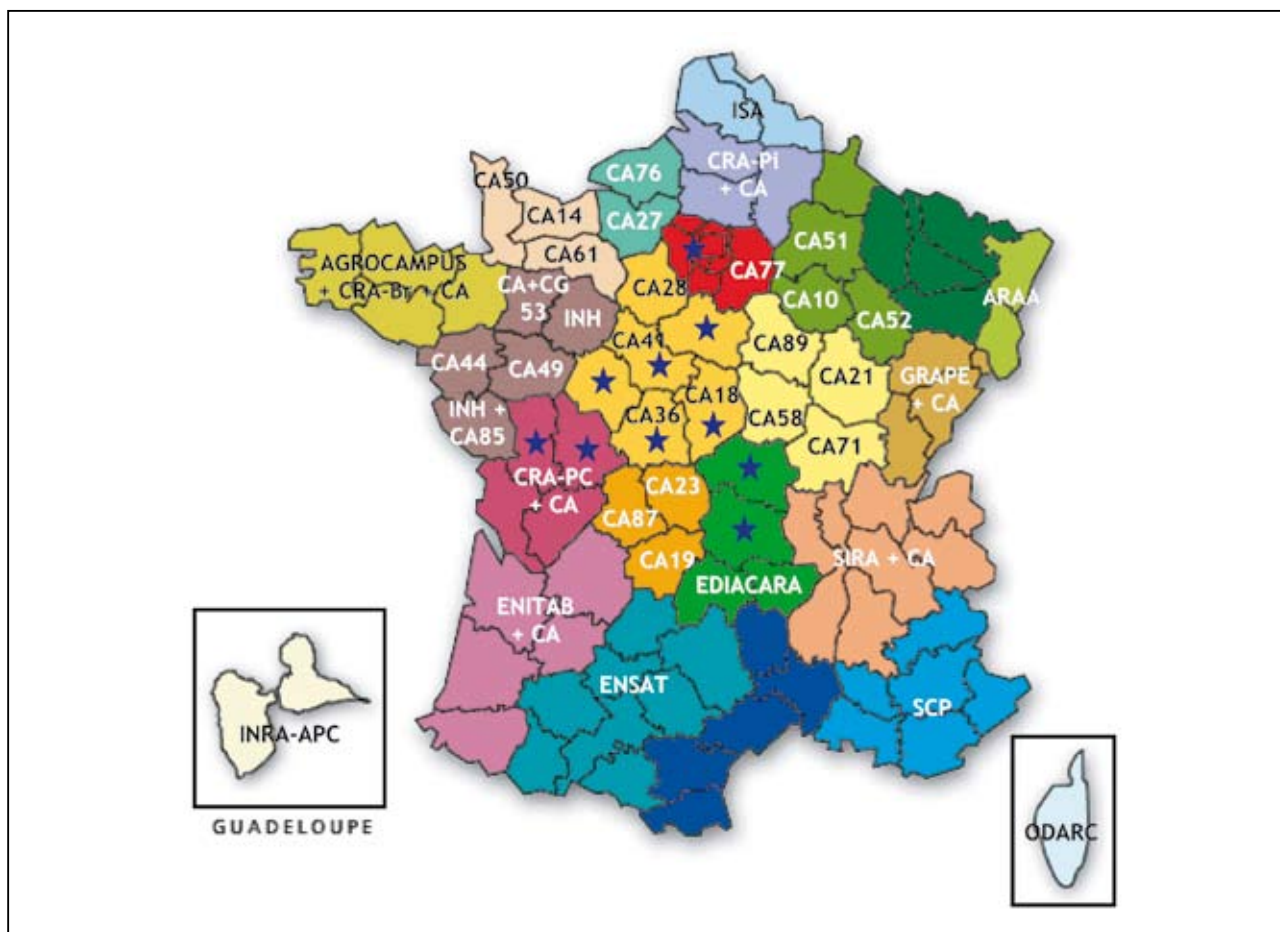
Les retombées en plomb anthropogène ont été évaluées à 143000 t sur le secteur étudié soit 5,9 t de plomb par km².

Tableau 2 - Résumé statistique des teneurs totales en éléments traces métalliques mesurées dans la couche de sol de surface (0-30 cm) et de sub-surface (30-50 cm) des sites RMQS (les teneurs moyennes sont calculées en retirant du jeu de données les valeurs inférieures au seuil de détection)

Table 2 - Summary statistics on total trace elements measured in topsoil (0 – 30 cm) and subsoil (30 – 50 cm) of RMQS sites (means are calculated without values smaller than the detection limit)

Couche de surface (0-30 cm)	Cd mg.kg ⁻¹	Co mg.kg ⁻¹	Cr mg.kg ⁻¹	Cu mg.kg ⁻¹	Mo mg.kg ⁻¹	Ni mg.kg ⁻¹	Pb mg.kg ⁻¹	Tl mg.kg ⁻¹	Zn mg.kg ⁻¹
Minimum	0,03	< 2	7,4	2,3	0,12	< 2	8,5	0,11	10,5
1 ^{er} quartile	0,14	6,1	35,8	9,0	0,44	11,6	21,5	0,40	43,6
Médiane	0,22	9,2	47,2	13,4	0,56	19,3	27,8	0,52	61,4
3 ^e quartile	0,35	12,5	60,7	20,0	0,77	27,6	37,8	0,75	82,7
Maximum	5,53	74,4	489,0	371,0	18,80	358,0	283,0	7,65	1231,0
Effectif	688	688	688	688	647	688	688	688	688
Moyenne	0,31	10,4	51,5	18,1	0,75	22,8	33,0	0,66	70,6
seuil de valeurs « ordinaires »	0,45	23	90	20		60	50	1,7	100
nombre de valeurs > seuil de valeurs « ordinaires »	100	33	47	172		17	71	24	108
seuil de valeurs « anormales »	2	90	150	62		130	90	4,4	250
nombre de valeurs > seuil de valeurs « anormales »	5	0	8	21		4	12	1	7

Couche de sub-surface (30-50cm)	Cd mg.kg ⁻¹	Co mg.kg ⁻¹	Cr mg.kg ⁻¹	Cu mg.kg ⁻¹	Mo mg.kg ⁻¹	Ni mg.kg ⁻¹	Pb mg.kg ⁻¹	Tl mg.kg ⁻¹	Zn mg.kg ⁻¹
Minimum	< 0,05	1,4	7,9	2,1	0,13	2,2	7,1	0,09	11,5
1 ^{er} quartile	0,07	7,2	39,1	8,4	0,45	14,0	18,8	0,42	43,5
Médiane	0,14	10,3	51,3	12,1	0,56	21,8	24,3	0,54	57,2
3 ^e quartile	0,21	13,6	64,9	17,4	0,76	30,1	33,3	0,80	77,5
Maximum	6,40	80,5	473,0	100,1	5,26	390,0	250,3	6,06	844,8
Effectif	619	619	620	620	578	620	619	619	620
Moyenne	0,19	11,7	55,7	14,9	0,71	25,0	28,1	0,70	66,7
seuil de valeurs « ordinaires »	0,45	23	90	20		60	50	1,7	100
nombre de valeurs > seuil de valeurs « ordinaires »	39	40	53	111		20	42	29	78
seuil de valeurs « anormales »	2	90	150	62		130	90	4,4	250
nombre de valeurs > seuil de valeurs « anormales »	1	0	8	6		4	5	1	4

Planche 1 - Carte des partenaires régionaux participant à la mise en place du RMQS**Planche 1 - Partners participating in the RMQS implementation**

Alsace : Association pour la Relance Agronomique en Alsace (ARAA), Sol Conseil

Aquitaine : École Nationale d'Ingénieurs des Travaux Agricoles de Bordeaux (ENITAB) et Chambres d'Agriculture (CA) de Gironde, des Landes, du Lot-et-Garonne, de Dordogne et des Pyrénées-atlantiques

Auvergne : Infosol (*) dans l'Allier et le Puy-de-Dôme et en association avec EDIACARA pour la Haute-Loire et le Cantal

Basse-Normandie : Chambres d'Agriculture de l'Orne, du Calvados et de la Manche

Bourgogne : Chambres d'Agriculture de l'Yonne, de Saône-et-Loire, de la Nièvre et de Côte-d'Or

Bretagne : Agrocampus Rennes (UMR Agrocampus Renne - INRA Rennes), Chambre Régionale d'Agriculture de Bretagne (CRA-Br) et Chambres d'Agriculture d'Ille-et-Vilaine, du Morbihan, du Finistère et des Côtes-d'Armor

Centre : Infosol (*) dans le Loiret et l'Indre-et-Loire, Chambre d'agriculture d'Eure-et-Loir, Chambres d'Agriculture en association avec Infosol (*) dans le Cher, l'Indre et le Loir-et-Cher

Champagne-Ardenne : Chambres d'Agriculture de l'Aube, de la Marne et de la Haute-Marne, Sol Est

Corse : Office du Développement Agricole et Rural de Corse (ODARC)

Franche-Comté : Groupe Régional Agronomie Pédologie Environnement (GRAPE) et Chambres d'agriculture de Haute-Saône, du Doubs, du Jura et du Territoire de Belfort

Guadeloupe : INRA (*), Centre de Recherche Antilles-Guyane, Unité Agropédoclimatique de la zone caraïbe

Haute-Normandie : Chambres d'Agriculture de l'Eure et de la Seine-maritime

Ile-de-France : Infosol (*) dans l'ouest de la région (75, 78, 91, 92, 93, 94 et 95) et Chambre d'Agriculture de Seine-et-Marne

Languedoc-Roussillon : pas de partenaire RMQS pour le moment

Limousin : Chambres d'Agriculture de la Haute-Vienne, de Corrèze et de la Creuse

Lorraine : pas de partenaire RMQS pour le moment

Midi-Pyrénées : Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie de Toulouse (ENSAT)

Nord-Pas-de-Calais : Institut Supérieur d'Agriculture (ISA) de Lille

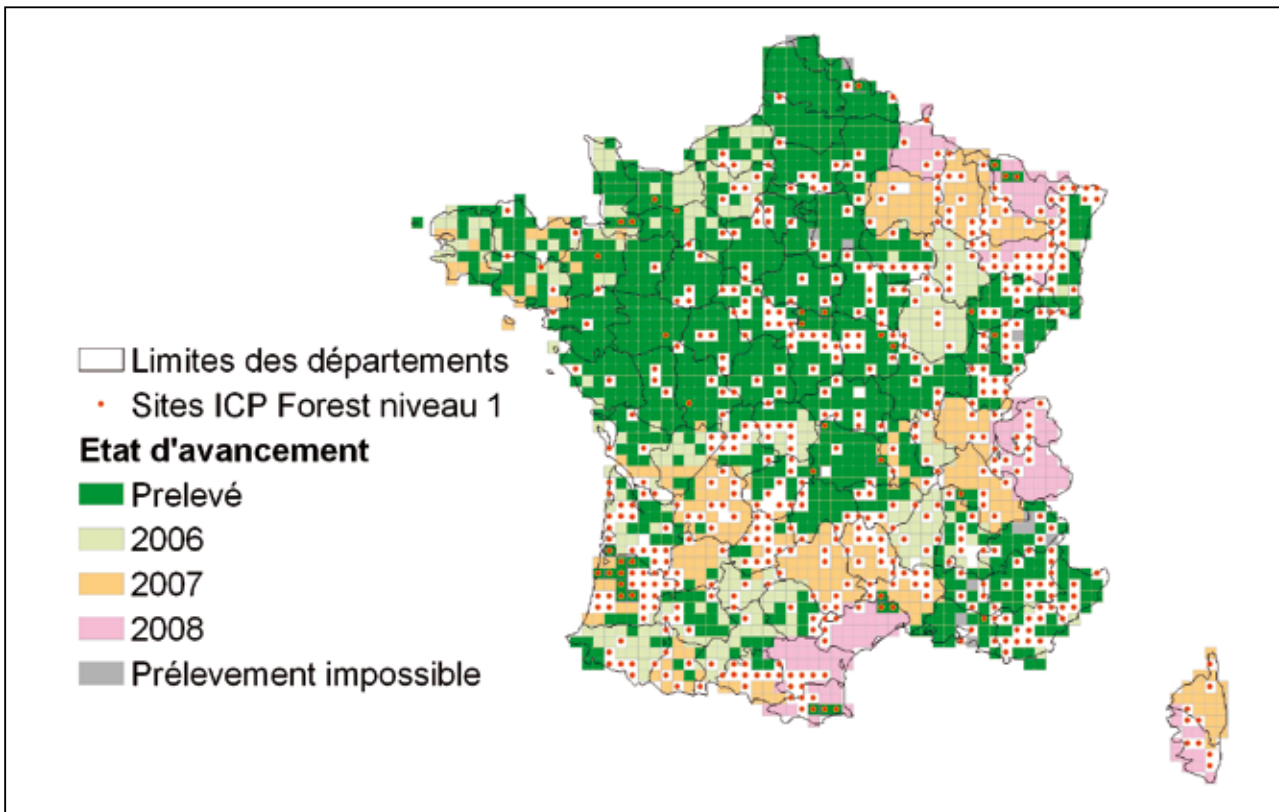
Pays-de-Loire : Institut National d'Horticulture d'Angers (INH), Chambres d'Agriculture du Maine-et-Loire, de la Mayenne, de Loire-atlantique, de la Vendée, Conseil Général de la Mayenne

Picardie : Chambre Régionale d'Agriculture de Picardie (CRA-Pi) et Chambres d'Agriculture de la Somme, de l'Aisne et de l'Oise

Poitou-Charentes : Chambre Régionale d'Agriculture de Poitou-Charentes (CRA-PC) et Chambres d'Agriculture de la Vienne, des Deux-Sèvres, de Charente et de Charente-maritime en association avec Infosol (*) dans la Vienne et les Deux-Sèvres

Provence-Alpes-Côte-d'Azur : Société du Canal de Provence et d'Aménagement de la Région provençale (SCP)

Rhône-Alpes : Sol Info Rhône-Alpes (SIRA) et Chambres d'Agriculture de la Drôme, de l'Isère, du Rhône, de la Savoie, de la Haute-Savoie, de l'Ardèche, de la Loire et de l'Ain

Planche 2 - Etat d'avancement de la mise en place des sites du RMQS en métropole**Planche 2** - State of progress of RMQS implementation

Nous avons recherché les déterminants pouvant expliquer ces retombées et obtenu de bonnes corrélations avec la densité de population. Ces retombées en plomb sont à mettre en relation avec l'activité industrielle autour de Paris et surtout avec l'intensité de la circulation automobile et l'utilisation pendant de longues années de carburant enrichi au plomb. Une validation de ces résultats a été obtenue à partir d'autres sources de données, issues des travaux de Pacyna et Pacyna (2000) et des mesures réalisées par le réseau européen de suivi des retombées atmosphériques EMEP (Joint Meteorological Synthesizing Centre West *et al.*, 2004) qui évalue les émissions annuelles en éléments traces métalliques sur toute l'Europe.

Un second exemple d'utilisation des données du RMQS est illustré par les cartogrammes de teneurs en zinc extraites en totalité ($\text{HF} + \text{HClO}_4$) ou de façon partielle (EDTA) (figures 5A et 5B). Dans la couche de surface du sol (0-30 cm), les teneurs totales en zinc ne présentent pas de structure spatiale particulièrement nette alors, qu'à l'instar des teneurs totales en plomb, les grandes agglomérations ainsi que les régions fortement industrialisées (Île-de-France, Nord-Pas-de-Calais) se distinguent nettement par leurs teneurs élevées en zinc extrait partiellement (EDTA) ou facilement mobilisable, laissant supposer une contamination des

sites correspondants. Une étude approfondie est actuellement en cours pour tenter de distinguer puis de cartographier les différentes origines du zinc.

Projets utilisant les échantillons et les données du RMQS

Les échantillons archivés au conservatoire constituent une collection d'échantillons de sol, parfaitement géoréférencés, prélevés dans la France entière, représentant une grande variété de types de sols, issus de matériaux parentaux divers et sous des occupations multiples. Les échantillons et les données collectés sur les sites du RMQS représentent un capital dont les applications sont très nombreuses.

Dans certaines régions, les sites où les échantillons du RMQS ont été utilisés pour des applications régionales :

- Institut National d'Horticulture d'Angers : analyse des échantillons des profils des sites RMQS mis en place dans les départements 44, 49 et 85 dans le cadre du programme Inventaire Gestion et Conservation des Sols (Arrouays *et al.*, 2004),
- Institut Supérieur d'Agriculture de Lille : utilisation des profils RMQS pour enrichir le Référentiel Pédogéochimique du Nord -

Planche 3 - Occupation des sols des sites du RMQS observée lors du prélèvement (636 sites disponibles)

Planche 3 - Land cover on RMQS sites observed during the collect of samples (636 available sites)

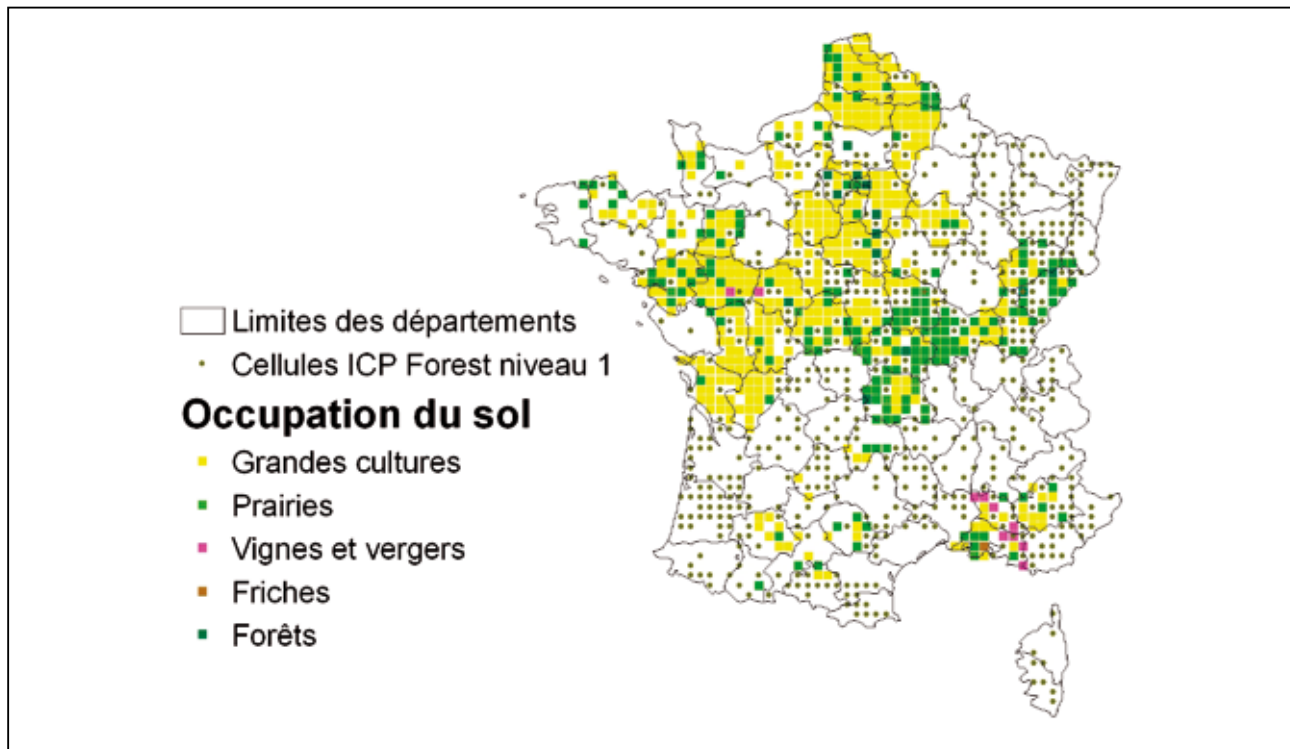


Planche 4 - Projection des textures de surface des sols cultivés des sites du RMQS (565 sites disponibles) et de la BDAT dans le triangle textural. Le nombre d'analyses dans la BDAT a été calculé par sous triangle textural de 4 % de côté.

Planche 4 - Projection of particle size distribution of the cultivated soils of the RMQS samples (565 available sites) and of the national database of soil-tests (BDAT). The number of soil-tests in BDAT was calculated for each sub-triangle delineated by 4 % classes of particle-size fractions.

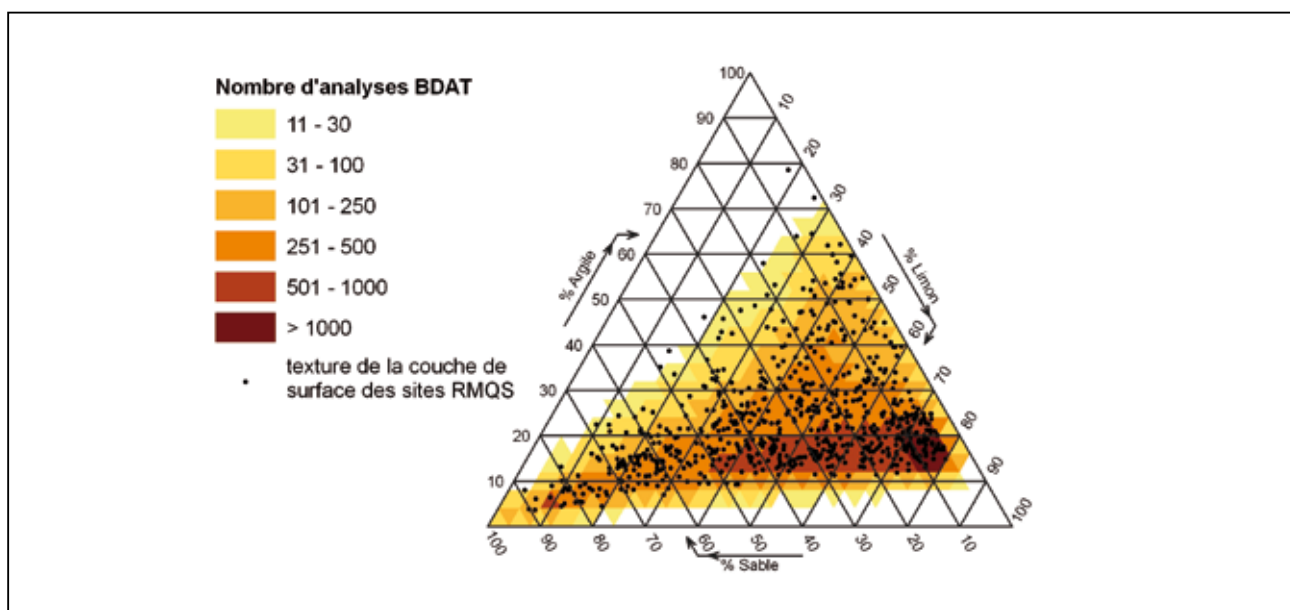


Planche 5 - Estimation des retombées en plomb anthropogène autour de Paris (d'après Saby *et al.*, 2006)

Planche 5 - Estimates of anthropogenic lead accumulation in topsoil in Paris region (from Saby *et al.*, 2006)

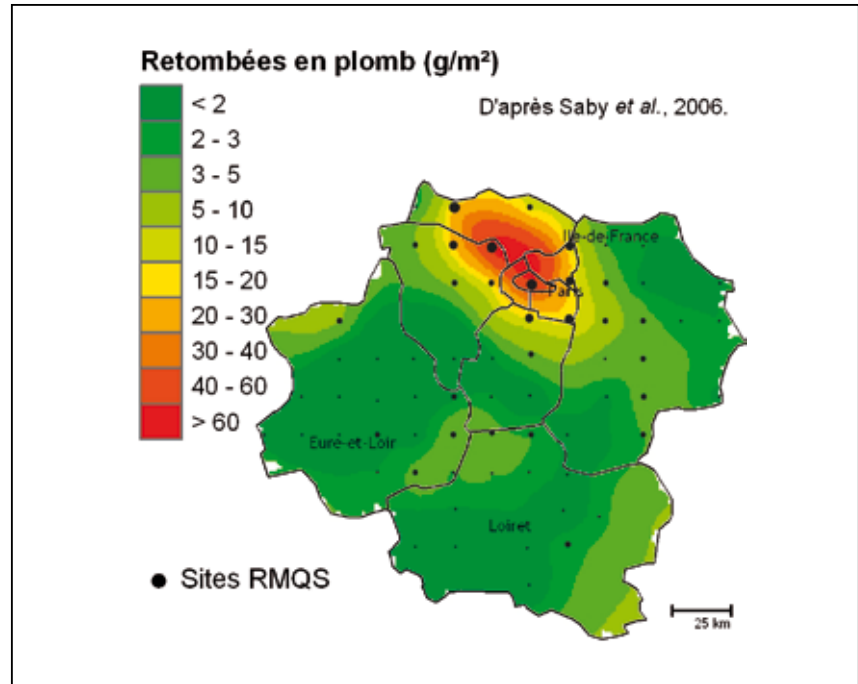
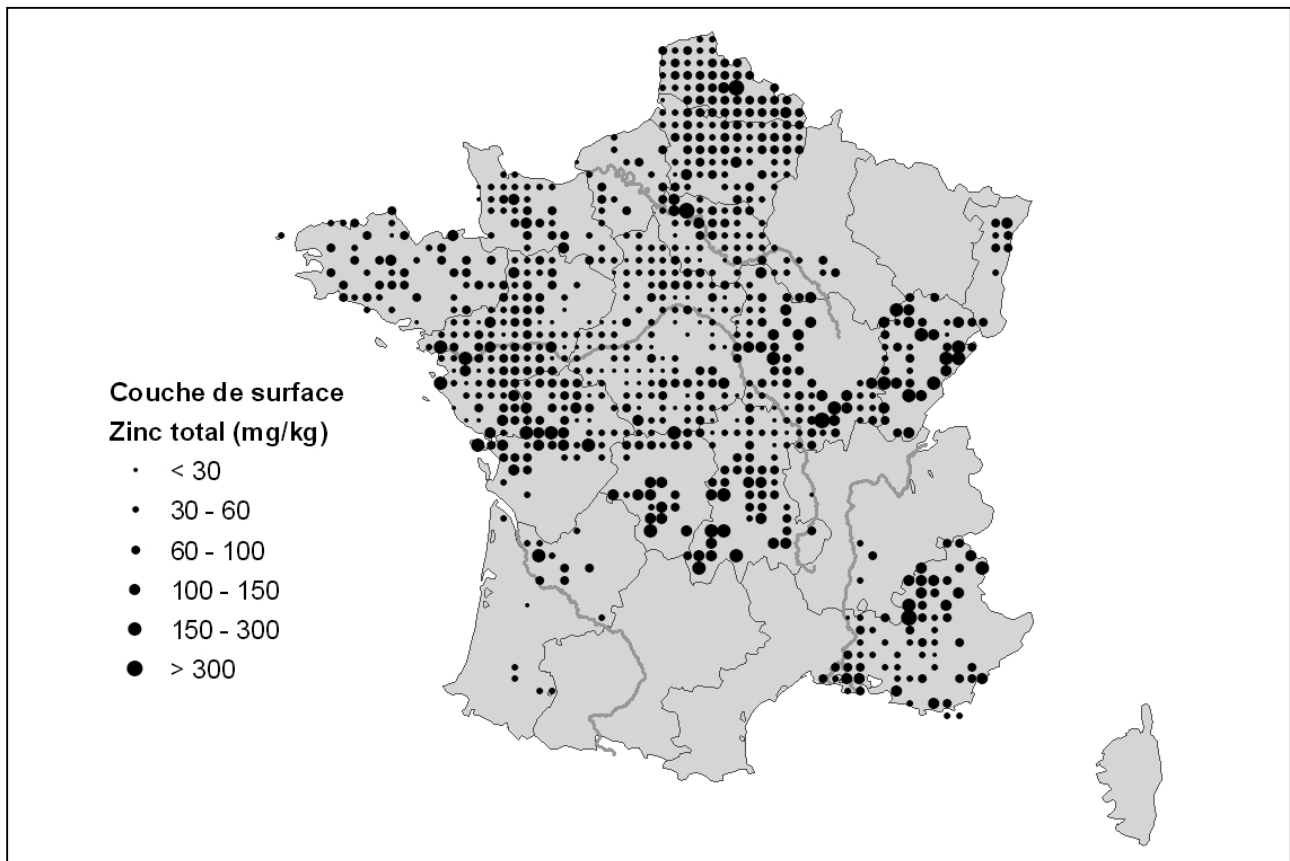


Figure 5A - Cartogramme de teneur totale en zinc (extraction HF) dans la couche de sol de surface (0-30 cm) des sites du RMQS

Figure 5A - Point maps of total Zn content measured in topsoil (0 – 30 cm) of RMQS sites



Pas de Calais (teneurs naturelles en éléments traces métalliques, Sterckeman *et al.*, 2002),

- Chambre Régionale d'Agriculture de Picardie pour le département de la Somme : prélèvement d'un échantillon composite supplémentaire en profondeur pour la détermination du fond pédogéochimique en éléments traces métalliques.

Cette collection de sols est accessible aux équipes de recherches souhaitant travailler sur des échantillons particuliers, à la recherche, par exemple, d'échantillons dans une certaine gamme de valeurs pour un paramètre donné. Ainsi des analyses minéralogiques, des tests de stabilité structurale (INRA Unité de Science du Sol d'Orléans), des analyses de matières organiques particulières (INRA Unités de Science du Sol de Versailles et InfoSol) ont été menées sur plusieurs séries d'échantillons.

Les analyses réalisées en routine sur les sites RMQS concernent essentiellement des paramètres physico-chimiques. Parmi les composantes permettant de définir la qualité d'un sol, les aspects biologiques sont rarement pris en compte du fait des difficultés de disposer de méthodes d'analyse utilisables en routine. Plusieurs études ont été menées, sont en cours de réalisation ou en projet,

avec l'objectif de tester ou de développer de telles méthodes :

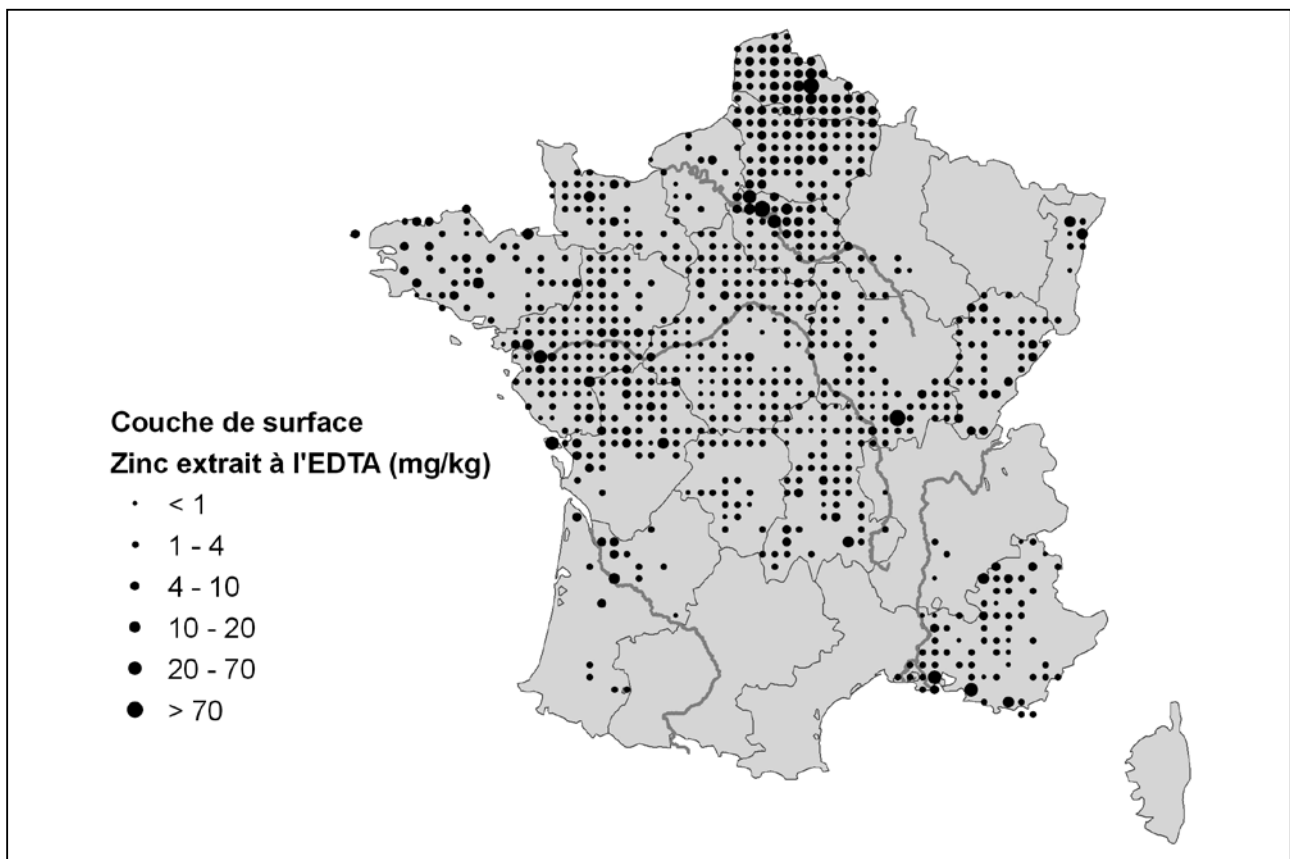
- Institut Supérieur d'Agriculture de Lille en collaboration avec les universités de Lille I et Lille II : mesures de biodiversité (inventaire floristique et de la faune malacologique) sur les sites du Nord-Pas-de-Calais ;

- Projet RMQS-Biodiv coordonné par l'UMR CNRS EcoBio de l'Université de Rennes 1 et financé par l'ADEME : mesure d'indicateurs de biodiversité (microflore, microfaune et mésofaune) sur 109 sites RMQS en Bretagne ;

- Projet ECOMIC-RMQS (Microbio-géographie à l'échelle de la France par application d'outils moléculaires au Réseau de Mesures de la Qualité des Sols) proposé au programme Biodiversité de l'ANR 2006 et coordonné par l'UMR INRA - Université de Bourgogne « Microbiologie et Géochimie des Sols » ;

- Analyses de diversité de sucres microbiens (UMR CNRS-CEA LEMR Cadarache).

Figure 5B - Cartogramme de teneur partielle en zinc (extraction EDTA) dans la couche de sol de surface (0-30 cm) des sites du RMQS
Figure 5B - Point maps of EDTA Zn content measured in topsoil (0 – 30 cm) of RMQS sites



CONCLUSION

Les premiers résultats issus du Réseau de Mesures de la Qualité des Sols apparaissent très prometteurs quant à la capacité de ce réseau à réaliser des bilans et caractériser des gradients de contamination diffuse en éléments traces métalliques. L'analyse et l'interprétation des données n'en sont qu'à leurs prémices et nécessiteront un fort investissement scientifique pour exploiter pleinement les données disponibles, mais ces premiers résultats illustrent le potentiel considérable du RMQS. Ils confirment également la pertinence des choix méthodologiques ayant présidé à la mise en place de ce réseau. La qualité des données récoltées atteste de l'importance de disposer, pour toutes les étapes de la mise en place des sites, d'un manuel d'instructions et de procédures d'assurance qualité suivis par tous les partenaires qui interviennent sur le terrain pour installer les sites.

Nos prévisions d'installation des sites nous indiquent que la première campagne de prélèvement sera terminée pour la fin de l'année 2008. Dans le même temps, la nouvelle campagne prévue sur les sites forestiers du réseau ICP-Forest niveau 1 (557 sites), réalisée par l'Inventaire Forestier National et harmonisée en lien avec InfoSol avec la stratégie mise en œuvre sur les sites du RMQS, nous permettra de disposer d'un réseau complet de 2200 sites de surveillance de la qualité des sols couvrant la France entière de façon régulière.

L'utilisation des échantillons et des données du RMQS s'intensifie à mesure que le réseau se déploie et que les premiers résultats commencent à être disponibles. En plus des paramètres physico-chimiques qui font l'objet d'une mesure en routine, la composante biologique de la qualité de sols est de plus en plus étudiée, comme en témoignent les projets auxquels est associé le RMQS. Les perspectives d'applications environnementales concernent des domaines très variés (pesticides, radioéléments, micro-polluants organiques, pathogènes, etc.) et permettront d'exploiter et de valoriser le formidable potentiel offert par ce réseau.

REMERCIEMENTS

Le RMQS est en grande partie financé par le Groupement d'Intérêt Scientifique Sol.

Nous remercions l'ensemble des partenaires régionaux de ce programme qui réalisent un travail formidable de collecte de données, ainsi que la très dynamique équipe de l'APC de l'INRA de Petit-Bourg (Guadeloupe).

BIBLIOGRAPHIE

- Arrouays D., Thorette J., Daroussin J. et King D., 2001 - Analyse de représentativité de différentes configurations d'un réseau de sites de surveillance des sols. *Étude et Gestion des Sols*, 8 (1), pp. 7-17.
- Arrouays D., Jolivet C., Boulonne L., Bodineau G., Saby N. et Grolleau E., 2002 - Une initiative nouvelle en France : la mise en place d'un réseau multi-institutionnel de la mesure de la qualité des sols (RMQS). *Comptes rendus de l'Académie d'Agriculture de Paris*, 88, n° 5, pp. 93-103
- Arrouays D., Jolivet C., Boulonne L., Bodineau G., Ratié C., Saby N. et Grolleau E., 2003 - Le Réseau de Mesures de la Qualité des Sols (RMQS) de France. *Étude et Gestion des Sols*, 10 (4), pp. 241-250.
- Arrouays D., Hardy R., Schnebelen N., Le Bas C., Eimberck M., Roque J., Grolleau E., Pelletier A., Doux J., Lehmann S., Saby N., King D., Jamagne M., Rat D. et Stengel P., 2004 - Le programme Inventaire Gestion et Conservation des Sols de France. *Étude et Gestion des Sols*, 11(3), pp. 187-198.
- Baize D., 1997 - Teneurs totales en éléments traces métalliques dans les sols. INRA Editions, 414 p.
- Baize D., Saby N. et Deslais W., 2006 - Collecte d'analyses en huit éléments en traces dans les sols à l'échelle nationale. Résultats et enseignements. *Étude et Gestion des Sols* (ce numéro).
- Colbourn P. and Thornton I., 1978 - Lead pollution in agricultural soils. *Journal of Soil Science*, 29, pp. 513-526.
- Commission européenne, 2002 - Communication du 16 avril 2002 au Conseil, au Parlement européen, au Comité économique et social et au Comité des régions : Vers une stratégie thématique pour la protection des sols [COM (2002) 179 final].
- Joint Meteorological Synthesizing Centre West, Chemical Coordinating Centre, Centre for Integrated Assessment Modelling, 2004 - Heavy metals : trans-boundary pollution of the environment. EMEP Status Report, 51 p.
- Jolivet C., Boulonne L. et Ratié C., 2006 - Manuel du Réseau de Mesures de la Qualité des Sols. INRA Infosol Orléans, 190 p.
- King D., Jamagne M., Arrouays D., Bornand M., Favrot JC., Hardy R., Le Bas C. et Stengel P., 1999 - Inventaire cartographique et surveillance des sols en France. Etat d'avancement et exemples d'utilisation. *Étude et Gestion des Sols*, 6 (4), pp. 215-228.
- Lemercier B., Walter C., Saby N., Schvartz C., Arrouays D. et Follain S., 2006 - Suivi des teneurs en carbone organique et en phosphore extractible dans les sols agricoles de trois régions françaises. Analyse à partir de la BDAT. *Étude et Gestion des Sols* (ce numéro).
- Pacyna J.M. and Pacyna E.G., 2000 - Atmospheric Emissions of Anthropogenic Lead in Europe : Improvements, Updates, Historical Data and Projections. GKSS Research Center, 31 p.
- Saby N., Schvartz C., Walter C., Arrouays D., Lemercier B., Roland N. et Squidant H., 2004 - Base de Données des Analyses de Terre : procédure de collecte et résultats de la campagne 1995-2000. *Étude et Gestion des Sols*, 11, pp. 235-253.
- Saby N., Arrouays D., Boulonne L., Jolivet C. and Pochot A., 2006 - Geostatistical assessment of Pb in soil around Paris, France. *Science of the Total Environment*, 367 : pp. 212-221.
- Sterckeman T., Douay F., Fourrier H. et Proix N., 2002 - Référentiel pédo-géochimique du Nord-Pas-de-Calais. INRA- ENSAIA 130 p.