

La naissance du Réseau de Mesures de la Qualité des Sols de France

D. Arrouays^(1*), J. Thorette⁽²⁾, I. Feix⁽³⁾, B. Lesaffre⁽⁴⁾, et P. Stengel⁽⁵⁾

- 1) INRAE, Unité InfoSol, 45075, Orléans, France - Membre correspondant de l'Académie d'agriculture de France
- 2) Retraité - Ancien membre de l'Ifen et du SOeS du ministère chargé de l'environnement, France
- 3) Ademe, experte nationale « sol », Direction Bioéconomie et Énergies Renouvelables, 49004, Angers, France
- 4) Membre de l'Académie d'agriculture de France, ancien chef du service de la recherche du ministère chargé de l'environnement, France
- 5) Retraité - Ancien Directeur Scientifique de l'INRA, France

Auteur correspondant : dominique.arrouays@inrae.fr

RÉSUMÉ

A la fin des années 1990, les programmes de cartographie et de surveillance des sols de France souffrent d'un retard certain par rapport à de nombreux autres pays d'Europe et du monde. Face aux enjeux concernant la qualité des sols et aux menaces qui pèsent sur eux, il devient urgent de mettre en place un dispositif cohérent et exhaustif de surveillance de la qualité des sols de France. Divers organismes et les pouvoirs publics s'emparent de cet enjeu et créent en 2001 une structure de coordination : le Groupement d'intérêt Scientifique sur les sols (GIS Sol). Cette structure délègue à l'INRA la conception puis la coordination d'un programme entièrement nouveau : le Réseau de Mesures de la Qualité des Sols (RMQS). Ce réseau est fondé sur une grille systématique de 16x16 km couvrant la totalité du territoire métropolitain, qui s'étendra plus tard aux Outre-mer. Le RMQS est adossé à un conservatoire national d'échantillons de sols qui constitue la « mémoire » des sols de France et permettra la mise en œuvre de très nombreux programmes scientifiques et opérationnels fondés sur la stratégie d'échantillonnage du RMQS.

Mots-clés

Qualité des sols, surveillance, réseau, RMQS, France.

Comment citer cet article :

Arrouays D., Thorette J., Feix I., Lesaffre B. et Stengel P., 2021 - La naissance du Réseau de Mesures de la Qualité des Sols de France *Etude et Gestion des Sols*, 28, 49-56

Comment télécharger cet article :

<http://www.afes.fr/publications/revue-etude-et-gestion-des-sols/volume-28-numero-1/>

Comment consulter/télécharger tous les articles de la revue EGS :

<https://www.afes.fr/publications/revue-etude-et-gestion-des-sols/>

SUMMARY**A NOTE ON THE FRENCH SOIL QUALITY MONITORING NETWORK'S BIRTH**

In the late 1990's, the soil French soil mapping and monitoring programs tended to lag far behind those of many E.U. member states and other countries in the world. In order to address issues related to soil quality and to take into account the threats to soils, there was an urgent need to establish a consistent and exhaustive mechanism for monitoring the French soils quality. Established in 2001, a public scientific group for soil coordination, called "GIS Sol", gave to INRA the task of designing and then coordinating an entirely new program devoted to soil quality monitoring. Called RMQS in French, this later consists in a 16 to 16-km grid networking the whole country; it is associated to a soil sample archive that constitutes the "memory" of the French soils and supports many scientific and operational programs.

Key-words

Soil quality, monitoring, network, RMQS, France

RESUMEN**EL NACIMIENTO DE LA RED DE MEDICIÓN DE LA CALIDAD DE LOS SUELOS DE FRANCIA**

Al final de los años 1990 los programas de cartografía y de supervisión de los suelos de Francia padecen de un retraso real en comparación con numerosos otros países de Europa y del mundo. Frente a los desafíos que conciernen la calidad de los suelos y las amenazas que pesan sobre ellos, se hace urgente desarrollar un dispositivo coherente y exhaustivo de supervisión de la calidad de los suelos de Francia. Diversos organismos y las autoridades públicas se apropian de este desafío y crean en 2001 una estructura de coordinación: la Agrupación de Interés Científico sobre los suelos (GIS sol). Esta estructura delega a INRA la concepción luego la coordinación de un programa enteramente nuevo: la Red de Medición de la Calidad de los Suelos (RMQS). Esta red se basa en una malla sistemática de 16x16 km que cubre la totalidad del territorio metropolitano, y que se extenderá mas tarde a los territorios de ultramar. La RMQS se apoya en un conservatorio nacional de muestras de suelos que constituye la "memoria" de los suelos de Francia y que permitirá el desarrollo de numerosos programas científicos y operacionales fundados sobre la estrategia de muestreo de la RMQS.

Palabras clave

Calidad de los suelos, supervisión, red, RMQS, Francia

La qualité des sols est au centre de grands enjeux planétaires (McBratney *et al.*, 2014; Adhikari et Hartemink, 2016) et de nombreux objectifs du développement durable (Bouma, 2014; Keesstra *et al.*, 2016). Ces enjeux concernent directement la sécurité alimentaire, la sécurité de l'approvisionnement en eau, le changement climatique, la production et la consommation durable de l'énergie, la protection de la biodiversité et la santé humaine. Les sols du monde sont cependant menacés (Montanarella *et al.*, 2016) par la contamination locale ou diffuse, la baisse des teneurs en matière organique, l'érosion, l'imperméabilisation, le tassement, la baisse de leur biodiversité, l'acidification, la salinisation, les glissements de terrain, etc. Ces menaces s'expriment plus ou moins fortement, à toutes les échelles, mondiales, nationales, régionales et locales. Elles peuvent conduire à des évolutions négatives irréversibles à l'échelle de temps de quelques générations humaines. De par leur caractère plus ou moins diffus et lentement cumulatif, certaines évolutions doivent être détectées précocement de façon à pouvoir alerter les acteurs de la gestion des sols et mettre en place des mesures de prévention ou de réhabilitation. Pourtant, avant l'existence du réseau de mesures de la qualité des sols (RMQS), aucun dispositif national de bilan de la qualité des sols de France n'était opérationnel. Cette brève note retrace l'histoire de la naissance du réseau de mesures de la qualité des sols (RMQS) de France depuis la fin des années 90 jusqu'au début des années 2000.

LA SITUATION DE LA CARTOGRAPHIE ET DE LA SURVEILLANCE DES SOLS EN FRANCE À LA FIN DES ANNÉES 1990

À la fin des années 1990, plusieurs alertes sont lancées auprès des décideurs publics et des organisations chargées de la cartographie et de la surveillance des sols de France. Le rapport réalisé par Bornand (1997) fait le constat que 80 % des études pédologiques sont « perdues », voire refaites au même endroit. La perte globale sur les 30 années précédentes est estimée à 700 millions de francs (environ 100 M€). Il est urgent de s'organiser afin de « thésauriser » les données au sein d'une base nationale. Cette base de données nationale existe (Gaultier *et al.*, 1993) mais force est de reconnaître qu'elle n'est que très peu alimentée. Certes, la cartographie des sols de France a été réorganisée au travers du programme Inventaire Gestion et Conservation des Sols (IGCS) (Bornand *et al.*, 1989; Favrot *et al.*, 1994; King *et al.*, 1999) mais à la fin des années 1990 à peine un quart du territoire est concerné par des cartographies au 1/250 000 et moins de 10 % de la surface de la France métropolitaine est couvert par cette base de données informatisée (King *et al.*, 1999).

La surveillance des sols est alors quasi inexistante. Le programme « Observatoire de la Qualité des Sols » (OQS), mis

en place à la fin des années 1980 par le ministère chargé de l'environnement, ne compte que 11 sites, dont un seul a fait l'objet d'une deuxième campagne de prélèvements (Martin *et al.*, 1999). Les moyens mis à disposition de ce programme ne permettent pas d'envisager une couverture représentative de l'état des sols de France et la valorisation de l'OQS se limite à quelques travaux méthodologiques et statistiques (Wopereis *et al.*, 1988; Arrouays *et al.*, 2000) et à quelques résultats sur des sites ayant fait l'objet de suivis dédiés (voir, par exemple, Bonneau *et al.*, 2000). La stratégie d'implantation des sites de l'OQS n'est pas vraiment claire : elle constitue un compromis entre le suivi de certaines dégradations présumées de la qualité des sols et l'opportunité de trouver des sites et des équipes sur place. De fait, l'OQS n'avait pas comme objectif initial une couverture représentative des sols de France, mais aurait pu permettre un suivi diachronique très fin de certaines évolutions en mesurant le mieux possible tous les intrants et enregistrant les pratiques agricoles. Force est de reconnaître que cet objectif n'a été que très partiellement atteint à quelques exceptions notables (e.g., Bonneau *et al.*, 2000; Legros *et al.*, 2002). Quoi qu'il en soit, visant à l'origine l'implantation de 50 à 100 sites, l'OQS n'a pas atteint ses objectifs.

Certaines initiatives nationales sont toutefois en cours, telle la Base de Données des Analyses de Terre (BDAT, (Schvartz *et al.*, 1997; Walter *et al.*, 1997)) qui rassemble les données demandées par les agriculteurs aux laboratoires d'analyses de terre, à l'initiative de l'Association Française pour l'Étude du Sol et avec le soutien financier du ministère de l'agriculture. Cette capitalisation ne démontrera tout son intérêt pour détecter des évolutions que beaucoup plus tard (e.g. Lemerrier *et al.*, 2008; Saby *et al.*, 2008, 2014, 2017; Swiderski *et al.*, 2012; Orton *et al.*, 2012) et trouvera également des applications en ce qui concerne l'estimation de la stabilisation du carbone ou la cartographie des teneurs en phosphore (Arrouays *et al.*, 2006; Angers *et al.*, 2011; Follain *et al.*, 2009). Elle reste cependant limitée aux analyses agronomiques classiques et peut souffrir de certains biais qui seront ensuite largement documentés (Saby *et al.*, 2004; 2014; Chauveau *et al.*, 2014). L'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (Ademe) et l'INRA s'associent pour produire la base de données des éléments traces métalliques (BD-ETM), qui centralise des données d'analyses préalables aux épandages de boues de station d'épuration (STEP) et permettra des premières études de synthèse, statistiques, ou cartographiques, sur les teneurs en ETM des sols (e.g., Mathieu *et al.*, 2008; Duigou et Baize, 2010; Duigou *et al.*, 2011; Baize *et al.*, 2006; 2011). Elle est également en partie biaisée, dans la mesure où elle ne concerne que les terres agricoles susceptibles de recevoir ce type d'épandages (Baize *et al.*, 2006). La BD-ETM n'a pas permis d'étude diachronique car elle rassemblait des analyses de prélèvements faits à différentes dates en continu entre 1989 et 2008 (2 collectes) et ne disposait ni d'un nombre d'analyses suffisant par année, ni d'une période temporelle assez longue pour

mettre en évidence des tendances évolutives.

À l'échelle nationale, c'est l'INRA d'Orléans, Unité de Science du Sol - Service d'Étude des Sols de la Carte Pédologique de France (SESCPF), qui coordonne les travaux nationaux de cartographie. Cette coordination s'exerce alors dans le cadre du programme IGCS depuis 1991, première étape vers une ambition réaliste de création d'un inventaire à vocation opérationnelle et multi-échelle. Il est important ici de noter l'engagement fort de l'INRA depuis la fin des années 60 pour maintenir sa mission de coordination de l'inventaire des sols, au-delà d'une activité de recherche. Cependant, à la fin des années 1990, cette activité se poursuit au travers d'une équipe de coordination très réduite (5 ingénieurs) et condamnée à court terme par des départs à la retraite imminents (4 sur 5). Ces travaux bénéficient de financements incitatifs du ministère chargé de l'agriculture, mais leur avancement est très lent (Favrot et al., 1994 ; King et al., 1999), du fait des faibles subventions accordées et de la difficulté à trouver des financements régionaux ou départementaux complémentaires. Une partie de la lenteur de ce programme est aussi sans doute liée à une insuffisante clarté de la stratégie, notamment dans la définition respective des objectifs de recherche et d'opérationnalité. L'OQS est intégré au sein du SESC-PF mais peine à se développer faute de moyens suffisants et d'une stratégie globale d'implantation et de suivi des sites mis en place (Martin et al., 1999). Une analyse comparative à l'échelle européenne menée par le Centre Thématique sur les Sols de l'Agence Européenne de l'Environnement pointe le retard considérable de la France, tant en matière de cartographie que de surveillance des sols (Arrouays et al., 1998). Cette situation critique est pour le moins paradoxale, dans la mesure où l'INRA d'Orléans est dans le même temps en charge de la coordination de programmes européens de constitution de bases de données sur les sols (Jamagne et al., 1995b).

L'ensemble de ces constatations amène alors en premier lieu l'INRA à chercher à consolider son engagement en faveur des sols pour tenter de trouver, structurer, et rendre opérationnel le soutien des responsables publics concernés. Cette préoccupation, portée par la Direction Scientifique « Environnement Forêt et Agronomie » (DS EFA), concerne très directement le devenir à court terme de la cartographie et de la surveillance des sols. On peut considérer que cette volonté a été le déclencheur des réflexions stratégiques et organisationnelles qui sont décrites dans la suite de cette note. À la même époque, le ministère chargé de l'environnement, qui dispose de crédits incitatifs gérés par son service de la recherche, lance en septembre 1998, dans un cadre institutionnel propice (l'année 1998 voit la tenue du Congrès Mondial de Science du Sol à Montpellier et elle est déclarée « année du sol » conjointement par les ministères chargés de l'agriculture et de l'environnement), le programme de recherche « Fonctions environnementales et GESTION du patrimoine SOL » (GESSOL) : celui-ci, appuyé fortement par l'Ademe, se terminera en 2016 après avoir financé 46 projets

et contribué à consolider la communauté scientifique dans ce domaine (pour une revue à mi-parcours voir Bernoux et al., 2011, pour des ouvrages complets voir Citeau et al., 2008 et Bispo et al., 2016)).

VERS UNE REFORME DE LA STRATÉGIE NATIONALE DE CARTOGRAPHIE ET DE SURVEILLANCE DES SOLS

À l'initiative du ministère chargé de l'environnement (service de la recherche) et de l'INRA, un groupe de réflexion est alors constitué en 1998 entre les principales institutions chargées de la surveillance et de la cartographie des sols ou potentiellement intéressées à l'utilisation et la diffusion de leurs résultats : outre les initiateurs, il s'agit du ministère chargé de l'agriculture (Bureau de l'agriculture, des ressources naturelles et des sols), de l'Ademe et de l'Institut français de l'environnement (Ifen). À partir d'un état des lieux présenté par l'INRA, très rapidement, trois nécessités sont partagées :

- (i) contribuer à une meilleure organisation de l'appui aux politiques publiques nationales sur les sols ;
- (ii) mieux coordonner les actions des différents partenaires dans une structure permettant une meilleure lisibilité et stabilité, et une meilleure mutualisation des efforts ;
- (iii) mettre en place un véritable dispositif de surveillance des sols de France, représentatif des sols et de leurs occupations et permettant de réaliser un bilan de l'état des sols de France afin de constituer une référence pour un suivi pérenne de leurs évolutions.

Le premier point conduit, le 10 février 2000, à la signature entre la ministre chargée de l'environnement et le président de l'INRA d'une convention cadre, dans laquelle le suivi de la qualité des sols est la première priorité (Voynet et Hervieu, 2000). Le second aboutit à la constitution du Groupement d'Intérêt Scientifique sur les Sols (GIS Sol) en 2001¹, réunissant les partenaires cités supra, et doté d'une gouvernance propre (le Haut Comité de Groupement) et d'un secrétariat permanent. Il est certain que la constitution de ce GIS a été grandement facilitée par les outils de coordination et de collaboration préalablement mis en place, comme les programmes IGCS, BDAT, BD-ETM et GES-SOL, sans lesquels le GIS Sol aurait eu probablement plus de difficulté à émerger. Le secrétariat permanent se voit confier la rédaction et le chiffrage d'un projet pluriannuel incluant les activités antérieures de cartographie et de constitution de bases de données précédemment citées (IGCS, BDAT, BD-ETM) et la mise en place d'un nouveau projet de surveillance nationale de

¹ Le GIS Sol fut créé le 9 mars 2001 par convention, puis renouvelé à trois reprises après évaluations scientifique et stratégique, les 16 mai 2006, 3 mai 2012 et 28 novembre 2018.

la qualité des sols en réponse au 3^e point. Plus spécifiquement, la rédaction du projet global est confiée à Jacques Thorette (Ifen) et Dominique Arrouays (INRA) et la conception méthodologique et le chiffrage de la surveillance sont confiés à l'INRA. Dans la suite de cet article, nous ne traiterons que de la mise en place du réseau de surveillance de la qualité des sols.

LA CONCEPTION DU RÉSEAU DE MESURES DE LA QUALITÉ DES SOLS (RMQS)

Il est important de noter que, préalablement à la mise en place du RMQS, un réseau de surveillance des forêts françaises (RENECOFOR : Ulrich, 1995 ; Ponette *et al.*, 1997) avait été mis en place dès 1992 sur 102 placettes forestières réparties en France. Son objectif initial était la surveillance de l'état des forêts, et principalement celui de leur acidification et de leur déperissement. Rapidement, est apparue la nécessité d'en caractériser l'état des sols, en particulier au plan chimique (Ponette *et al.*, 1997). Ce n'est que plus tardivement que l'objectif de surveillance de l'évolution des propriétés des sols s'est ajouté à ce programme (Nicolas *et al.*, 2008 ; Ulrich *et al.*, 2009) avec la mise en place d'une stratégie de prélèvement spécifique (Ulrich *et al.*, 2009), qui permettra, entre autres, de détecter une évolution dans le stockage de carbone organique des sols forestiers, principalement dans les horizons humifères (Jonard *et al.*, 2017). Très rapidement, les objectifs assignés au RMQS sont définis et impliquent des choix stratégiques en vue de :

- (i) pouvoir disposer de statistiques non biaisées sur l'état des sols à l'échelle nationale (fonction de bilan et d'état des lieux initial) ;
- (ii) couvrir toutes les occupations des sols ;
- (iii) réaliser un suivi de cet état et de détecter des évolutions temporelles ;
- (iv) détecter d'éventuels gradients (par exemple de contamination diffuse) et de pouvoir produire des cartes de l'état des sols de France ;
- (v) constituer une banque d'échantillons de sols pour pouvoir faire (ou refaire) des analyses *a posteriori*.

À ces objectifs généraux s'ajoutent des préoccupations majeures provenant d'enjeux émergents considérés comme prioritaires :

- évaluer et suivre les stocks de carbone dans les sols (en lien avec l'application du Protocole de Kyoto) ;
- prendre en compte la problématique des sites pollués et, en particulier, des sites « orphelins » et établir le référentiel du « fond pédo-géochimique » en ETM dans les sols.

Schématiquement, ces enjeux émergents guident le « menu » de base des déterminations analytiques, tandis que les choix stratégiques (i) à (iv) déterminent la configuration géographique du RMQS et l'item (v) mène à la mise en place d'un conservatoire d'échantillons de sols.

L'idée d'une grille systématique couvrant l'ensemble du territoire s'impose assez rapidement. Elle présente l'avantage de pouvoir fournir des statistiques non biaisées et de couvrir régulièrement l'espace, permettant ainsi également des sorties cartographiques. Elle doit cependant être suffisamment fine pour représenter les principales combinaisons des occurrences types de sol/occupations des sols. L'étude méthodologique est confiée à l'INRA (Arrouays *et al.*, 2001). Brièvement, elle consiste en un croisement des occupations des sols (déterminées par Corine Land Cover) et des types de sols dominants de France déterminés par la Base de Données Géographique des Sols de France (Jamagne *et al.*, 1995a). Sur ce croisement, sont plaquées des grilles de mailles croissantes (2, 4, 8, 16, 32 km) et on analyse comment la représentativité de ces croisements se dégrade avec l'élargissement du pas de la grille. Évidemment, un enjeu économique est aussi pris en compte, car lorsque le côté de la maille diminue, son nombre de sites s'élève à sa puissance 2. Sans entrer dans les détails techniques (voir Arrouays *et al.*, 2001), c'est la maille de 16 km (soit environ 2200 sites sur le territoire métropolitain) qui est retenue. Pour des raisons de cohérence, elle est calée sur la maille européenne de l'observation de l'état des forêts, de même configuration géographique, et qui dispose de plus de certaines observations réalisées sur les sols dans les années 1990. Le choix du point « zéro » de la maille est donc guidé par celui de la maille européenne préexistante, dont le point « zéro » avait été choisi de façon aléatoire (Barthod, 1994 ; CEE, 1987).

Dans le concept de la grille, comme dans celui du conservatoire des échantillons de sol, il y a également une idée majeure : on ne sait pas *a priori* quel élément ou quelle propriété on voudra détecter ou cartographier dans le futur. On ne peut donc pas mettre en place un dispositif géographique dédié spécifiquement à une ou plusieurs propriétés, car on ne connaît pas les déterminants des évolutions que l'on voudra éventuellement rechercher. En parallèle, on constitue au conservatoire une « mémoire » de nos sols pouvant permettre de remonter le temps *a posteriori* (Arrouays *et al.*, 2002 ; Ratié *et al.*, 2010) et de greffer de nouvelles analyses sur le « menu » initial.

LE LANCEMENT DU RMQS

Quelques essais réalisés par l'INRA au début des années 2000 permettent d'affiner les évaluations des temps nécessaires à l'installation des sites RMQS. Ils permettent également de tester et d'affiner le protocole d'échantillonnage intra-site, inspiré de celui du réseau suisse (OFEFP, 1993). La surface d'échantillonnage initialement prévue de 10 m x 10 m est agrandie pour des raisons pratiques. Les protocoles de prélèvement, tant sur la surface d'échantillonnage que sur le profil pédologique adjacent, seront progressivement revus et adaptés en fonction de contraintes pratiques et de considérations scientifiques. Il

faudra, de fait, pratiquement 6 ans pour qu'un protocole définitif et complètement détaillé soit officiellement publié (Jolivet *et al.*, 2006) et celui de la deuxième campagne sera publié en 2018 (Jolivet *et al.*, 2018). Le menu analytique est longuement discuté et arrêté au début des années 2000. Le rapport global sur le dispositif incluant inventaire et surveillance (Thorette et Arrouays, 1999) est concrétisé par la signature du GIS Sol début 2001 et son programme budgétaire prévisionnel, ainsi que par la création de l'Unité InfoSol de l'INRA à Orléans fin 2000. InfoSol reprend une partie du personnel de l'UR-Sol-SESCPF et bénéficie de nouveaux recrutements de personnels à l'INRA dès fin 2000 et les années suivantes (7 nouveaux postes). Les financements et les recrutements ne sont toutefois pas suffisants pour couvrir la totalité des moyens nécessaires à la mise en place du RMQS. De ce fait, le RMQS, initialement prévu pour être mis en place en 5 ans, mettra 15 ans à couvrir la France métropolitaine, les Antilles, La Réunion, Mayotte et la bande côtière de la Guyane. Le réseau est mis en place par l'Unité InfoSol au départ, puis, pour des raisons pratiques et logistiques, il sera progressivement étendu en « tache d'huile » grâce à l'appui de personnels des chambres d'agriculture des départements environnants (Arrouays *et al.*, 2002), ce qui nécessitera des formations et un appui technique aux personnels de terrain (Jolivet *et al.*, en préparation). Cette configuration présentera toutefois des inconvénients statistiques (les localisations « clusterisées » des sites et leurs dates d'acquisition n'étant pas indépendantes, il est difficile de démêler dans une tendance observée ce qui relève d'une évolution temporelle ou d'une différence géographique) qui seront finalement résolus par la stratégie du RMQS2 (Swiderski *et al.*, 2017) consistant en un échantillonnage annualisé d'un sous-échantillon représentatif de l'ensemble du territoire qui permettra de lever la contrainte précédemment évoquée, et de produire des cartes d'évolution non biaisées et plus rapidement. En revanche, la stratégie du RMQS1 permettra de disposer assez rapidement d'un territoire suffisamment grand d'un seul tenant pour pouvoir faire la preuve de la pertinence de ce dispositif pour détecter des gradients de contamination (Saby *et al.*, 2006). Cette « preuve » sera le premier résultat tangible qui confortera le GIS Sol dans la poursuite de l'acquisition des données. Le premier conservatoire des échantillons de sols sera enfin construit en 2003 grâce à des fonds de l'INRA, de la Région Centre et de l'Europe ; son équipement fut en grande partie financé par les partenaires du GIS Sol. L'Ifen, quant à lui, met deux personnes à disposition du GIS Sol, pour des objectifs spécifiques de diffusion et de valorisation des résultats vers le grand public et les décideurs des politiques publiques. Le RMQS étendra progressivement ses collaborations avec de très nombreux partenaires de terrain sans lesquels il n'aurait pas pu être mis en place. Nous les saluons ici, et pour le détail de ce réseau de partenaires, nous renvoyons à l'article très complet de Jolivet *et al.* (en préparation).

CONCLUSION

L'élaboration de la stratégie et l'obtention du financement du RMQS ont finalement pris environ trois ans de travaux et de négociations. Avec le recul, nous devons admettre que le coût initial du RMQS avait été sous-évalué, principalement celui de la main-d'œuvre. Cependant, les résultats obtenus (cf. articles de ce même numéro) montrent *a posteriori* que le jeu en valait largement la chandelle. La constitution du conservatoire a été une grande réussite (Ratié *et al.*, 2010) qui a permis au RMQS de fonctionner comme une « auberge espagnole » où de nombreux nouveaux programmes d'analyses et leurs financements sont venus se greffer progressivement. La configuration même du RMQS (grille systématique fixe exhaustive) a permis également d'ajouter de nouvelles déterminations et de nouveaux programmes en fonction de l'avancée des techniques (nouvelles mesures disponibles en routine et en grand nombre) et de l'évolution des préoccupations environnementales, agro-écologiques, sanitaires, politiques, réglementaires, etc. La France, qui était parmi les pays les plus en retard en matière de surveillance des sols, est maintenant citée en exemple, et le RMQS est un dispositif envié par de très nombreux pays. Le RMQS a été l'occasion non seulement d'acquiescer de nouvelles connaissances mais également d'appuyer les politiques publiques agricoles et environnementales nationales et communautaires (Guitton *et al.*, 2017). De nouveaux partenaires sont progressivement entrés dans le GIS Sol, souvent dans le cadre de programmes s'appuyant sur le RMQS, ou connexes du RMQS. Il n'entre pas dans nos propos de détailler tous les événements et travaux postérieurs à la naissance de ce programme, ni son évolution actuelle ou future ; nous laissons les lecteurs les découvrir dans les autres articles de ce numéro spécial.

REMERCIEMENTS

Nous remercions le Groupement d'Intérêt Scientifique Sol pour sa confiance et son soutien permanents, l'ensemble des personnels titulaires et non-permanents INRAE InfoSol en charge de la mise en place du RMQS et du Conservatoire des échantillons de sol, ainsi que tous les partenaires ayant participé à sa mise en place ou à sa valorisation. Nous remercions également Marion Bardy et Denis Baize pour leur relecture attentive et leurs remarques très constructives lors de la soumission d'une première version de cet article.

BIBLIOGRAPHIE

- Adhikari K., Hartemink A.E., 2016 - Linking soils to ecosystem services - A global review. *Geoderma*, 262, 101-111.
- Angers D.A., Arrouays D., Saby N.P.A., Walter C., 2011 - Estimating and mapping the carbon saturation deficit in French agricultural topsoils. *Soil Use and Management*, 27, 448-452.
- 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.
- Arrouays D., Martin S., Leprêtre A., Bourennane H., 2000 - Short range spatial variability of metals in an agricultural plot. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 31 (3-4) :387-400.
- Arrouays D., Thorette J., Daroussin J., 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) :7-18.
- Arrouays D., Jolivet C., Boulonne L., Bodineau G., Saby N.P.A., Grolleau E., 2002 - Une initiative nouvelle en France : la mise en place d'un Réseau multi-institutionnel de Mesures de la Qualité des Sols (RMQS). *C. R. Acad. Agr. Fr.* 88(5) : 93-105.
- Arrouays D., Saby N.P.A., Walter C., Lemerrier B., Schwartz C., 2006 - Relationships between particle size distribution and organic carbon in French arable topsoils. *Soil Use and Management*, 22, 48-51.
- Baize D., Deslais W., Bourennane H., Lestel L., 2001 - Cartographie du mercure dans l'horizon de surface des sols agricoles dans le centre du Bassin parisien. Détection, localisation et origine des contaminations. *Étude et Gestion des Sols*, 3, p. 167-180.
- Baize D., Saby N.P.A., Deslais W., Bispo A., Feix I., 2006 - Analyses totales et pseudo-totales d'éléments en traces dans les sols - Principaux résultats et enseignements d'une collecte nationale. *Étude et Gestion des Sols*, 2, 181-200.
- Baize D., Duigou N., Mathieu A., 2011 - Éléments en traces dans les sols. Valeurs de référence locales en île-de-France. *Environnement et Technique*, n°306, pp. 54-56.
- Barthod C. (1994). Le système de surveillance de l'état sanitaire de la forêt en France. *Revue Forestière Française*, XLVI, 5, 564-571.
- Bernoux M., Chenu C., Blanchart E., Eglin T., Bispo A., Bardy M., King D., 2011 - Le programme GESSOL 2 : impact des pratiques sur les matières organiques les fonctions des sols. *Étude et Gestion des Sols*, 18 (3), 137-145.
- Bispo A., Guellier C., Martin E., Sapjanskas J., Souvelet, H., Chenu C. (eds.), 2016 - Les sols. Intégrer leur multifonctionnalité pour une gestion durable. Collection Savoir-faire. Editions Quae, France. 304 p.
- Bonneau M., Belkacem S., Nys C., Ranger J., Gelhaye D., Lefèvre Y., Humbert D., 2000 - Evolution d'un sol forestier acide des Vosges sur une période de 10 ans - Observatoire de la Qualité des Sols du DONON. *Étude et Gestion des Sols*, 7 (2), 99-117.
- Bornand M., 1997 - Connaissance et suivi de la qualité des sols en France. Etat des lieux. Enjeux. Besoins en données. Propositions pour une gestion raisonnée de la ressource en sol. Rapport MAPA-MAE-INRA, INRA Montpellier. 176 p.
- Bornand M., Arrouays D., Jamagne M., Baize D. (1989). Cadre méthodologique d'une cartographie régionale des sols à l'échelle du 1/250.000. *Science du Sol*. 27(1), 17-20.
- Bouma J., 2014 - Soil science contributions towards sustainable development goals and their implementation: linking soil functions with ecosystem services. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 177(2), 111-120.
- CEE (1987). Règlement (CEE) n° 1696/87 de la Commission du 10 juin 1987 portant certaines modalités d'application du règlement (CEE) n° 3528/86 du Conseil relatif à la protection des forêts dans la Communauté contre la pollution atmosphérique (inventaires, réseau, bilans). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=CELEX%3A31987R1696&qid=1603811041011>
- Chauveau D., Saby N.P.A., Orton T.G., Lemerrier B., Walter C., Arrouays D., 2014 - Large-scale simultaneous hypothesis testing in monitoring carbon content from French soil database: A semi-parametric mixture approach. *Geoderma*, 219-220, 117-124.
- Citeau L., Bispo A., Bardy M., King D. (eds), 2008 - Gestion durable des sols. Collection : Savoir-faire. Editions Quae, France. 336 p.
- Duigou N., Baize D., 2010 - Nouvelle collecte nationale d'analyses d'éléments en traces dans les sols (horizons de surface) - (Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Se, Zn). Rapport final. Contrat ADEME 0875C0036. 284 pages.
- Duigou N., Baize D., Bispo A., 2011 - Utilisation de la base de données BDETM pour obtenir des valeurs de références locales en Éléments Traces Métalliques - Cas de la région Centre. *Étude et Gestion des Sols*, 2, 91-108.
- Favrot J.C., Arrouays D., Bornand M., Girard M.C., Hardy R., 1994 - Cartographie et gestion des ressources en sol de France : Le programme Inventaire, Gestion et Conservation des sols. *Cahiers d'études et de recherches francophones, Agricultures*, 3(4), 237-246.
- Follain S., Schwartz C., Denroy P., Villette C., Arrouays D., Walter C., Lemerrier B., Saby N.P.A., 2009 - From quantitative to agronomic assessment of soil available phosphorus content of French arable topsoils. *Agronomy for Sustainable Development*, 29, 371-380.
- Gaultier J.P., Legros J.P., Bornand M., King D., Favrot J.C., Hardy R., 1993 - L'organisation et la gestion des données pédologiques spatialisées : le projet DONESOL. *Revue de Géomatique*, 3, 235-253.
- Guitton J.L., Lavarde P., Lesaffre B., 2017 - Évaluation du Groupement d'Intérêt Scientifique GIS Sol. Rapport CGEDD n°010691-01 - CGAAER n°16081, février 2017, 62 pages + annexes.
- Jamagne M., Hardy R., King D., Bornand M., 1995a - La base de données géographique des sols de France. *Étude et Gestion des Sols*, 2 (3), 153-172.
- Jamagne M., King D., Le Bas C., Daroussin J., 1995b - Development and application of a European soil geographic database. *Eurasian Soil Science*, 27(4), 19-23.
- Jolivet C., Boulonne L., Ratié C., 2006 - Manuel du Réseau de Mesures de la Qualité des Sols, édition 2006, Unité InfoSol, INRA Orléans, France, 190 p.
- Jolivet C., Almeida-Falcon J-L., Berché P., Boulonne L., Fontaine M., Gouny L., Lehmann S., Maître B., Ratié C., Schellenberger E., Soler-Dominguez N., 2018 - Manuel du Réseau de mesures de la qualité des sols. RMQS2 : deuxième campagne métropolitaine, 2016 - 2027, Version 3, 136 p., INRA, US 1106 InfoSol, Orléans, France, ISBN : 2-7380-1416-X.
- Jolivet et al. (en préparation). Ce numéro spécial d'Étude et Gestion des Sols.
- Jonard M., Nicolas M., Coomes D.A., Caignet I., Saenger A., Ponette Q., 2017 - Forest soils in France are sequestering substantial amounts of carbon. *Science of the Total Environment*, 574, 616-628.
- Keesstra S.D., Bouma J., Wallinga J., Tittonell P., Smith P., Cerdà A., Montanarella L., Quinton J.N., Pachepsky Y., van der Putten W.H., Bardgett R.D., 2016 - The significance of soils and soil science towards realization of the United Nations Sustainable Development Goals. *SOIL*, 2(2), 111-128.
- King D., Jamagne M., Arrouays D., Bornand M., Favrot J.C., Hardy R., Le Bas C., 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), 215-228.
- Lemerrier B., Walter C., Saby N.P.A., Schwartz C., Arrouays D., 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 Base de Données des Analyses de Terre. Étude et Gestion des Sols*, 13(3), 165-180.
- Lemerrier B., Gaudin L., Walter C., Arousseau P., Arrouays D., Schwartz C., Saby N.P.A., Follain S., Abrassart J., 2008 - Soil phosphorus monitoring at the regional level by means of a soil test database. *Soil Use and Management*, 24, 131-138.
- Legros J.P., Martin S., Baize D., Rivière J.M., Leprêtre A., 2002 - Les épandages d'effluents d'élevage en Bretagne - Accumulation de cuivre et de zinc

- dans une parcelle de l'Observatoire de la qualité des sols (O.Q.S.). pp. 169-182. In : "Les Éléments traces métalliques dans les sols - Approches fonctionnelles et spatiales" D. Baize et M. Tercé coord. INRA Éditions, Paris. 570 p.
- Martin S., Baize D., Bonneau M., Chaussod R., Ciesielski H., Gaultier J.-P., Lavelle P., Legros J.-P., Leprêtre A., Sterckeman T., 1999 - Le suivi de la qualité des sols en France, la contribution de l'Observatoire de la Qualité des Sols. *Étude et Gestion des Sols*, 6 (3), p. 215-230.
- Mathieu A., Baize D., Raoul C., Daniau C., 2008 - Proposition de référentiels régionaux en éléments traces métalliques dans les sols : leur utilisation dans les évaluations des risques sanitaires. *Environnement, Risques & Santé*, 7, (2), 112-122.
- McBratney A., Field D.J., Koch A., 2014 - The dimensions of soil security. *Geoderma*, 213, 203-213.
- Montanarella L., Pennock D.J., McKenzie N.J., Badraoui M., Chude V., Baptista I., Mamo T., Yemefack M., Singh Aulakh M., Yagi K., Young Hong S., Vijarnsorn P., Zhang G.-L., Arrouays D., Black H., Krasilnikov P., Sobocká J., Alegre J., Henriquez C.R., Mendonça-Santos MdL., Taboada M., Espinosa-Victoria D., AlShankiti A., AlaviPanah S.K., Elsheikh Z.A.E., Hempel L., Camps Arbestain M., Nachtergaele F., Vargas R., 2016 - World's soils are under threat. *SOIL*, 2, 79-82.
- Nicolas M., Dambrine E., Ulrich E., 2008 - Evolution de l'acidité et dynamique des éléments nutritifs en forêt, premiers bilans. *Rendez-vous Techniques de l'ONF, hors-sérieN°4 : « 15 ans de suivi des écosystèmes forestiers. Résultats, acquis et perspectives de RENECOFOR »*, pp. 71-76.
- OFEFP (1993). Réseau national d'observation des sols - Période d'observation 1985-1991. Cahier de l'environnement n°200. Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage (OFEFP), 3003, Berne, Suisse.
- Orton T., Saby N.P.A., Arrouays D., Walter C., Lemerrier B., Schwartz C., Lark R.M., 2012 - Spatial prediction of soil organic carbon from data on large and variable spatial supports. II. Mapping temporal change. *Environmetrics*, 23, 148-161.
- Ponette Q., Ulrich E., Brêthes A., Bonneau M., Lanier M., 1997 - RENECOFOR. Chimie des sols dans les 102 peuplements du réseau, campagne de mesures 1993/1995. Office National des Forêts, Département des recherches techniques. Fontainebleau (France), 427 p.
- Ratié C., Richer-de-Forges A.C., Berché P., Boulonne L., Toutain B., Saby N.P.A., Chenu J.-P., Laloua D., Ortolland B., Tientcheu E., Soler-Dominguez N., Jolivet C., Arrouays D., 2010 - Le Conservatoire des Sols : La mémoire des sols de France. *Étude et Gestion des Sols*, 17 (3), 263-273.
- Saby N.P.A., Schwartz C., Walter C., Arrouays D., Lemerrier B., Roland N., Squidant H., 2004 - Base de données d'analyses de terre. Procédure de collecte et résultats de la campagne 1995-2000. *Étude et Gestion des Sols*, 11(3), 235-254.
- Saby N.P.A., Arrouays D., Jolivet C., Boulonne L., Pochot A., 2006 - Geostatistical assessment of lead in soil around Paris, France. *Sci. Tot. Env.* 367, 212-221.
- Saby N.P.A., Arrouays D., Antoni V., Foucaud-Lemerrier B., Follain S., Walter C., Schwartz C., 2008 - Changes in soil organic carbon content in a French mountainous region, 1990-2004. *Soil Use and Management*, 24, 254-262.
- Saby N.P.A., Lemerrier B., Arrouays D., Leménager S., Louis B.P., Millet F., Paroissien J.-B., Schellenberger E., Squidant H., Swiderski C., Toutain B., Walter C., Bardy M., 2014 - Le programme Base de Données d'Analyses de Terre. Bilan de 20 ans de collecte de résultats d'analyses. *Étude et Gestion des Sols*, 21, 141-150.
- Saby N.P.A., Swiderski C., Lemerrier B., Walter C., Benjamin P., Louis B.P., Eveillard P., Arrouays D., 2017 - Is pH increasing in the non-calcareous topsoils of France under agricultural management? A statistical framework to overcome the limitations of a soil test database *Soil Use Manag.*, 33, 460-470.
- Schwartz C., Walter C., Claudot B., Bouédo T., Arousseau P., 1997 - Synthèse nationale des analyses de terre réalisées entre 1990 et 1994 : I. Constitution d'une banque de données cantonales. *Étude et Gestion des Sols*, 4 (3), 191-204.
- Swiderski C., Saby N.P.A., Party J.-P., Sauter J., Köller R., Vandijk P., Lemerrier B., Arrouays D., 2012 - Evolution des teneurs en carbone organique dans l'horizon de surface des sols cultivés en Alsace. Analyse à partir de la base de données d'analyses de terres. *Étude et Gestion des Sols*, 19(3), 172-192.
- Swiderski C., Saby N.P.A., Boulonne L., Jolivet C., Cousin I., 2017 - Méthodologie d'élaboration du plan d'échantillonnage de la deuxième campagne du Réseau de Mesures de la Qualité des Sols de France par intégration multi-critères. Capacité à détecter une évolution temporelle, évaluation du réservoir en eau utilisable et contraintes logistiques. *Étude et Gestion des Sols*, 24 (1), 83-99.
- Thorette J., Arrouays D., 1999 - Proposition pour la mise en place d'un dispositif national d'inventaire et d'observation des sols (DINIOS). Rapport IFEN/INRA. 50 p.
- Ulrich E., 1995 - Le réseau RENECOFOR : objectifs et réalisation. *Revue forestière française*, XLVII, 2, 107-124.
- Ulrich E., Croisé L., Lanier A., Brêthes A., Cecchini S., 2009 - ENECOFOR. Manuel de référence n°4 pour l'échantillonnage des sols et des litières en grappes et la préparation des échantillons, 3^e version. Office National des Forêts, Direction technique et commerciale bois, Département recherche, 41 p.
- Voynet D., Hervieu B., 2000 - La convention-cadre MATE-INRA. *Le Courrier de l'environnement de l'INRA*, 39, 87-90.
- Walter C., Schwartz C., Claudot B., Bouédo T., Arousseau P., 1997 - Synthèse nationale des analyses de terre réalisées entre 1990 et 1994 : II. Descriptions statistique et cartographique de la variabilité des horizons de surface des sols cultivés *Étude et Gestion des Sols*, 4 (3), 205-219.
- Wopereis M.C., Gascuel-Oudoux C., Bourrié G., Soignet G., 1988- Spatial variability of heavy metals in soil on a one hectare scale. *Soil Science*, 146(2), 113-118.