

Connaître les sols pour mieux les gérer : un système d'information national sur les sols

2.1. Introduction

Les nombreuses fonctions des sols, soulignées en 2002 par la Commission européenne [COM 02], demeurent peu perçues par la société, alors qu'elles sont au cœur de grands enjeux planétaires, comme la sécurité alimentaire (en quantité et en qualité), la qualité des masses d'eau souterraines et superficielles, l'atténuation du changement climatique ou la préservation de la biodiversité.

Les sols constituent une ressource naturelle qu'il convient non seulement de protéger, mais aussi de valoriser efficacement et durablement pour le bien-être de l'humanité. Leur formation très lente et leur destruction qui peut être rapide et quasi irréversible en font une ressource que l'on peut qualifier de non renouvelable. Or les sols sont soumis à une pression accrue qui se traduit par des menaces sur la durabilité de leurs fonctions [COM 02].

Les propriétés des sols présentent une forte variabilité spatiale ; pour les gérer au mieux, il convient d'en réaliser un inventaire cartographique. Par ailleurs, certaines propriétés étant susceptibles d'évoluer, en particulier sous l'effet des pressions anthropiques ou du changement climatique, la mise en place de dispositifs de surveillance est nécessaire afin de détecter précocement des dégradations qui peuvent être irréversibles. La prise en compte de la multiplicité des fonctions des sols nécessite

Chapitre rédigé par Marion BARDY, Dominique ARROUAYS, Claudy JOLIVET, Bertrand LAROCHE, Christine LE BAS, Manuel MARTIN, Céline RATIÉ, Anne RICHER-DE-FORGES, Nicolas SABY, Véronique ANTONI, Antonio BISPO, Michel BROSSARD, Jean-Luc FORT, Joëlle SAUTER et Chantal GASCUEL.

de définir des notions de qualité des sols, qui ne reposent plus sur les seuls concepts de fertilité physique, chimique et biologique.

Tout en les replaçant dans un contexte international, ce chapitre explicite et discute la capacité des dispositifs français d'observation à recueillir des données pertinentes à différentes échelles pour l'inventaire et la surveillance des sols de France.

2.2. Inventaire et surveillance des sols en Europe et dans le monde

À l'échelle mondiale, la seule base de données géographique sur les sols en format vectoriel correspond à une cartographie réalisée à l'échelle du 1/5 000 000 [FAO 90]. Il s'agit d'une carte de synthèse fondée sur des regroupements de sols à un très haut niveau taxonomique. Son échelle, ainsi que son aspect essentiellement qualitatif, ne permettent pas une utilisation à des résolutions continentales ou nationales. Elle a été utilisée pour effectuer des estimations quantitatives de propriétés de sols, comme les stocks de carbone organique [BAT 96], mais ces dernières restent très imprécises. Au niveau mondial, Hartemink [HAR 08] a estimé qu'un tiers des pays, soit 69 % des terres émergées, ne disposait pas encore d'une cartographie de leurs sols à une échelle supérieure à 1/1 000 000. En Europe, la base de données géographique vectorielle harmonisée la plus précise correspond à une échelle du 1/1 000 000 [KIN 95], et de nombreux pays ne disposent pas encore d'une carte des sols à une échelle supérieure ou égale à 1/250 000.

Quant aux dispositifs de surveillance systématique des sols, ils se caractérisent par une très grande hétérogénéité, tant dans leurs stratégies d'échantillonnage, que dans les paramètres suivis et les méthodes employées [MOR 08]. Les seuls dispositifs harmonisés d'étendue continentale sont les réseaux européens BioSoil et LUCAS-Soil [PAN 12]. Ces réseaux ne disposent toutefois pas encore d'un recul temporel suffisant pour permettre de détecter des évolutions notables.

Devant les enjeux globaux posés par la gestion des sols, la communauté internationale s'est organisée en 2012 pour mettre en place un Partenariat mondial sur les sols (Global Soil Partnership) sous l'égide de la FAO (Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture). Il repose sur cinq piliers, avec le pilier 4 dédié à l'acquisition et au partage des données sur les sols. L'un des enjeux majeurs de ce pilier est de mettre en place des bases de données harmonisées sur les caractéristiques des sols et sur leur évolution. Il bénéficiera pour cela de la structuration de la communauté scientifique au sein du consortium GlobalSoilMap [ARR 14], qui a produit des spécifications pour une cartographie harmonisée des propriétés des sols au niveau mondial.

Malgré des données disponibles très imprécises, des estimations de l'état des sols dans le monde et en Europe ont été produites, avec notamment en 2015, « Année internationale des Sols », la publication par la FAO et les Nations Unies du Rapport sur l'état des ressources mondiales en sol publié dans le cadre du Partenariat mondial sur les sols [FAO 15]. On estime que 22 % des terres émergées possèdent des sols potentiellement favorables à l'agriculture et que, parmi ceux-ci, 60 % sont touchés par une ou plusieurs formes de dégradation. À l'échelle mondiale, la perte en sol par érosion est estimée entre 20 et 30 milliards de tonnes par an, soit plus de 3 tonnes par habitant et par an. Environ 20 millions d'hectares de sols agricoles sont convertis chaque année dans le monde pour l'expansion urbaine et industrielle, soit plus que la surface des terres arables de France, ce qui représente un taux d'artificialisation de 6 350 m² par seconde (environ l'équivalent d'un terrain de football). La contamination des sols par des éléments traces métalliques ou des polluants organiques persistants est un problème majeur dans certains pays émergents comme l'Inde ou la Chine. Ainsi, les pertes de production en céréales liées à la contamination représentent environ 12 % de la production totale en Chine, soit un coût de l'ordre de 2,6 milliards d'euros par an.

2.3. Dispositifs nationaux d'acquisition de données sur les sols

2.3.1. Enjeux et demandes

L'accès à des données sol est indispensable pour répondre à de nombreuses thématiques, allant de la gestion d'une exploitation agricole, à la protection de ressources naturelles et à l'aménagement de l'espace rural et forestier. Au niveau national, les demandes sont croissantes et les besoins s'expriment à des échelles très diverses en fonction des thématiques et des acteurs [LEB 06, RIC 12]. Les ministères et les agences nationales expriment le plus souvent des besoins de cartes, zonages ou indicateurs d'ampleur nationale pour orienter leurs politiques ou répondre aux obligations de reportages européens. Il s'agit par exemple de l'estimation du potentiel de stockage de carbone dans les sols français, en appui aux négociations internationales, des concentrations en micropolluants (métalliques et organiques) dans les sols pour évaluer les risques d'exposition des populations, ou encore de l'estimation de l'érosion des sols dans le cadre du rapportage auprès de l'Organisation de coopération et de développement économique (OCDE). Des acteurs comme les collectivités, parcs naturels, associations, ont quant à eux plutôt des besoins sur des territoires limités, pour des thématiques parmi lesquelles la protection de la ressource en eau à l'échelle d'un captage ou d'un bassin versant, la gestion de la biodiversité ou l'élaboration de documents

d'urbanisme. Quant à la profession agricole, ses besoins se déclinent aussi bien au niveau des bassins de production qu'aux échelles parcellaires, en vue de la gestion de la fertilité des sols. Les besoins concernent de plus en plus des bases de données spatialisées, qui peuvent être exploitées directement *via* des Systèmes d'information géographiques (SIG), ou servir de données d'entrée à des modèles ou des outils d'aide à la décision. La multiplicité des thématiques en jeu nécessite de pouvoir accéder à une grande diversité de caractéristiques et de propriétés des sols ainsi qu'une bonne compréhension des processus en jeu.

2.3.2. Structuration des dispositifs nationaux de collecte de données

Au niveau national, plusieurs initiatives ont été lancées dès les années 1960 pour améliorer la connaissance des sols français. Néanmoins, le rapport Bornand [BOR 97] a fait le constat que ces initiatives souffraient d'un manque de coordination, tant dans l'acquisition que dans la sauvegarde des données, et que la plupart ne menaient pas à une conservation pérenne et harmonisée des informations concernant les sols. Les données ainsi acquises étaient donc peu disponibles et peu exploitables au regard de leur potentiel. Par ailleurs, aucune stratégie nationale de surveillance des sols n'était en œuvre à la fin des années 1990. Une revue des principales stratégies d'acquisition de données sur les sols en Europe [ARR 98] a montré que la France accusait à la fin des années 1990 un déficit important vis-à-vis de la connaissance de ses sols et de la surveillance de l'évolution de leur qualité, en comparaison de ses voisins européens.

Conscients de leurs intérêts convergents à disposer au niveau national d'informations sur la caractérisation des sols et l'évolution de leur qualité, les ministères en charge de l'agriculture et de l'écologie, l'Institut national de la recherche agronomique (INRA), l'Institut français de l'environnement (IFEN) et l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME) ont décidé de renforcer et de mettre en commun leurs moyens pour mettre en place un dispositif national d'inventaire et de surveillance des sols. C'est ainsi qu'a été créé en 2001 le Groupement d'intérêt scientifique Sol (Gis Sol), regroupant ces organismes, qui ont été rejoints par l'Institut de recherche pour le développement (IRD) et l'Institut national de l'information géographique et forestière (IGN). Le Gis Sol s'est doté de programmes nationaux d'acquisition de données, et l'unité Inra InfoSol a été créée de manière à coordonner ces programmes au niveau national, pour assurer une harmonisation et une gestion pérenne des données collectées, ainsi que leur mise à disposition des pouvoirs publics et de la société. Ce dispositif, tout à fait original au niveau européen, a été renouvelé en 2006, puis en 2012. Il fait l'objet de l'encadré 2.1.

Le Groupement d'intérêt scientifique Sol (Gis Sol) a été créé en 2001. Il regroupe les ministères en charge de l'agriculture et de l'environnement, l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (Ademe), l'Institut national de la recherche agronomique (Inra), l'Institut de recherche pour le développement (IRD) et l'Institut national de l'information géographique et forestière (IGN).

Il a pour objectif de constituer et gérer un système d'information sur les sols de France répondant aux besoins régionaux et nationaux, dans le contexte européen et mondial. Le Gis Sol organise la concertation et la coopération entre ses membres dans le but de concevoir, orienter, coordonner, et s'assurer que se réalisent dans les meilleures conditions, des actions d'inventaire géographique des sols, de suivi opérationnel de leurs qualités, de création et de gestion d'un système d'information répondant aux demandes des pouvoirs publics et de la société.

Le Gis Sol est ainsi porteur du principal outil de surveillance environnementale des sols dont la France dispose. Ses travaux sont conduits autour de trois grands programmes complémentaires : Inventaire, gestion et conservation des sols (IGCS), Réseau de mesures de la qualité des sols (RMQS) et Base de données des analyses de terres (BDAT). Leur coordination au niveau national est confiée à l'unité de service InfoSol de l'Inra, qui mobilise des réseaux de partenaires en région. Le premier état des lieux sur la qualité des sols de France métropolitaine et d'outre-mer a été publié en 2011, dans le rapport sur l'état des sols de France.

Disponible à l'adresse : www.gissol.fr.

Encadré 2.1. *Le Groupement d'intérêt scientifique Sol*

Deux stratégies complémentaires d'acquisition de données sont mises en œuvre dans le cadre du Gis Sol, afin d'une part de connaître et gérer la diversité de sa couverture pédologique, et d'autre part de disposer d'un dispositif de surveillance des sols susceptible de détecter de façon précoce des évolutions de leurs qualités. Ce sont à la fois des données d'inventaire et de surveillance des sols qui sont collectées au travers de programmes dédiés du Gis Sol, qui sont décrits en détail dans la suite du document. Ces deux stratégies sont mises en œuvre selon différentes modalités visant à optimiser la collecte, en combinant la capitalisation de données préexistantes et l'acquisition de nouvelles données *via* des dispositifs dédiés (tableau 2.1). Tous ces programmes ont en commun de reposer sur la mobilisation et l'animation par l'unité Inra InfoSol de réseaux de partenaires à l'échelle nationale, et d'aboutir à une capitalisation :

- de données dans un système d'information unique et harmonisé, visant à en faciliter l'exploitation (base de données nationale DoneSol) ;
- d'échantillons au sein du Conservatoire européen des échantillons de sols (CEES), dont l'unité Inra InfoSol assure également la gestion.

	Inventaire	Surveillance
Capitalisation de données préexistantes	Programme d’Inventaire, gestion et conservation des sols (IGCS)	Bases de données des analyses de terre (BDAT) et des éléments trace métalliques (BDETM)
Acquisition de nouvelles données		Réseau de mesures de la qualité des sols (RMQS)

Tableau 2.1. *Stratégies des différents programmes nationaux d’acquisition de données sur les sols (source : M. Bardy)*

En parallèle, dans le cadre de la politique de gestion des sites et sols pollués, le ministère en charge de l’écologie pilote, indépendamment du Gis Sol, le recensement :

- des activités potentiellement polluantes ;
- des sites et sols pollués ou potentiellement pollués, appelant une action des pouvoirs publics à titre préventif ou curatif. Ces données alimentent les bases de données Basias et Basol.

2.3.2.1. Inventaires des sols à différentes échelles

Au niveau national, des programmes d’inventaire des sols ont été initiés dès les années 1960. Ils se sont poursuivis à différentes échelles et se sont structurés en un programme national unique (Inventaire, gestion et conservation des sols) en 1990, repris par le Gis Sol en 2001. L’objectif de ce programme est de capitaliser sous un format unique des données pédologiques anciennes et d’en acquérir de nouvelles à différentes échelles, avec comme priorité d’achever à court terme une couverture nationale à l’échelle du 1/250 000. Depuis 2011, la finalisation de cette couverture est rendue d’autant plus indispensable que cette base de données sert actuellement de support à la révision de zonages de la Politique agricole commune (PAC).

Les informations recueillies dans le cadre de ce programme permettent de constituer une représentation cartographique de la répartition spatiale des sols, sous forme d’Unités cartographiques de sols (UCS), associée à une base de données au format national DoneSol [INR 13] décrivant notamment les Unités typologiques de Sols (UTS) qui les composent. L’acquisition des données est réalisée conformément au Cahier des clauses techniques générales (CCTG) IGCS [INR 05], lui-même cohérent avec la norme NF X31-560 [AFN 07], et qui décrit les modes d’acquisition, d’organisation

et de validation des données d'inventaire de sols. Le programme IGCS est multi-échelle et s'organise en différents volets :

- le volet Référentiel régional pédologique (RRP), au 1/250 000, vise à réaliser des cartographies régionales de sols [LAR 14], mobilisées comme support d'aide à la décision au niveau national, régional ou départemental ;

- le volet Connaissance pédologique de la France (CPF), aux moyennes échelles (1/100 000 à 1/50 000) vise à améliorer la connaissance de la diversité des sols et de leurs lois de répartition spatiale sur la base de leurs facteurs de formation [RIC 14], avec une utilisation privilégiée sur des bassins versants ou des territoires ;

- le volet Secteurs de référence (SR), à grandes échelles (de l'ordre de 1/10 000), vise à réaliser des études pédologiques plus détaillées permettant de traiter des questions agricoles ou environnementales à des échelles locales, avec une possibilité d'extrapolation sur une petite région naturelle.

Fin 2016, 92 % du territoire métropolitain disposait d'une cartographie au 1/250 000 finalisée acquise au niveau départemental ou régional [LAR 14]. Une harmonisation nationale de ces cartographies est en cours pour disposer d'une carte nationale à l'échelle du 1/250 000. Par ailleurs, les cartographies au 1/100 000 et au 1/50 000 couvrent respectivement 24 % et 18 % du territoire métropolitain [RIC 14]. Outre-mer, 14 % du territoire de la Guyane est inventorié, et les territoires insulaires disposent de cartographies des sols à différentes échelles, dont l'actualisation a été effectuée dans le cadre du programme IGCS [DUP 15].

2.3.2.2. Collecte de données sur des caractéristiques des sols

2.3.2.2.1. Base de données des analyses de terre

Dès les années 1980, l'École nationale supérieure d'agronomie de Rennes (ENSAR) a mis en place en Bretagne un programme de collecte des analyses de terres. Celui-ci a été généralisé à l'ensemble de la France par le biais d'une convention avec l'Association française pour l'étude des sols, puis pérennisé dans le cadre du Gis Sol. Ce programme de surveillance capitalise au sein de la Base de données des analyses de terres (BDAT) les résultats des analyses réalisées à la demande des agriculteurs auprès des laboratoires d'analyses agréés par le ministère en charge de l'agriculture [SAB 14]. Unique en Europe, cette base de données nationale regroupe et rend ainsi exploitables les analyses de plus de 2,5 millions d'échantillons d'horizons de surface de sols agricoles, dont les prélèvements ont été réalisés depuis plus de 25 ans. Ce sont essentiellement des paramètres agronomiques qui sont renseignés au sein de cette base. Les données sont référencées géographiquement à l'échelle de la commune. La quantité de données, ainsi que le recul temporel permettent de dégager des tendances d'évolutions pour certains de ces paramètres. Elle constitue donc un outil de surveillance et d'alerte des évolutions des caractéristiques agronomiques des sols agricoles.

Concernant les usages forestiers et urbains, les données sont actuellement peu organisées au sein de bases de données facilement accessibles, ou encore totalement lacunaires (encadré 2.2).

Concernant les sols forestiers, il existe une ressource importante et sous-exploitée de données [EGL 14], disponibles au sein d'une diversité d'organismes de développement et de recherche (exemple : INRA, ONF, IGN, FCBA). Si certaines sources sont accessibles (exemple : données RMQS des sols forestiers) beaucoup de données sont encore peu exploitables et exploitées, en dehors des organismes les ayant collectées. Face à la dispersion et à la faible harmonisation de ces données, des chantiers importants sont à mettre en œuvre pour favoriser leur diffusion et utilisation (exemple : mise en base de données, production de métadonnées et de référentiels sémantiques communs, clarification des droits de propriété).

Concernant les sols urbains, les données sont encore lacunaires, peu organisées et donc peu accessibles. Elles sont en général produites par les collectivités locales lors de la réalisation d'aménagements, par des programmes de recherche pour des usages spécifiques (exemple : sols de jardin, planification urbaine [KEL 12]), ou par des enquêtes nationales [JOI 16]. Différentes initiatives tentent actuellement de collecter ces données sur les caractéristiques agronomiques (texture, fertilité) et environnementales (concentration en micropolluants métalliques et organiques) des sols urbains et péri-urbains, afin de constituer une première base nationale.

Parallèlement, que ce soit pour les sols forestiers et urbains, il s'agit de s'interroger sur les possibilités à moyen terme d'améliorer la coordination entre production et gestion de données, afin de les centraliser sous un même système d'information.

Encadré 2.2. *Quelles données sur les sols forestiers et urbains ?*

2.3.2.2.2. Base de données « Éléments traces métalliques »

Depuis 1997, une étude préalable à l'épandage des boues de station d'épuration est nécessaire pour caractériser l'aptitude des terres à les recevoir. Les éléments traces métalliques et le pH doivent ainsi être analysés sur les sols des parcelles concernées par les plans d'épandage. Ces analyses sont centralisées par différents organismes (par exemple : les chambres d'agriculture, les bureaux d'étude, les collectivités) répartis sur l'ensemble du territoire national. Au cours de deux campagnes, menées en 1998 et 2008, le Gis Sol a recueilli, centralisé et structuré ces informations. Ce sont aujourd'hui près de 500 000 résultats d'analyses d'éléments traces métalliques qui ont été collectés et sont disponibles pour produire des statistiques de distribution et d'évolution.

2.3.2.3. Surveillance systématique des sols français

C'est avec la création du Gis Sol que la France s'est dotée d'un dispositif permettant d'évaluer et de suivre la qualité de ses sols avec la mise en place en 2000 du Réseau de mesures de la qualité des sols (RMQS). Celui-ci repose sur un suivi systématique de 2 240 sites répartis uniformément sur l'ensemble du territoire

métropolitain selon une maille carrée de 16 km de côté (figure 2.1) calée sur le Réseau européen de suivi des dommages forestiers (Santé des forêts, ICP-Forest niveau 1) et représentative des principales combinaisons type de sols x occupation des sols rencontrées au niveau national. Ce maillage est progressivement étendu aux départements d'outre-mer. Ce dispositif de surveillance repose sur la réalisation de mesures et d'observations au centre de chaque maille avec un pas de temps de l'ordre de 15 ans. La 1^{re} campagne en France métropolitaine s'est déroulée de 2000 à 2009. Durant cette période, des sites ont également été décrits et analysés dans les Antilles françaises (Martinique, Guadeloupe), et complétés depuis par l'installation de sites à la Réunion, à Mayotte et dans la frange côtière de la Guyane, en partenariat avec l'IRD et le Cirad.



Figure 2.1. Maillage du Réseau de mesures de la qualité des sols en France métropolitaine (source : RMQS)

Des analyses de propriétés physiques, chimiques et biologiques sont réalisées sur les échantillons prélevés et capitalisées au sein de la base de données nationale DoneSol. Des échantillons sont archivés de manière systématique au sein du Conservatoire européen des échantillons de sols, sur le site de l'Inra d'Orléans [RAT 10]. Témoins de l'état des sols au moment où ils ont été prélevés, ils peuvent être remobilisés et analysés de manière rétrospective, en réponse à des problématiques émergentes ou suite au développement de nouvelles méthodes analytiques. Cela a, par exemple, été le cas récemment avec la détermination à l'échelle de l'ensemble du territoire métropolitain de paramètres biologiques des sols [RAN 13] ou l'analyse de polluants organiques persistants [VIL 13].

La seconde campagne de collecte du RMQS a débuté en 2016. La stratégie d'échantillonnage a été totalement revue. La première campagne avait avancé par région, au fur et à mesure de la mobilisation de nouveaux partenaires. La seconde campagne repose sur une stratégie d'échantillonnage annualisée, avec des prélèvements d'échantillons répartis tous les ans sur l'ensemble du territoire. Elle vise en priorité à répondre à des enjeux liés au changement climatique. Il s'agit par exemple de favoriser la détection d'évolutions des teneurs et des stocks en carbone organique et l'acquisition de paramètres physiques du sol en relation avec la gestion de la ressource en eau. Cette campagne est par ailleurs enrichie en termes de collecte, avec des prélèvements plus profonds (1 m au lieu de 50 cm lors de la première campagne). Les déterminations ont vocation à être enrichies, au fur et à mesure de la mise en place de l'échantillonnage, dans le cadre de programmes de recherche ou de demandes des agences nationales.

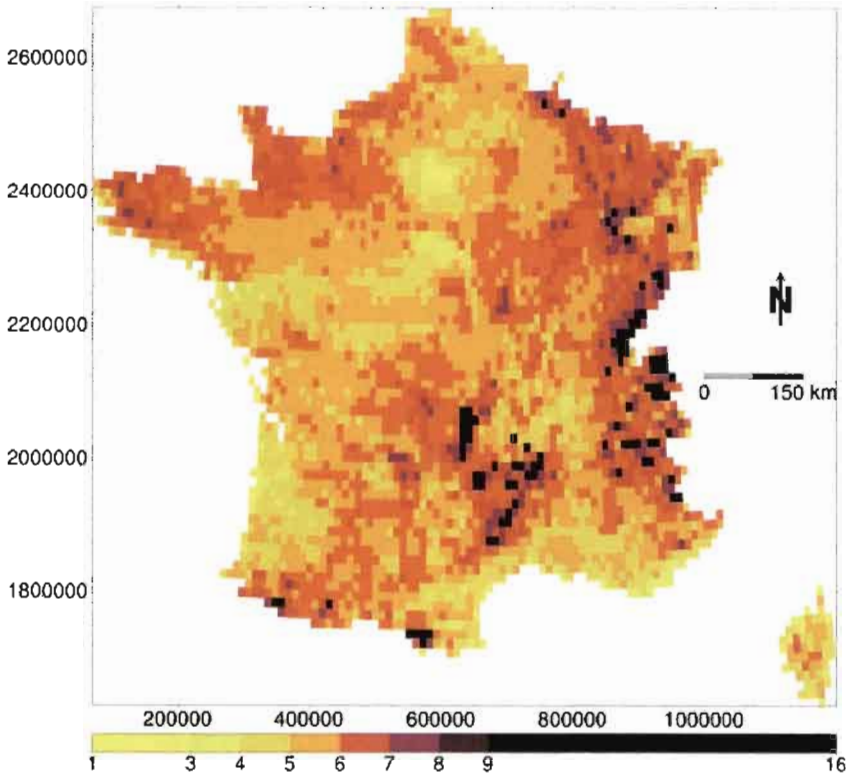
2.4. Exploitation des données pour la production de cartographies et d'indicateurs

Les dispositifs nationaux présentés plus haut ont chacun des avantages et des inconvénients spécifiques. Leurs complémentarités, ainsi que le croisement des données collectées avec des données externes, et le recours à la modélisation permettent des exploitations multiples, en réponse aux préoccupations des pouvoirs publics et de la société.

Le Réseau de mesures de la qualité des sols présente une approche non biaisée et systématique, avec de nombreuses mesures et informations connexes enregistrées pour chacun de ses 2 240 sites métropolitains. Il permet ainsi une caractérisation de la qualité des sols de France sans *a priori*. Il a permis, par exemple, de cartographier la distribution globale des éléments traces métalliques des sols en France, et d'identifier leurs sources [SAB 11], selon leur origine : naturelle (géologique et pédologique), anthropique (contaminations diffuses ou ponctuelles liées à l'industrialisation, aux transports, aux apports aux sols tels que des amendements, des traitements phytosanitaires, etc.) Des teneurs en éléments - traces métalliques « naturelles » ont pu être quantifiées régionalement. Leur comparaison avec des résultats d'analyses de sols permet la détection d'anomalies, ce qui constitue un outil précieux pour l'identification de sites contaminés. Par ailleurs, de larges gradients de contamination ont ainsi pu être démontrés, comme par exemple en périphérie des zones fortement urbanisées ou industrialisées [SAB 06], ou bien sur des surfaces beaucoup plus importantes correspondant à des dépôts provenant de transports atmosphériques de longue distance [VIL 13].

Le RMQS est également un support remarquable pour la réalisation d'évaluations ou de simulations nationales. Les exemples les plus récents concernent l'évaluation des stocks de carbone des sols (figure 2.2) [MAR 11, MEE 12], et la prédiction de leur évolution sous l'effet du changement climatique ou d'usage des sols [TOS 14]. Le RMQS constitue ainsi un appui important aux politiques publiques dans le

domaine des négociations concernant le climat. Il deviendra d'autant plus pertinent, dans les prochaines années, au fur et à mesure de l'avancement de la seconde campagne de collecte d'échantillons, avec l'ajout d'une dimension temporelle.



La BDAT et la BDETM disposent d'un recul temporel beaucoup plus important, de 1990 environ, à nos jours. Elles ne sont cependant pas maîtrisées au plan de l'échantillonnage, que ce soit du point de vue spatial ou temporel. Seuls des paramètres agronomiques sont collectés, au sein de la BDAT, et des analyses d'éléments traces métalliques réglementaires au sein de la BDETM, et ce ne sont généralement que les horizons de surface qui sont analysés. En revanche, elles disposent (surtout la BDAT) de données acquises « en masse », ce qui leur confère une certaine robustesse statistique. Grâce aux données issues de la BDAT, et en les agrégeant sur plusieurs années et à l'échelle des cantons, il a été possible d'identifier et de quantifier certaines tendances

« marquées » d'évolution des sols (figure 2.3, [LEM 08, SAB 08]), de caractériser des gradients régionaux ou nationaux [FOL 09] et de mettre en évidence des relations statistiques entre certains paramètres des sols [ARR 06].

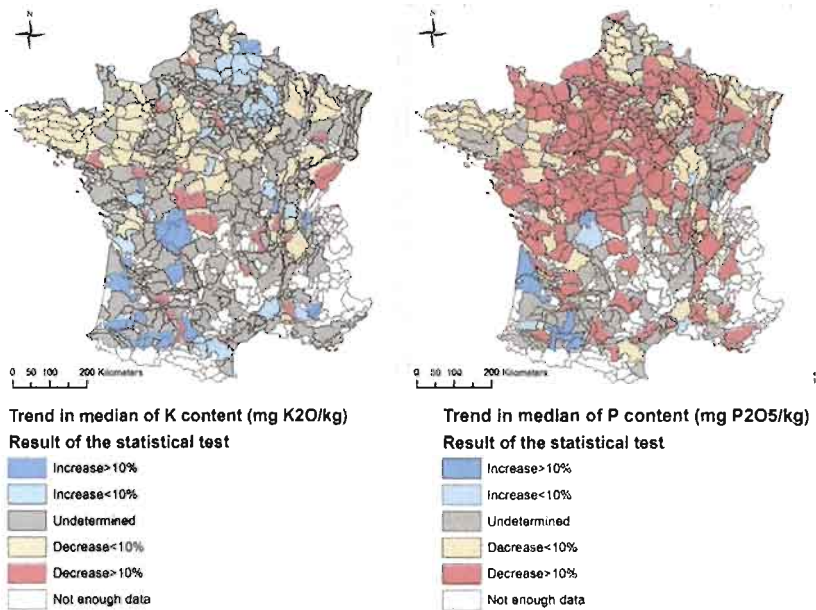


Figure 2.3. Évolution des teneurs médianes en potassium échangeable (K₂O) et phosphore échangeable (P₂O₅) par petites régions agricoles, entre les périodes 1990-2004 et 2005-2014, (source : Gis Sol, BDAT, 2016 ; IGN, Geofla[®], 2008)

Le programme IGCS présente l'avantage de donner une description plus fine de la distribution des sols que ne le permettent les deux programmes évoqués plus haut. Il permet donc des applications plus locales et d'une résolution spatiale plus fine. Des exemples récents concernent l'utilisation des données IGCS pour une pré-délimitation des zones humides ou des zones défavorisées simples en appui aux politiques publiques [LAR 14]. La résolution des données collectées, ainsi que la profondeur d'investigation des sols, offrent la possibilité d'applications plus locales (par exemple : protection des eaux superficielles ou souterraines, zonage des risques d'érosion, aide à la décision pour l'aménagement du territoire, applications géotechniques, etc.). Le réseau mixte technologique Sols et Territoires (encadré 2.3) coordonne des travaux de valorisation des bases de données d'inventaires de sols. Du fait du format national de capitalisation des données, des méthodologies permettant la valorisation thématique des données peuvent être développées en commun, puis adaptées aux contextes locaux. En revanche, les paramètres mesurés par ce programme (principalement

des caractéristiques pérennes) et son mode d'échantillonnage spatio-temporel non maîtrisé font qu'il est peu adapté à la détection d'évolutions à court ou moyen termes.

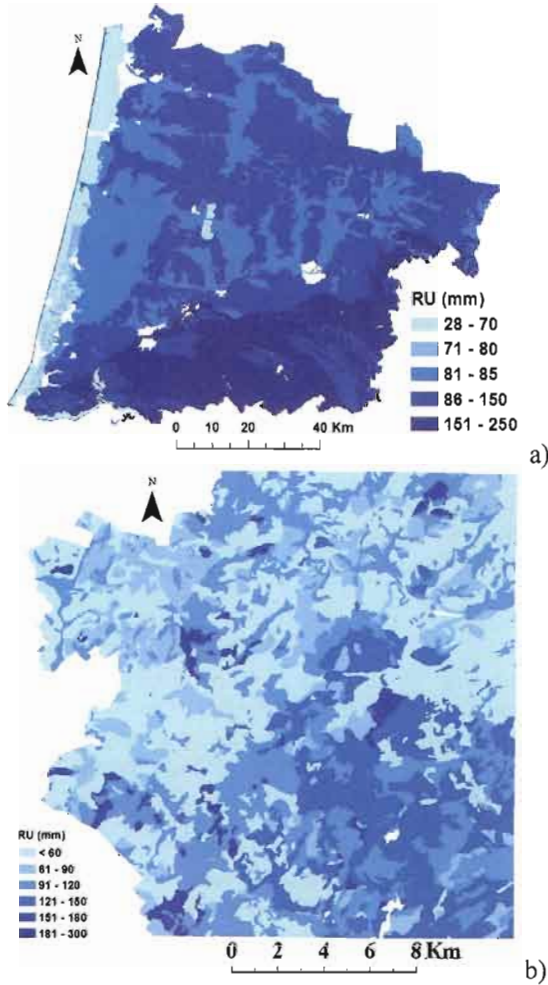


Figure 2.4. Exemples de carte du réservoir utilisable de l'eau, des sols :
 a) à partir du 1/250 000 du département des Landes ; b) à partir du 1/50 000
 de Patay (source : [RIC 03], repris par M. Bardy)

De plus en plus de travaux portent sur l'enrichissement mutuel des données acquises au niveau des différents programmes et leur exploitation conjointe. L'ensemble de ces données est par exemple mobilisé pour produire la contribution française au programme « GlobalSoilMap » [ARR 14], qui vise à créer une base mondiale de quelques propriétés

des sols considérées comme majeures pour évaluer leurs fonctions et services. À l'échelle de la France métropolitaine, des essais ont produit des cartographies, à partir de modèles spatiaux, concernant la profondeur des sols [LAC 16], la teneur en carbone organique [MUL 16a], la granulométrie et le pH [MUL 16b]. Ces travaux se poursuivent pour affiner ces prédictions, principalement en région Centre [CIA 14], en Bretagne [LEM 12] et en Languedoc-Roussillon [VAY 15], et pour les étendre à d'autres paramètres.

En 2011, après 10 ans de travaux, le Gis Sol a publié le Rapport sur l'état des sols de France, premier bilan de l'état des sols de France métropolitaine et d'outre-mer. Celui-ci est présenté en détail dans l'encadré 2.3. Sa publication a été largement relayée dans la presse ; ce rapport constitue un excellent support de sensibilisation à la nécessité de prendre en compte les sols dans les décisions publiques.

Le premier bilan concernant les sols de France

Après dix ans de travaux, le Groupement d'intérêt scientifique Sol (Gis Sol), a souhaité dresser le premier bilan scientifiquement quantifié de l'état des sols de France métropolitaine et d'outre-mer. Ce rapport de 188 pages [GIS 11], fondé sur l'exploitation de l'ensemble des données disponibles, fournit aux citoyens et à tous les acteurs de l'environnement les clés pour comprendre les fonctions des sols, les services qu'ils rendent et les pressions qu'ils subissent. Il établit un diagnostic de leur état chimique, biologique et physique. Il en souligne les points positifs et met en évidence les principales inquiétudes.

Un bilan globalement positif

Le rapport met en avant de nombreux points positifs, comme des teneurs faibles pour la majorité des contaminants métalliques et organiques, la bonne gestion, à l'échelle nationale, de l'acidité des sols agricoles et de leurs teneurs en potassium ou la présence d'ADN microbien dans l'ensemble des sols, démontrant ainsi que les sols sont bien vivants.

Le rapport révèle cependant quelques points d'inquiétude. Certains pesticides, interdits aujourd'hui, mais fortement rémanents (DDT, lindane par exemple), ont été retrouvés dans l'ensemble des points de mesure, y compris dans ceux où ils n'ont jamais été épandus. Aux Antilles, la contamination par la chlordécone est préoccupante. Le rapport montre également des déséquilibres dans les teneurs en phosphore, avec des régions déficitaires et d'autres fortement excédentaires, à même de contribuer à des phénomènes d'eutrophisation. Enfin, une inquiétude majeure concerne la progression de l'artificialisation.

Des connaissances restant à acquérir

En outre, le rapport met en lumière de nombreuses incertitudes liées à des manques de connaissances : devenir du stockage du carbone sous l'effet du changement climatique, évolution et fonctions de la biodiversité et de l'état physique des sols (tassement, érosion), etc.

Disponible à l'adresse : www.gissol.fr/publications.

Encadré 2.3. Le rapport sur l'état des sols de France

Depuis, des publications collaboratives des partenaires du Gis Sol ont mis en exergue les derniers résultats issus des programmes du Gis Sol. La première [ADE 13] fait le point sur le carbone des sols en détaillant les enjeux pour le climat et l'agronomie. La deuxième [SOE 15], publiée en 2015 à l'occasion de l'Année internationale des sols, correspond à un panorama d'indicateurs et de chiffres clés sur les sols et l'environnement, pertinents pour éclairer les enjeux dont les sols sont porteurs. Ces deux publications ont fait l'objet d'une large diffusion auprès de publics variés : éclairé, généraliste, structures d'enseignement agricole, etc.

2.5. Diffusion et mise à disposition des données

Après une dizaine d'années consacrées à la mise en place des programmes et à la collecte des données, le Gis Sol consacre des moyens, depuis 2012, à la mise à disposition des données collectées, sous forme brute ou élaborée.

2.5.1. Un système d'information national (information system) sur les sols tourné vers la diffusion des données

Ces dernières années, l'architecture du système d'information national sur les sols a été entièrement revue de manière à favoriser la mise à disposition des données. Le cœur du système d'information reste les bases de données « opérationnelles », au sein desquelles sont stockées les données brutes. La base de données nationale DoneSol, en particulier, est la base de données relationnelle au sein de laquelle sont capitalisées les données issues des inventaires et de la surveillance systématique des sols. Sa structure est relativement complexe, du fait de sa richesse. De ce fait, son exploitation n'est pas toujours aisée pour un public non initié. À ce système d'information opérationnel ont été adossés :

- un système d'information décisionnel, au sein duquel les données concernant les sols, ainsi que des données externes sont stockées dans des formats simplifiés et harmonisés. Cela facilite d'une part leur mise à disposition dans des formats simples auprès de demandeurs variés et d'autre part leur traitement ultérieur pour les besoins propres du Gis Sol ;

- un système d'information statistique, au sein duquel sont capitalisés des scripts de traitement des données pouvant être exécutés automatiquement de manière à faciliter la mise à jour de données traitées puis leur diffusion.

Ces éléments sont complétés par des outils de vérification de la cohérence des données, de traçabilité des transformations effectuées sur les données, et de documentation des données sous forme de métadonnées. Enfin, le lien avec une infrastructure de données géographiques permet la création de services Web et l'alimentation de différentes interfaces cartographiques, permettant la consultation et l'accès aux données.

2.5.2. Un enrichissement progressif de l'offre de données et de métadonnées

L'intérêt croissant pour les données sol et le contexte actuel de l'Open Data ont renforcé le besoin de faciliter l'accès aux données produites dans le cadre du Gis Sol. Le site web du Gis Sol (disponible à l'adresse : www.gissol.fr) a été entièrement rénové en 2015 et a permis d'enrichir l'offre en ligne d'informations sur les sols de France, avec :

- la possibilité de télécharger certains jeux de données ;
- une offre de services web permettant d'intégrer les données dans des systèmes d'information géographique (SIG) ou des infrastructures de données spatialisées ;
- un enrichissement des métadonnées qui alimentent l'outil Refersols (disponible à l'adresse : www.gissol.fr/outils/refersols-340), qui permet l'identification des études pédologiques existantes au niveau national ;
- la refonte de l'outil Geosol (disponible à l'adresse : www.gissol.fr/outils/bdat-346), qui permet la réalisation et l'export selon différents formats de cartes personnalisées de propriétés de sols obtenues à partir de la BDAT.

Par ailleurs, le RMT Sols et Territoires (encadré 2.4) a développé ces dernières années :

- la base de données Applicasol [GIR 17] (disponible à l'adresse : www.gissol.fr/outils/applicasol-342), qui favorise la lisibilité et le partage des cartographies thématiques réalisées à partir de données Sol, ainsi que les méthodes associées ;
- l'application Websol [VIN 13] qui permet la consultation et l'interrogation en ligne des bases de données d'inventaires de sols.

Les Réseaux mixtes technologiques (RMT)

Les RMT sont des dispositifs mis en place en 2006 par le ministère en charge de l'agriculture dans l'objectif de créer une dynamique nouvelle d'innovation dans les domaines de l'agriculture, de l'alimentation et de la forêt. Il s'agit de favoriser, en soutenant financièrement leur mise en réseau, des collaborations thématiques entre acteurs de la recherche, de la formation et du développement agricole.

Émergence du RMT Sols et Territoires

Créé en 2010, le Réseau mixte technologique sols et territoires (RMT S&T) compte aujourd'hui 11 partenaires fondateurs et 24 partenaires associés. Il structure ses actions, en complémentarité de celles du Gis Sol, autour de deux enjeux :

- connaître les sols et donner accès à la connaissance des sols dans les territoires ;
- mieux faire prendre en compte les sols dans différentes politiques, projets et programmes d'action agricoles, environnementaux et ruraux.

Leur mise en œuvre repose sur les 5 axes de travail de la figure 2.5.

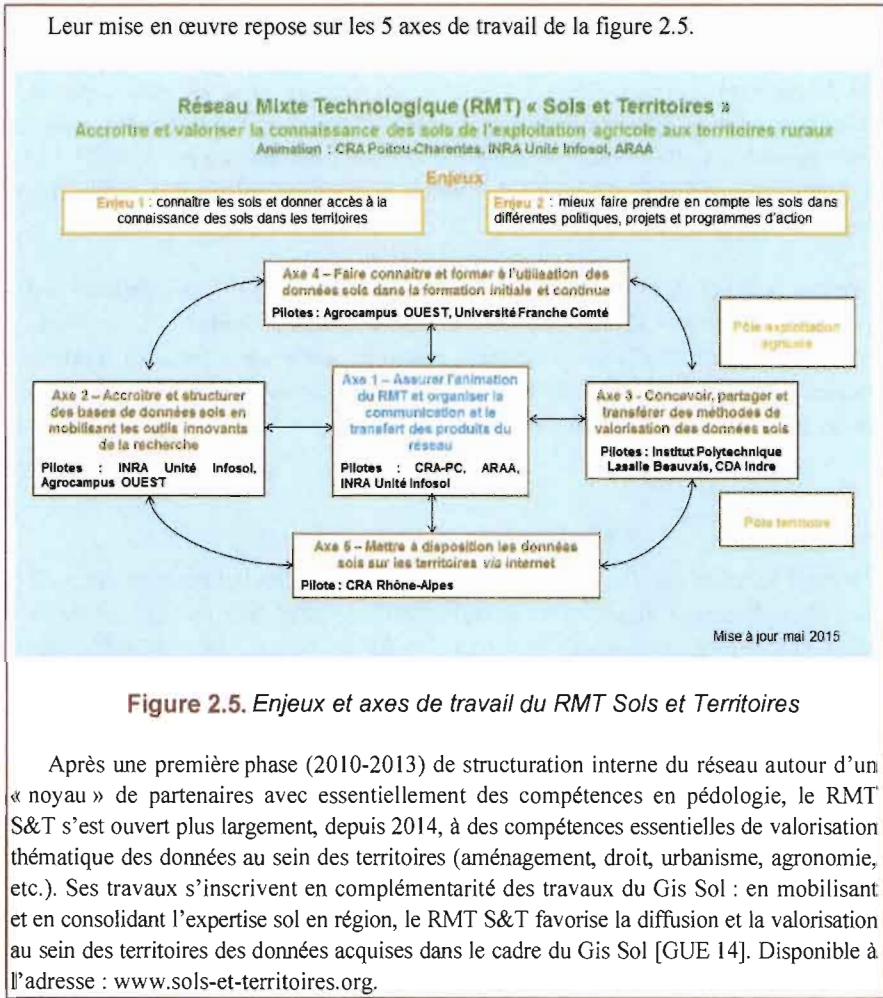


Figure 2.5. Enjeux et axes de travail du RMT Sols et Territoires

Après une première phase (2010-2013) de structuration interne du réseau autour d'un « noyau » de partenaires avec essentiellement des compétences en pédologie, le RMT S&T s'est ouvert plus largement, depuis 2014, à des compétences essentielles de valorisation thématique des données au sein des territoires (aménagement, droit, urbanisme, agronomie, etc.). Ses travaux s'inscrivent en complémentarité des travaux du Gis Sol : en mobilisant et en consolidant l'expertise sol en région, le RMT S&T favorise la diffusion et la valorisation au sein des territoires des données acquises dans le cadre du Gis Sol [GUE 14]. Disponible à l'adresse : www.sols-et-territoires.org.

Encadré 2.4. Le Réseau mixte technologique sols et territoires (source : M. Bardy)

2.5.3. Accompagner la prise en main des données

Le Gis Sol et le RMT Sols et Territoires mènent des actions complémentaires pour favoriser la prise en main des données Sols par un public large. La sensibilisation dès les parcours d'enseignement en formation initiale, continue, et l'accompagnement des utilisateurs sont en effet des éléments clés pour une bonne appropriation des données, et pour la qualité des utilisations qui en seront faites.

Outre la numérisation des données et leur diffusion dans des formats adaptés à leur réalisation, le Gis Sol propose des sessions de formation à l'utilisation de la base de données nationale DoneSol, d'une part pour sa prise en main générale et d'autre part pour la réalisation de cartographies thématiques (exemple réserve utile en eau des sols). Celle-ci est complétée par la mise à disposition par le RMT Sols et Territoires d'un guide d'utilisation des bases de données sol pour la production de cartes thématiques [LEM 17].

Enfin, le RMT Sols et Territoires a accompagné en 2017 la publication d'un manuel pédagogique intitulé « Les cartes et les données pédologiques, des outils au service des territoires » [DUC 17] visant à fournir aux enseignants des supports de formation pour familiariser les étudiants aux bases de données sol et à leurs utilisations dans un grand nombre de thématiques.

2.6. Conclusion

Malgré le retard qu'elle accusait à la fin des années 1990, la France est aujourd'hui dotée d'un dispositif d'inventaire et de surveillance des sols reconnu et envié au niveau international. Grâce à la mise en place du Gis Sol, et à la mobilisation de ses partenaires au sein de ses différents programmes nationaux, un premier état des lieux sur la qualité des sols de France métropolitaine et d'outre-mer a pu être réalisé. Les données disponibles au niveau national s'enrichissent progressivement, en cohérence avec les dynamiques internationales.

Au-delà de ce diagnostic national, l'amélioration et le maintien de la qualité des sols reposent sur la gestion locale par les acteurs concernés. À ce titre, les opérations régionales d'inventaire cartographique des sols en voie d'achèvement, ainsi que les actions du RMT Sols et Territoires, devraient constituer des outils précieux d'aide à la décision pour une gestion des sols garantissant le maintien de leurs services écosystémiques.

Une perspective d'évolution du dispositif portera sur les programmes d'inventaires des sols, qui utiliseront de plus en plus des méthodes de cartographie numérique. Basées sur des modèles de prédiction spatialisée, incluant des informations de diverses natures (paysage, agriculture, relief, etc.). Ces méthodes permettent d'associer aux valeurs prédites une incertitude, qui diminuera au fur et à mesure que les bases de données s'enrichiront. À un processus très normé d'acquisition de la donnée Sol, succédera certainement un processus d'acquisition progressif et varié, selon les enjeux des territoires.

2.7. Bibliographie

- [ADE 13] ADEME, Carbone organique des sols : l'énergie de l'agro-écologie, une solution pour le climat, Rapport, 2014.
- [AFN 07] AFNOR, Norme NF X31-560 : Qualité des sols – Cartographie des sols appliquée à toutes les échelles – Acquisition et gestion informatique de données pédologiques en vue de leur utilisation en cartographie des sols, 2007.
- [ARR 98] ARROUAYS D., VOGEL H., ECKELMANN W., *et al.*, « Soil monitoring networks in Europe », *16th World Congress of Soil Science*, Montpellier, France, 1998.
- [ARR 06] ARROUAYS D., SABY N., WALTER C., *et al.*, « Relationships between particle-size distribution and organic carbon in French arable topsoils », *Soil Use and Management*, n° 22, p. 48-51, 2006.
- [ARR 14] ARROUAYS D., GRUNDY M.G., HARTEMINK A.E., *et al.*, « GlobalSoilMap: towards a fine-resolution global grid of soil properties », *Advances in Agronomy*, n° 125, p. 93-134, 2014.
- [BAT 96] BATJES N.H., « Total carbon and nitrogen in the soils of the World », *European Journal of Soil Science*, n° 4, p. 151-163, 1996.
- [BOR 97] BORNAND M., Connaissance et suivi de la qualité des sols en France : état des lieux, enjeux, besoin en données, proposition pour une gestion raisonnée de la ressource en sol, Rapport d'expertise du ministère de l'Agriculture, du ministère de l'Environnement et de l'Inra, Montpellier, 1997.
- [CIA 14] CIAMPALINI R., MARTIN M., SABY N., *et al.*, « Soil texture GlobalSoilMap products for the French region "Centre" », dans D. ARROUAYS, N. MCKENZIE, J. HEMPEL, *et al.* (DIR.), *GlobalSoilMap: Basis of the global spatial soil information system*, CRC Press, Boca Raton, 2014.
- [COM 02] COMMISSION EUROPÉENNE, Communication de la Commission au Conseil, au Parlement européen, Comité économique et social européen et au Comité des régions – Vers une stratégie thématique en faveur de la protection des sols, 2002.
- [DUC 17] DUCOMMUN C., LUCOT E., *Les cartes et les données pédologiques : des outils au service des territoires*, Éditions Educagri, Dijon, 2017.
- [DUP 15] DUPUITS E., JAMEUX M., BROSSARD M., « Programme régional Inventaire gestion et conservation des sols. Référentiel régional pédologique : ROM – Guadeloupe, Guyane, Île de la Réunion. Synthèses morphopédologiques », Rapport final de convention MAAF – DGPAAT, p. 171, 2015.
- [EGL 14] EGLIN T., MARTIN M., MAURICE D., *et al.*, « Mobiliser et valoriser les données sur les sols forestiers. Compte rendu de l'atelier 4 », *Revue forestière française*, n° 4, p. 559-571, 2014.

- [EIV 16] EVEILLARD P., SABY N., GOUNY L., *et al.*, « Effect on soil nutrient status of input/output balances for phosphate and potassium in France », *International Fertiliser Society Agronomic Conference*, Cambridge, Royaume-Uni, 2016.
- [FAO 90] FAO-UNESCO-ISRIC, FAO-UNESCO-ISRIC Soil Map of the World: revised legend, Rapport n° 60, Rome, 1990.
- [FAO 15] FAO, ITPS, Status of the World's Soil Resources (SWSR) – Main Report, rapport, Food and Agriculture Organization of the United Nations and Intergovernmental Technical Panel on Soils, Rome, 2015.
- [FOL 09] FOLLAIN S., SCHVARTZ C., DENOROY P., *et al.*, « A method for assessing available phosphorus content in arable topsoils over large spatial scales », *Agronomy for Sustainable Development*, n° 29, p. 371-379, 2009.
- [GIR 17] GIROT G., MILLET F., SCHNEBELEN N., *et al.*, « Applicasol, un outil de partage des applications thématiques sur les sols », *Étude et Gestion des Sols*, n° 24, p. 33-43, 2017.
- [GIS 11] GIS SOL, L'état des sols de France, Groupement d'intérêt scientifique sur les sols, Paris, 2011.
- [GUE 14] GUELLIER C., BARDY M., ANDRIANARISOA S., *et al.*, « Le Réseau Mixte Technologique Sols et Territoires : développer la connaissance des sols dans les territoires. Principes, bilan et perspectives », *Étude et Gestion des Sols*, n° 21, p. 113-124, 2014.
- [HAR 08] HARTEMINK A.E., « Soil map density and a nation's wealth and income », dans A.E. HARTEMINK, A.B. MCBRATNEY, L. MENDOCA (DIR.), *Digital soil mapping with limited data*, Springer, Dordrecht, 2008.
- [INR 05] INRA - US 1106 INFO SOL, *Référentiel Régional Pédologique : Cahier des clauses techniques générales*, 2005.
- [INR 13] INRA - US 1106 INFO SOL, *DoneSol version 3.4.3, Dictionnaire de données*, version du 1^{er} mai 2014, Gis Sol, 2013.
- [JOI 16] JOIMEL S., CORTET J., JOLIVET C.C., *et al.*, « Physico-chemical characteristics of topsoil for contrasted forest, agricultural, urban and industrial land uses in France », *Science of the Total Environment*, n° 545, p. 40-47, 2016.
- [KEL 12] KELLER C., LAMBERT-HABIB M.L., ROBERT S., *et al.*, « Méthodologie pour la prise en compte des sols dans les documents d'urbanisme : application à deux communes du bassin minier de Provence », *Sud-Ouest européen*, n° 33, p. 11-24, 2012.
- [KIN 95] KING D., BURILL A., DAROUSSIN J., *et al.*, « The EU soil geographical database », dans D. KING, R.J.A. JONES, A.J. THOMASSON (DIR.), *European Land Information Systems for Agro-environmental Monitoring*, Commission européenne, Luxembourg, 1995.

- [LAC 16] LACOSTE M., MULDER V.L., RICHER-DE-FORGES A., *et al.*, « Evaluating large-extent spatial modelling approaches: a case study for soil depth for France », *Geoderma Regional*, n° 7, p. 137-152, 2016.
- [LAR 14] LAROCHE B., RICHER-DE-FORGES A., LEMENAGER S., *et al.*, « Le programme inventaire Gestion et conservation des sols de France : volet Référentiel régional pédologique », *Étude et Gestion des Sols*, n° 21, p. 125-140, 2014.
- [LEB 06] LE BAS C., SCHNEBELEN N., « Utilisation des données sols d'I.G.C.S. en France. État des lieux en 2006 », *Étude et Gestion des Sols*, vol. 13, p. 237-246, 2006.
- [LEM 08] LEMERCIER B., GAUDIN L., WALTER C., *et al.*, « Soil phosphorus monitoring at the regional level by means of a soil test database », *Soil Use and Management*, vol. 24, p. 131-138, 2008.
- [LEM 12] LEMERCIER B., LACOSTE M., LOUM M., *et al.*, « Extrapolation at regional scale of local soil knowledge using boosted classification trees: a two-step approach », *Geoderma*, vol. 171-172, p. 75-84, 2012.
- [LEM 17] LEMERCIER B., LAROCHE B., ARMAND R., *et al.*, Guide d'utilisation des bases de données sol pour la production de cartes thématiques, rédigé par INRA-unité InfoSol, 2017.
- [MAR 11] MARTIN M., WATTENBACH M., SMITH P., *et al.*, « Spatial distribution of soil organic carbon stocks in France », *Biogeosciences*, n° 8, p. 1053-1065, 2011.
- [MEE 12] MEERSMANS J., MARTIN M., LACARCE E., *et al.*, « A high resolution map of french soil organic carbon », *Agronomy for Sustainable Development*, n° 32, p. 841-851, 2012.
- [MOR 08] MORVAN X.P.P., SABY N.P.A., ARROUAYS D., *et al.*, « Soil monitoring in Europe: a review of existing systems and requirements for harmonization », *Science of the total Environment*, n° 391, p. 1-12, 2008.
- [MUL 16a] MULDER V.L., LACOSTE M., RICHER-DE-FORGES A., *et al.*, « National versus global modelling the 3D distribution of soil organic carbon in mainland France », *Geoderma*, n° 263, p. 13-34, 2016.
- [MUL 16b] MULDER V.L., LACOSTE M., RICHER-DE-FORGES A., *et al.*, « GlobalSoilMap France: high-resolution spatial modelling the soils of France up to two meter depth », *Science of the Total Environment*, vol. 573, 2016.
- [PAN 12] PANAGOS P., VAN LIEDEKERKE M., JONES A., *et al.*, « European Soil Data Centre: Response to European policy support and public data requirements », *Land Use Policy* 2012, n° 29, p. 329-338, 2012.

- [RAN 13] RANJARD L., DEQUIEDT S., CHEMIDLIN PRÉVOST-BOURÉ N., *et al.*, « Turnover of bacterial diversity is driven by wide-scale environmental heterogeneity », *Nature Communications* 4, 2013.
- [RAT 10] RATIÉ C., RICHER-DE-FORGES A., BERCHE P., *et al.*, « Le Conservatoire des Sols : la mémoire des sols de France », *Étude et gestion des sols*, n° 17, p. 263-273, 2010.
- [RIC 03] RICHER-DE-FORGES A., Carte des sols de Patay au 1/50 000, Chambre d'agriculture du Loiret, Orléans, 2003.
- [RIC 12] RICHER-DE-FORGES A., ARROUAYS D., HELIES F., *et al.*, « Quelles demandes sur les sols reçoit-on aujourd'hui au niveau d'un pays comme la France ? », *Étude et Gestion des Sols*, n° 19, p. 119-128, 2012.
- [RIC 14] RICHER-DE-FORGES A., BAFFET M., BERGER C., *et al.*, « La cartographie des sols à moyennes échelles en France métropolitaine », *Étude et gestion des sols*, n° 21, p. 25-36, 2014.
- [SAB 06] SABY N., ARROUAYS D., BOULONNE L., *et al.*, « Geostatistical assessment of Pb in soil around Paris, France », *Science of the Total Environment*, n° 367, p. 212-221, 2006.
- [SAB 08] SABY N., ARROUAYS D., ANTONI V., *et al.*, « Changes in soil organic carbon in a mountainous French region, 1990-2004 », *Soil Use and Management*, n° 24, p. 254-262, 2008.
- [SAB 11] SABY N., MARCHANT B., LARK R., *et al.*, « Robust geostatistical prediction of trace elements across France », *Geoderma*, n° 162, p. 303-311, 2011.
- [SAB 14a] SABY N.P.A., LEMERCIER B., ARROUAYS D., *et al.*, « Le programme Base de données d'analyses de terre. Bilan de 20 ans de collecte de résultats d'analyses », *Étude et Gestion des Sols*, n° 21, p. 141-150, 2014.
- [SAB 14b] SABY N., ARROUAYS D., JOLIVET C., *et al.*, « National soil information and potential for delivering GlobalSoilMap products », dans D. ARROUAYS, N. MCKENZIE, J. HEMPEL, *et al.* (DIR.), *GlobalSoilMap: Basis of the global spatial soil information system*, CRC Press, Boca Raton, 2014.
- [SOE 15] SOES, « Sols et environnement – Chiffres clés, édition 2015 », *Repères*, disponible à l'adresse : http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/fileadmin/documents/Produits_editoriaux/Publications/Reperes/2015/reperes-chiffres-cles-sols-edition-2015.pdf, 2015.
- [TET 15] TETEGAN M., RICHER-DE-FORGES A., VERBÈQUE B., *et al.*, « The effect of soil stoniness on the estimation of water retention properties of soils: A case study from central France », *Catena*, n° 129, p. 95-120, 2015.
- [TOS 14] TOSSER V., EGLIN T., BARDY M., *et al.*, « Évaluation des stocks de carbone organique des sols cultivés de France. Application de la méthodologie Tier 1 du groupe d'experts Intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) aux sites du Réseau de mesure de la qualité des sols (RMQS) », *Étude et Gestion des Sols*, n° 21, p. 7-24, 2014.

- [VAY 15] VAYSSE K., LAGACHERIE P., « Evaluating digital soil mapping approaches for mapping GlobalSoilMap soil properties from legacy data in Languedoc-Roussillon (France) », *Geoderma Regional*, n° 4, p. 20-30, 2015.
- [VIL 13] VILLANNEAU E., SABY N., ORTON T., *et al.*, « First evidence of large-scale PAH trends in French soils », *Environmental Chemistry Letters*, n° 11, p. 99-104, 2013.
- [VIN 13] VINATIER J.-M., CHAFCHAFI A., BARJEOT L., *et al.*, « Websol : une plateforme Internet de diffusion des données pédologiques », *Étude et gestion des sols*, n° 20, p. 7-18, 2013.

Bardy M., Arrouays D., Jolivet C., Laroche B., Le Bas C., Martin M., Ratié C., Richerde-Forges A., Saby N., Antoni V., Bispo A., Brossard Michel, Fort J.L., Sauter J., Gascuel C.

Connaître les sols pour mieux les gérer : un système d'information national sur les sols, 1.

In Berthelin J. (ed.), Valentin Christian (ed.), Munch J.C. (ed.). Les sols au coeur de la zone critique 1 : fonctions et services.

Londres (GBR) : ISTE, 2018, p. 51-73.

(Système Terre - Environnement : Série Les Sols), 1. ISBN 978-1-78405-380-2