



Synthèse sur l'état des sols de France

. Gis Sol

► To cite this version:

. Gis Sol. Synthèse sur l'état des sols de France. Groupement d'Intérêt Scientifique sur les Sols, 2011, 978-2-7380-1296-8. hal-01173740

HAL Id: hal-01173740

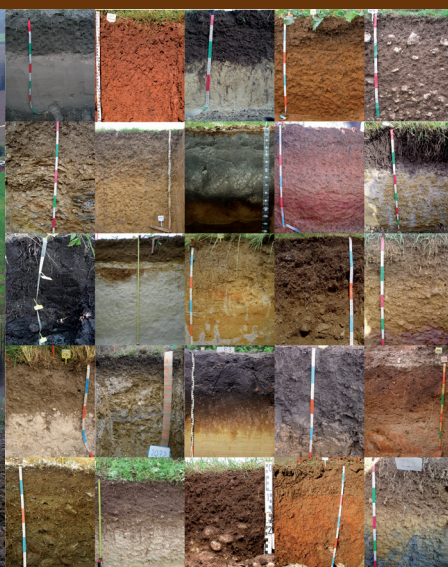
<https://hal.science/hal-01173740>

Submitted on 29 Jun 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Synthèse sur l'état des sols de France



LES SERVICES RENDUS PAR LES SOLS

LES PRESSIONS SUBIES PAR LES SOLS

LE DIAGNOSTIC SUR L'ÉTAT DES SOLS DE FRANCE

Groupement
d'intérêt
scientifique



Liste des auteurs et contributeurs

Coordination

Véronique Antoni, Dominique Arrouays, Antonio Bispo, Michel Brossard, Christine Le Bas, Pierre Stengel, Estelle Villanneau

Liste des auteurs et contributeurs

Véronique Antoni , MEDDTL-CGDD-SOeS	Claudy Jolivet , Inra
Dominique Arrouays , Inra	Bertrand Laroche , Inra
Denis Baize , Inra	Christine Le Bas , Inra
Enrique Barriuso , Inra	Hervé Le Martret , IRD
Antonio Bispo , Ademe	Sébastien Lehmann , Inra
Yves Blanca , IRD	Blandine Lemerrier , Agrocampus-Ouest
Line Boulonne , Inra	Stéphanie Lucas , IFN
Olivier Briand , Anses	Jean-Philippe Malet , CNRS
Michel Brossard , IRD	Manuel Martin , Inra
Yves-Marie Cabidoche , Inra	Raia Silvia Massad , Inra
Giovanni Caria , Inra	Jean-Claude Miskovsky , CNRS, GéoPré
Philippe Chéry , Enitab	Joël Moulin , Chambre d'Agric. de l'Indre
Daniel Cluzeau , Université Rennes 1	Valéry Morard , MEDDTL-CGDD-SOeS
Isabelle Cousin , Inra	Sylvie Nazaret , CNRS-Université Lyon
Alain Couturier , Inra	Catherine Pasquier , Inra
Thibaud Decaëns , Université Rouen	Guénola Péres , Université Rennes 1
Pascal Denoroy , Inra	Jean-Luc Perrin , MEDDTL-DGPR-SRT
Samuel Dequiedt , Inra	Patrick Perrin , CTMNC
Nathalie Derrière , IFN	Lionel Ranjard , Inra
Sacha Desbourdes , Inra	Guy Richard , Inra
Élodie Dupuits , IRD	Anne Richer de Forges , Inra
Jean-Claude Fardeau , retraité	Jean Roger-Estrade , AgroParisTech
Isabelle Feix , Ademe	Nicolas Saby , Inra
Benoît Gabrielle , AgroParisTech	Joëlle Sauter , ARAA
Catherine Gibaud , MAAPRAT	Nathalie Schnebelen , Inra
Muriel Guernion , Université Rennes 1	Pierre Stengel , Inra
Alain Hartmann , Inra	Marie-Agnès Vibert , MAAPRAT
Catherine Hénault , Inra	Estelle Villanneau , Inra
Marcel Jamagne , retraité	Christian Walter , Agrocampus-Ouest

Conception graphique : Sacha Desbourdes et Pascale Inzerillo (Inra)

Mise en page et préresse :  CHROMATIQUES ÉDITIONS

Impression : Bialec (Nancy)



Comment citer cet ouvrage :

Gis Sol. 2011. *Synthèse sur l'état des sols de France. Groupement d'intérêt scientifique sur les sols*, 24 p.

Cette synthèse est issue d'un ouvrage édité par le Groupement d'intérêt scientifique sur les sols :
Gis Sol. 2011. *L'état des sols de France. Groupement d'intérêt scientifique sur les sols*, 188 p.

Avant-propos

La création du Groupement d'intérêt scientifique sur les sols, le Gis Sol, en mars 2001, constituait un défi ambitieux. Il s'agissait de rattraper, en quelques années, le retard de la France dans la conduite des programmes d'inventaire et de surveillance de ses sols, afin de la doter d'un système d'information sur les sols de France et sur l'évolution de leurs qualités.

Après dix ans de travaux, fort de la volonté commune qui anime les ministères et les établissements publics qui le composent*, le Gis Sol présente des avancées significatives en matière de connaissance sur les sols. Il a souhaité mettre à la disposition d'un large public un ouvrage simple, accessible, synthétique, sur les sols français : fournir des clés de compréhension de leur extrême variabilité spatiale, dresser un état de l'art des connaissances actuelles de leur qualité et de leur évolution possible.

En 2011, les usages productifs du sol, ses fonctions environnementales et écologiques, son rôle dans l'aménagement et l'utilisation du territoire, constituent toujours un enjeu collectif pour le développement durable. De même, les processus de dégradation du sol, ressource non renouvelable à l'échelle de temps humaine, persistent. Ces constats sur les rôles des sols et l'évolution de cette ressource soulignent le besoin d'une politique de gestion durable des sols. Nous souhaitons que ce rapport sur *L'état des sols de France*, coordonné par l'Unité Infosol de l'Inra et bénéficiant des acquis des programmes suivis par le Gis Sol, devienne un outil de référence et contribue à l'émergence d'une telle stratégie.

** Le Groupement d'Intérêt Scientifique sur les Sols regroupe : le ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation, de la Pêche, de la Ruralité et de l'Aménagement du Territoire ; le ministère de l'Écologie, du Développement durable, des Transports et du Logement ; l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie ; l'Institut National de la Recherche Agronomique ; l'Institut de Recherche pour le Développement ; l'Inventaire Forestier National.*



Le micro-relief et la variabilité des sols sableux des Landes de Gascogne.

Introduction

Le sol est la couche superficielle des surfaces continentales, formée par l'altération de la roche sous-jacente sous l'action du climat et des organismes vivants. Son volume s'étend de la surface de la terre jusqu'à la roche altérée dont il se distingue par l'association intime de constituants minéraux et organiques, ainsi que par l'intensité de l'activité biologique, notamment celle des racines des végétaux. En France métropolitaine, son épaisseur est typiquement de l'ordre du mètre, alors qu'elle peut atteindre plusieurs dizaines de mètres en conditions tropicales. Sa formation résulte d'une évolution lente, dont la durée varie de plusieurs millénaires à plusieurs centaines de millénaires. Compte tenu de la durée nécessaire à sa formation, il constitue une ressource essentielle à préserver.

Les sols sont à la fois le produit et le support du développement de la végétation. Ils constituent un maillon central dans la régulation des grands cycles globaux tels que ceux de l'eau, du carbone ou de l'azote. Ils sont au cœur de grands enjeux planétaires comme la sécurité alimentaire, le changement climatique, la disponibilité en eau de qualité ou la biodiversité. Les épargner et les valoriser efficacement est une nécessité pour notre alimentation et pour limiter l'extension des surfaces cultivées sur des écosystèmes précieux pour leur biodiversité.

Les sols constituent donc une ressource naturelle. Cette ressource peut être utilisée durablement pour la production agricole ou forestière. Mais sa destruction est difficilement réversible et sa réhabilitation est très coûteuse. Les pressions qu'elle subit engendrent des processus de dégradation plus ou moins rapides. Ses usages et son devenir représentent donc un enjeu collectif pour le développement durable.

Pour les protéger et exploiter au mieux les sols, il est donc essentiel de disposer d'une connaissance objective de leur qualité. Cette notion de qualité des sols ne peut être évaluée ni dans l'absolu, ni par un critère unique. Elle ne peut s'apprécier que par rapport à leurs fonctions et aux services écosystémiques qui en sont attendus. Parmi ces services, la production d'aliments ou de matériaux est la plus évidente. Mais en tant qu'interface, interagissant avec les autres milieux environnementaux, les sols participent aussi à la régulation du régime de l'eau et de sa qualité, recyclent les matières organiques, peuvent accumuler du carbone et atténuer les émissions de CO₂ vers l'atmosphère et abritent un immense réservoir de biodiversité.

Les sols font partie intégrante de nos paysages, mais leur présence est le plus souvent occultée par les forêts, les cultures, les habitations ou les infrastructures qui les recouvrent. Étant masqués et souvent considérés comme un simple support, ils restent assez largement méconnus. À la différence de l'air que l'on respire ou de l'eau que l'on boit, l'impact d'une modification de leur qualité n'est pas directement perçu. Ainsi, les connaissances sur les sols ne font pas l'objet d'une large appropriation par les citoyens, les décideurs ou les aménageurs.

Ce constat de méconnaissance des sols et de besoin d'information sur les sols des acteurs de l'environnement a conduit à la création du Groupement d'Intérêt Scientifique sur les sols, le Gis Sol, en 2001. Après 10 ans de travaux, le Gis Sol a souhaité mettre à la disposition d'un large public un ouvrage portant sur l'état des sols de France. Rédigé comme un outil de référence, ce rapport dresse un bilan sur l'état des sols de France métropolitaine et des Outre-mer.

Cette synthèse résume les principales conclusions de ce rapport. Elle liste dans un premier temps les fonctions des sols, les services qu'ils rendent et les pressions qu'ils subissent. Puis elle dresse un état des lieux sur leur qualité, son évolution observée ou probable, ainsi que sur les incertitudes qui y sont associées.

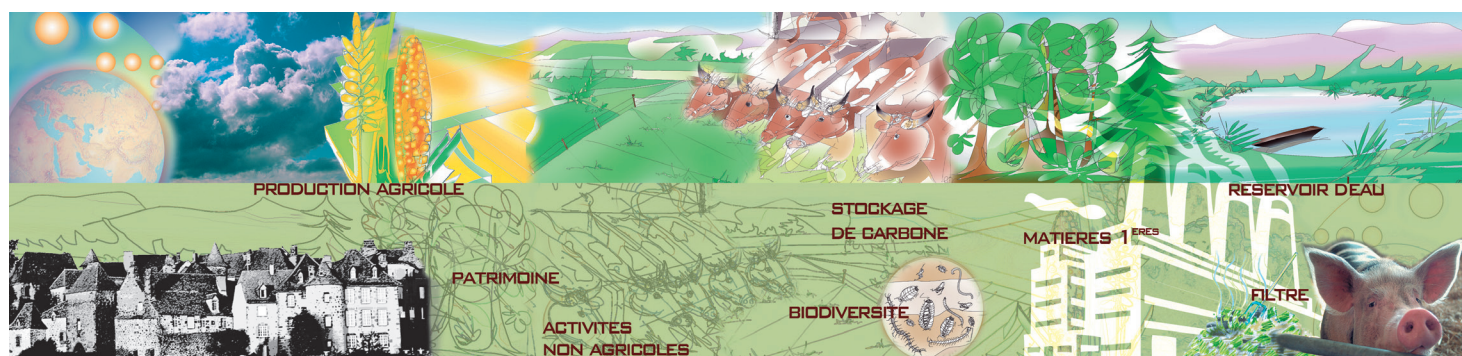
Les services rendus par les sols

Malgré les services écosystémiques qu'il rend, le sol reste assez méconnu. Ces services sont pourtant nombreux : support de production, support du paysage, source de matériaux, mémoire du passé, filtration et épuration, régulation des eaux et des cycles du carbone et de l'azote et réservoir de biodiversité. Les sols sont au cœur de grands enjeux planétaires comme la sécurité alimentaire, le changement climatique, la disponibilité en eau de qualité ou la biodiversité. Il est donc primordial de préserver leurs fonctions essentielles dans un contexte de préoccupations environnementales grandissant.

Le sol résulte de la pédogenèse, c'est-à-dire de l'altération des roches sous l'influence du climat, du relief et des activités biologiques et anthropiques. Parmi les

différentes composantes de l'environnement, le sol demeure le moins familier. Les services qu'il rend à l'Homme sont pourtant nombreux.

Les grandes fonctions du sol



© Pascale Inzerillo, Inra, d'après les dessins de Rolf Holtzmann

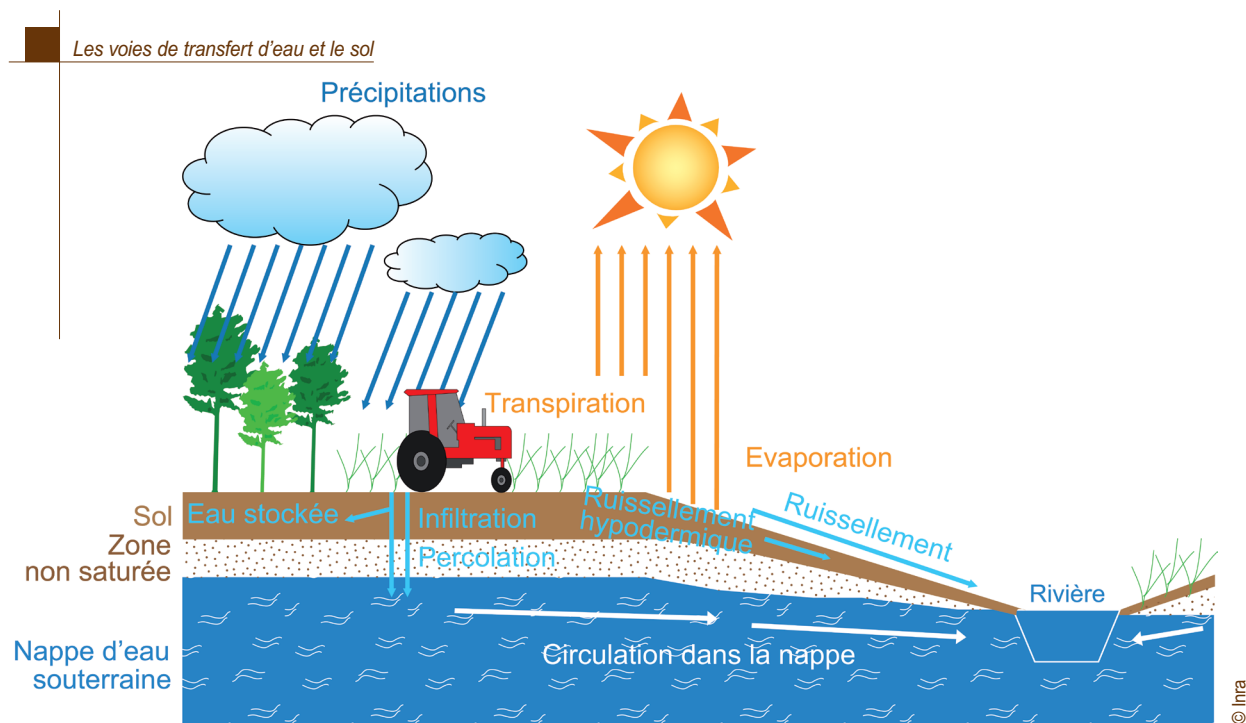
Le sol est le support des activités humaines et notamment de la production agricole et forestière. Il est le lieu de l'ancrage des systèmes racinaires des végétaux et constitue leur réservoir d'eau et d'éléments nutritifs. Il fournit ainsi les éléments indispensables à la production végétale pour nourrir les animaux et les hommes et produire des fibres, des matériaux et de l'énergie renouvelable.

Les éléments de nos paysages agricoles, forestiers et urbains prennent appui sur le sol. Il est le support du développement des infrastructures. Protection de notre patrimoine archéologique, le sol conserve la mémoire et l'empreinte des passages de l'Homme et des activités humaines au fil du temps.

À l'interface entre l'atmosphère et les aquifères, il filtre ou dégrade les polluants et autres substances apportés par les activités humaines : éléments traces (cadmium, mercure, plomb, etc.), polluants organiques persistants (hydrocarbures, pesticides, etc.), etc. Il abrite une biodiversité faunistique, floristique et microbienne remarquable par son abondance, dont une très grande partie est encore inconnue et représente donc un potentiel génétique et écologique considérable. Cette biodiversité est déjà la source de médicaments : actuellement, de nombreux antibiotiques présents sur le marché sont issus de bactéries du sol. Inversement, le sol peut constituer un réservoir de pathogènes, notamment pour les plantes mais aussi pour les animaux et pour l'Homme.

Siège d'une activité biologique intense, le sol permet le recyclage des déchets organiques (effluents d'élevage ou industriels, boues de stations d'épuration, composts divers, etc.). Il constitue un maillon central dans la régulation des grands cycles planétaires tels que ceux du carbone ou de l'azote, et assure ainsi des fonctions essentielles dans la régulation des gaz à effet de serre (dioxyde de carbone, méthane, protoxyde d'azote).

Enfin, le sol régule le régime des eaux superficielles et l'alimentation des eaux souterraines. Il détermine le partage entre ruissellement et infiltration des précipitations. Il joue un rôle de tampon vis-à-vis des écoulements hydrologiques, permettant ainsi, par exemple, d'amortir les phénomènes de crues ou de soutenir les débits des cours d'eau en période d'étiage.



Le sol est donc un système vivant complexe, en position d'interface et en constante interaction avec les autres milieux. Une meilleure connaissance des sols par les gestionnaires locaux est indispensable, afin de mieux les préserver en limitant les pressions qu'ils subissent (agriculture, contamination, etc.).

Cette connaissance est d'autant plus nécessaire que les sols sont caractérisés par une très grande

variabilité qui se manifeste à toutes les échelles et qu'ils assurent des services multiples dont certains peuvent se révéler antagonistes. Leur qualité ne peut donc pas se juger dans l'absolu et les mesures à prendre pour les protéger ou pour maintenir certaines de leurs fonctions dépendent à la fois des services qui en sont attendus et de leurs caractéristiques intrinsèques.



La variabilité des sols de France

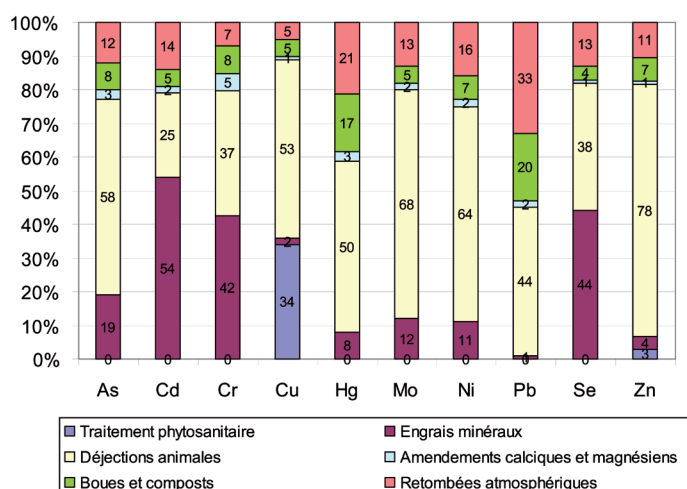
Les pressions subies par les sols

Les sols sont soumis à différentes pressions anthropiques qui peuvent influencer sur leur état, sur leurs fonctions et sur les échanges qu'ils réalisent avec d'autres milieux. Ils peuvent se dégrader très rapidement sous l'action des activités humaines. L'évolution démographique, les activités agricoles, industrielles et touristiques, ainsi que le changement climatique peuvent ainsi modifier le fonctionnement des sols et provoquer leur dégradation. Les sols sont l'objet de nombreux enjeux comme le développement des villes et des infrastructures, la production alimentaire ou énergétique, la valorisation des déchets, la lutte contre le changement climatique, la préservation de la qualité de l'eau et la protection de la biodiversité. Ces enjeux, à l'origine d'une compétition pour les sols, sont difficiles à concilier, car les différents services rendus par les sols ne sont pas tous compatibles.

L'ensemble des services rendus par les sols nécessite le maintien d'une surface et d'une épaisseur suffisantes. Ce maintien est menacé par diverses pressions naturelles ou anthropiques : artificialisation, érosion, extraction, etc. La consommation d'espace par la périurbanisation et la construction d'axes de transport s'effectue ainsi au détriment de sols naturels et de sols cultivés, qui perdent ainsi leurs fonctions d'épuration des eaux, de support de biodiversité et de production de biomasse. Des indicateurs de perte en sol sont nécessaires pour juger au mieux de leur importance et des moyens de lutte à y consacrer (érosion) ou pour gérer au mieux le choix des sols qui sont affectés par ces pressions (artificialisation, extraction).

En position d'interface dans l'environnement, les sols sont susceptibles de recevoir ou d'émettre un certain nombre de contaminants préjudiciables à la santé humaine, *via* leur ingestion directe, ou leur transfert dans les eaux, les plantes et la chaîne alimentaire. Ces contaminants peuvent se transmettre dans l'ensemble des écosystèmes. La valorisation des déjections animales et l'apport de certains engrais ou produits de traitement phytosanitaires, l'épandage des déchets comme les boues de stations d'épuration et les composts urbains, ainsi que les retombées atmosphériques peuvent constituer des sources de contamination diffuse des sols et notamment en éléments traces métalliques (ETM).

La part des différentes sources contribuant aux apports d'ETM sur les sols agricoles en France métropolitaine



Source : Sogreah-Ademe, 2007.

Ainsi, les activités humaines sont parfois à l'origine d'une contamination diffuse des sols ou de pollutions ponctuelles par des éléments traces métalliques, des polluants organiques persistants ou des microorganismes pathogènes. Pour certains contaminants, les retombées atmosphériques d'aérosols d'origine anthropique (activités industrielles, circulation automobile, incinération d'ordures ménagères) s'ajoutent aux retombées d'origine naturelle (éruption volcanique, feux de forêts).

L'intensification de l'agriculture et certaines pratiques culturales peuvent favoriser les dégradations physiques des sols que sont l'érosion et le tassement. Elles participent à la baisse de la biodiversité et à la diminution de la matière organique des sols. Elles peuvent aussi provoquer l'émission de gaz à effet de serre par les sols. La mécanisation de la gestion des forêts peut également générer du tassement.

Enfin, le changement climatique, accéléré par les activités humaines, pourrait intensifier plusieurs phénomènes d'évolution et de dégradation des sols. L'accroissement des phénomènes pluviométriques extrêmes est susceptible d'accélérer les pertes en sol et la probabilité d'occurrences de coulées d'eau boueuse. Des pluies hivernales plus abondantes pourraient également augmenter l'importance des conditions d'engorgement dans les sols. Cela pourrait affecter les essences forestières sensibles à ces conditions et certaines espèces cultivées. Cela pourrait également rendre plus difficiles certaines interventions culturales et aggraver leurs effets négatifs sur la structure du sol. Le changement climatique pourrait aussi dans certains cas précipiter le déstockage de carbone organique, en accélérant la vitesse de minéralisation des matières organiques des sols de montagne ou des sols tourbeux des zones humides. Une modification

des régimes hydriques pourrait influencer à plus long terme certains processus de la pédogenèse. Dans les situations où ces processus sont rapides et sous une dépendance climatique forte (comme par exemple dans les Antilles), les propriétés des sols pourraient évoluer rapidement.

Des sécheresses plus fréquentes et intenses pourraient augmenter les risques d'incendie de forêt et altérer les cycles des éléments minéraux et du carbone organique, ainsi que la biodiversité des sols. Elles affecteraient aussi la dynamique de la structure du sol en favorisant la fissuration profonde, particulièrement dans les sols argileux. Dans ces conditions, il est probable que des phénomènes de transferts verticaux rapides d'eau et de solutés *via* des flux préférentiels soient plus fréquents et, en conséquence, les risques de contamination des eaux souterraines plus élevés.

Une fréquence plus élevée des tempêtes pourrait perturber profondément la structuration verticale en horizons des sols forestiers à cause des chablis (c'est déjà le cas pour une grande partie des sols des Landes de Gascogne), accélérer la minéralisation de leur matière organique et favoriser les tassements liés aux passages d'engins pour le débardage.

La plupart des effets directs attendus du changement climatique sur les sols restent cependant très inférieurs aux effets liés aux actions volontaires de l'Homme. On ne peut cependant négliger les risques qui leur sont associés, en particulier du fait des interactions entre ces deux catégories de facteurs. Certaines évolutions lentes pourraient amener à franchir des seuils de fonctionnement des sols et certains événements extrêmes sont susceptibles de les y aider, comme, par exemple, des incendies de forêt répétés.

Le diagnostic sur l'état des sols de France

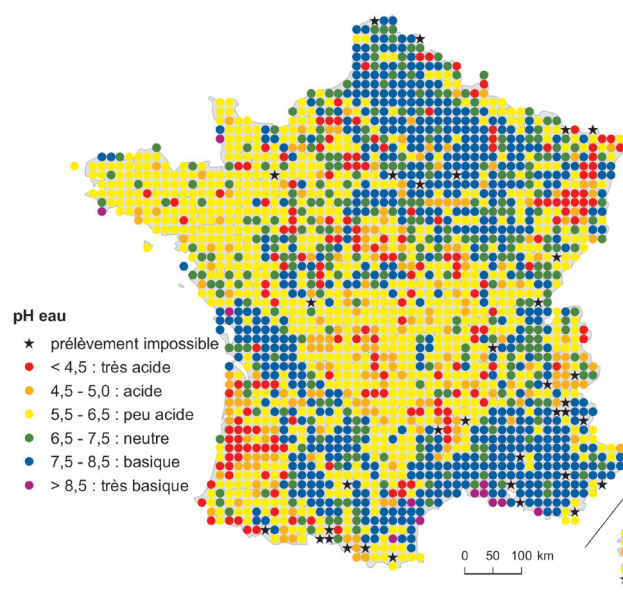
La qualité d'un sol ne se juge pas dans l'absolu. Cette notion peut être appréhendée au travers de ses fonctions, des services écosystémiques qu'il rend et de leur durabilité. Certains de ces services peuvent se révéler antagonistes. C'est donc au travers de l'usage des sols, et des fonctions que les décideurs et les gestionnaires cherchent à favoriser ou à maintenir, que les indicateurs décrivant cette qualité sont définis ici.

Les sols constituent le support de la production végétale. Leurs caractéristiques conditionnent l'enracinement des plantes et leur alimentation en eau et en éléments minéraux. Pour remplir cette fonction, les sols doivent posséder des propriétés et des états physiques permettant le stockage et l'infiltration de l'eau, l'aération et la croissance racinaire. La qualité de la structure des sols conditionne celle de l'enracinement et de l'aération. **De grandes incertitudes subsistent sur l'état de tassement des sols agricoles et forestiers et sur l'évolution de leur structure à long terme. De même, l'évolution des teneurs en matières organiques des sols sensibles à la dégradation structurale reste incertaine.** La variabilité des propriétés de rétention en eau des sols constitue *a priori* un outil intéressant pour gérer au mieux la ressource en eau en agriculture et pour l'adaptation au changement climatique.

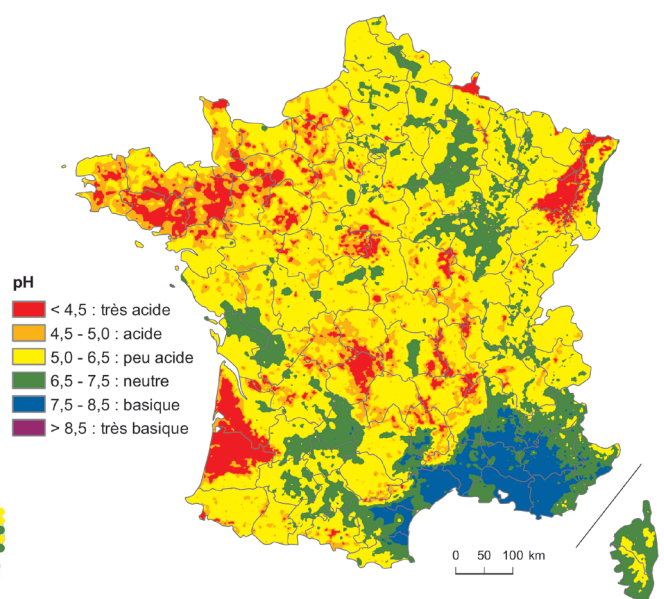
Ce dernier point est particulièrement important pour la production forestière dont la gestion doit se penser à très long terme.

L'état des réserves minérales dans les sols est un bon indicateur de leur aptitude à fournir les minéraux nécessaires à la croissance et au développement des plantes. Il traduit la capacité des sols à soutenir une forte productivité végétale, tout en minimisant les apports externes. **Les sols agricoles ne présentent pas d'évolution mesurable de leur acidité.** Leurs pH sont restés stables durant les 15 dernières années. L'acidification des sols agricoles semble donc être gérée efficacement à l'échelle nationale, ce processus étant contrebalancé par l'apport d'amendements minéraux dans les sols non carbonatés.

Le pH des horizons de surface des sols de France métropolitaine des sites du Réseau de Mesures de la Qualité des Sols (mesuré) et celui des sols forestiers (prédit par la végétation)



Source : Gis Sol, RMQS, 2011.



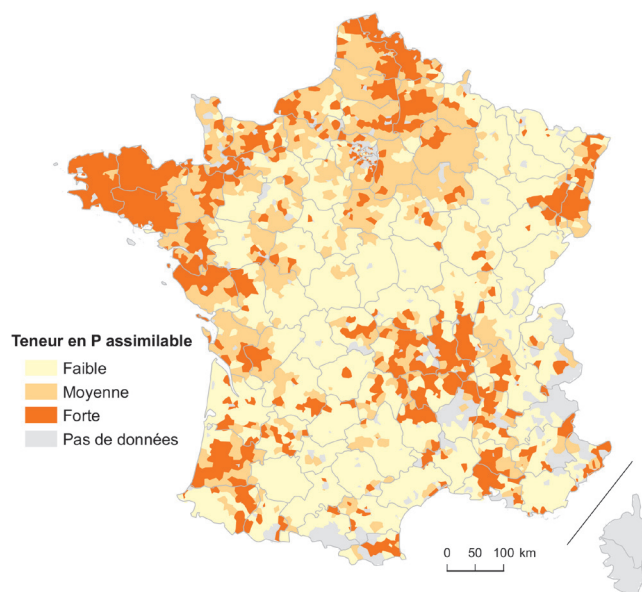
Source : © accord AgroParisTech-Engref (UMR LERFOB) - IFN n°2007-CPA-2-072.

En milieu naturel et forestier, l'acidification à long terme reste incertaine, comme d'ailleurs l'évolution de la plupart des paramètres de fertilité chimique des sols de ces milieux. La perspective d'une augmentation possible des prélèvements de biomasse en forêt (bois morts, rémanents, exportation des branches, etc.) pose par ailleurs la question du maintien d'un bilan suffisant en éléments nutritifs dans ces sols.

Les sols agricoles ne montrent pas de baisse mesurable de leurs teneurs en potassium, malgré une diminution importante des apports minéraux externes. Il faut y voir les effets des progrès en matière de gestion de la fertilisation minérale et organique, ainsi qu'une fourniture naturelle par l'altération des

minéraux non négligeable dans certains sols. À long terme, la question d'une éventuelle baisse de la fertilité potassique reste cependant posée. Enfin, **de nombreux sols présentent des teneurs en phosphore relativement faibles**. La forte diminution des apports d'engrais phosphatés minéraux pose la question de la compatibilité à moyen terme de la fertilité des sols agricoles en cet élément, avec les pratiques agricoles actuelles. Inversement, l'augmentation des teneurs en phosphore des sols en situation d'excédent structurel, dans les régions d'élevage concentré, reste très préoccupante en raison de son impact sur la qualité des eaux et sur l'eutrophisation des milieux.

Les teneurs en phosphore assimilable des horizons de surface des sols agricoles de France par canton

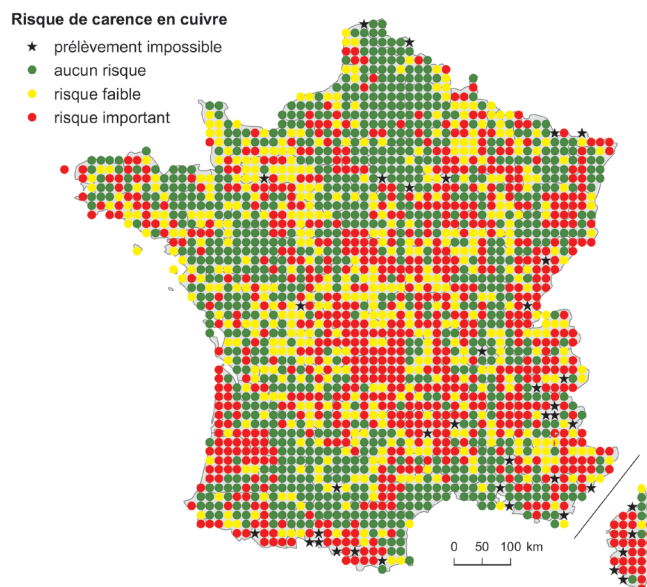


Source : Gis Sol, BDAT, 2011 ; IGN, Geofla®, 2006. Follain *et al.*, 2009.

Note : Les teneurs élevées en Bretagne sont liées aux excédents structurels. Celles du Nord et de l'Est correspondent à d'anciens apports de résidus miniers.

La juxtaposition de situations d'excédents et d'insuffisances potentielles, dans le contexte de raréfaction à long terme de la ressource en phosphore minéral, soulève la question d'une meilleure valorisation des effluents d'élevage pour corriger les unes et les autres.

De nombreuses situations semblent incompatibles, pour certains oligo-éléments (bore, cuivre, etc.), avec des cultures exigeantes. Ceci n'est pas étonnant, dans la mesure où la pratique de bilans en ces éléments est beaucoup plus récente, et beaucoup moins répandue que pour les trois éléments majeurs que sont l'azote, le phosphore et le potassium.



Source : Gis Sol, RMQS, 2011.

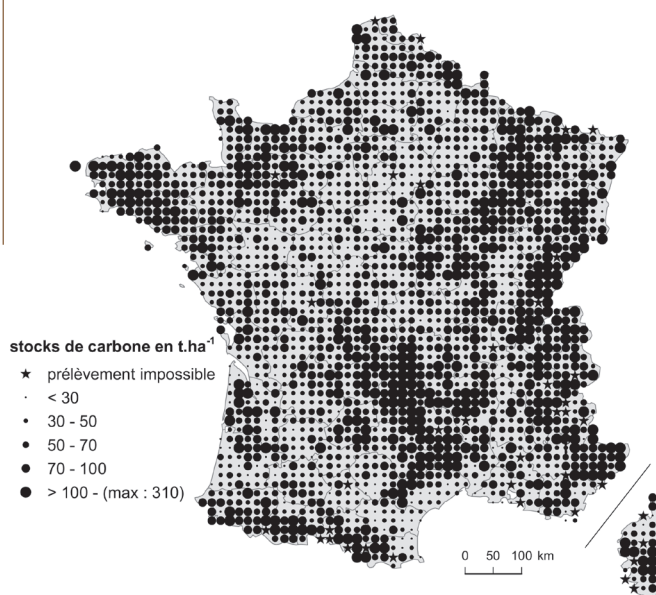
Note : L'évaluation du risque de carence en cuivre est fondée sur le rapport entre la teneur en cuivre extrait à l'EDTA et la teneur en matière organique du sol.

En position d'interface avec les eaux superficielles et souterraines, les sols jouent un rôle majeur vis-à-vis de leur qualité et de leur quantité. Ainsi, ils sont susceptibles de contenir, en plus ou moins grande quantité, des éléments plus ou moins mobiles dont le transfert vers les eaux pourrait être accéléré sous l'effet du changement climatique. En effet, l'augmentation des événements climatiques extrêmes pourrait accélérer les transferts latéraux par ruissellement et érosion lors des pluies de forte intensité. Plus généralement, la fonction de tampon qu'exercent les sols vis-à-vis des situations d'excès d'eau (inondations, ruissellement) est menacée par la progression de leur imperméabilisation. Inversement, une augmentation de la fréquence des sécheresses pourrait augmenter les phénomènes de transfert rapide d'eau et de contaminants vers certains aquifères, en favorisant la fissuration profonde de certains sols. Avec les données disponibles

actuellement, il reste difficile de dresser une évaluation spatialisée de l'impact potentiel des sols sur la qualité des eaux, excepté en ce qui concerne l'érosion et le transfert de phosphore vers les eaux superficielles.

Vis-à-vis du changement climatique, les sols représentent à la fois un potentiel d'adaptation et d'atténuation. Les sols de France métropolitaine abritent un stock de carbone organique considérable évalué à 3,2 milliards de tonnes dans les 30 premiers centimètres.

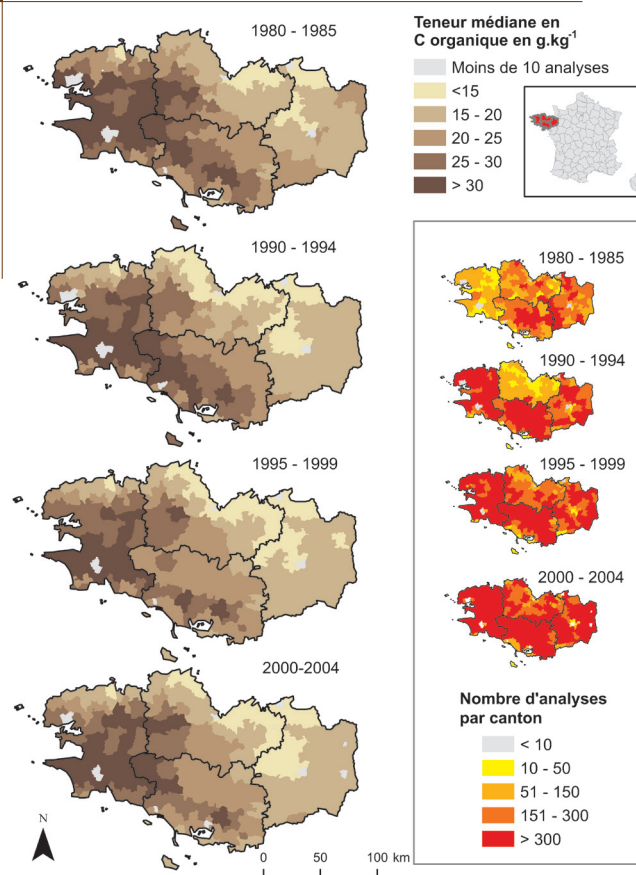
Ce stock de carbone est en baisse dans un certain nombre de situations agricoles bien identifiées (Bretagne, Franche-Comté, sols cultivés des Landes de Gascogne et du piémont pyrénéen) le plus souvent en raison de changements d'usages ou de pratiques qui se sont produits depuis quelques décennies.



Source : Gis Sol-RMQS, 2010, Inra - RMQS, 2010.

Note : La distribution des stocks de carbone est principalement contrôlée par des paramètres climatiques (par exemple, effets de l'altitude), d'occupation du sol (stocks élevés dans les régions bocagères ou forestières, faibles dans les régions de grande culture et sous vigne), ainsi que par la texture du sol (stocks d'autant plus élevés que les sols sont plus argileux).

L'évolution des teneurs médianes cantonales en carbone organique des sols bretons, entre les périodes 1980-1985, 1990-1994, 1995-1999 et 2000-2004



Source : Gis Sol-BDAT, 2004, IGN Geofla®, 2008.

Note : La diminution des teneurs en carbone organique des sols bretons est probablement liée à des changements de système de culture, en particulier aux retournements de prairies et au développement de la culture du maïs fourrage.

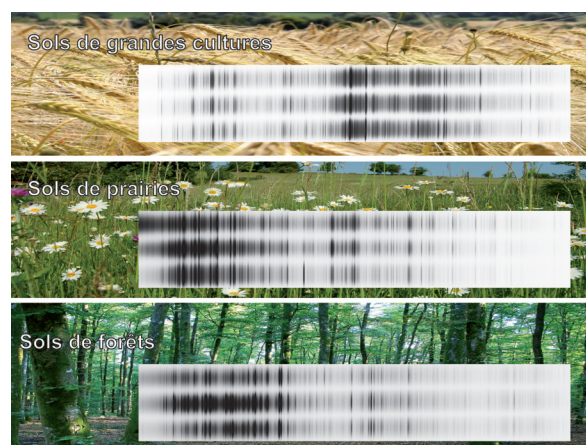
Dans d'autres situations, il semble être stabilisé, voire en légère augmentation. L'accroissement de la surface forestière a également contribué au stockage global de carbone dans les sols de France. Une afforestation des sols cultivés au rythme de 50 000 hectares par an conduit à une accumulation totale dans le sol estimée par modélisation à 25 millions de tonnes de carbone sur 50 ans. Le potentiel national de stockage additionnel sous l'effet de changements d'usages ou de pratiques a été estimé dans une fourchette comprise entre 1 et 3 millions de tonnes de carbone par an, sur une durée de 20 ans. **La gestion du carbone des sols représente donc un levier temporaire d'atténuation des émissions de gaz à effet de serre. En revanche, ce stockage ne constitue pas une solution à long terme et sa durabilité est très incertaine.** Les effets du changement climatique à long terme sur le cycle du carbone dans les sols restent très imprévisibles dans la mesure où ils sont susceptibles de jouer à la fois sur les entrées (*via* un changement éventuel de la production végétale) et sur les sorties (*via* la modification des cinétiques de minéralisation des matières organiques).

En ce qui concerne les émissions de protoxyde d'azote (N_2O) par les sols, leur estimation spatiale et temporelle se heurte encore à des difficultés méthodologiques majeures, ainsi qu'à des verrous de connaissance scientifique. Enfin, même si très peu de données sont aujourd'hui disponibles sur les flux de méthane, il est probable que les sols de France représentent actuellement plutôt un puits qu'une source de méthane vis-à-vis de l'atmosphère. En dehors de la problématique des flux de gaz à effet de serre, le changement climatique et l'augmentation des événements extrêmes pourraient avoir divers impacts sur les sols qu'il reste très difficile de prévoir et de quantifier. Ces impacts probables concernent par exemple l'accélération des processus de lessivage ou d'érosion, la perturbation des sols forestiers par le déracinement des arbres lors des tempêtes, l'augmentation de la fréquence des inondations, l'élévation du niveau des eaux marines et saumâtres.

Même s'il existe encore de grandes incertitudes sur l'ampleur et les conséquences du changement climatique sur la production végétale et sur les sols, la variabilité spatiale des propriétés du sol, en particulier de rétention en eau, représente une des solutions d'adaptation à ce changement.

Les sols sont le support de la biodiversité terrestre et abritent une multitude d'organismes vivants. Ils contiennent une immense quantité de micro-organismes (environ 10 milliards d'individus par gramme de sol) dont la majeure partie, encore largement inconnue, constitue un patrimoine génétique considérable. L'inventaire de cette biodiversité est un défi majeur pour la connaissance du fonctionnement écologique des sols. **Les extractions d'ADN microbien conduites dans le cadre du Réseau de Mesures de la Qualité des Sols (RMQS) constituent une avancée majeure.**

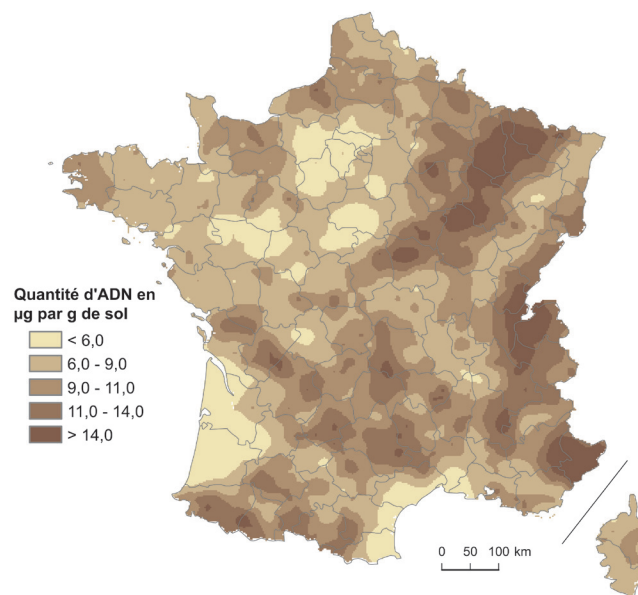
Elles permettent, pour la première fois, de quantifier le rôle de réservoir de biodiversité microbienne des sols et d'en identifier les facteurs majeurs de variation à l'échelle nationale : texture, pH, teneur en carbone organique du sol, type de système de culture. En l'état actuel des connaissances, le lien entre les fonctions des sols et l'abondance ou la diversité des communautés microbiennes, reste une question de recherche. Il n'est pas encore possible de porter un jugement qualitatif sur les valeurs observées.



© L. Ranjard, Inra

Des profils codes-barres des communautés bactériennes du sol peuvent être obtenus par analyse de l'ADN du sol. Ces profils diffèrent en fonction de l'usage du sol : grandes cultures, prairies naturelles ou vignes. Des études plus exhaustives sont actuellement en cours à l'échelle de la France pour permettre d'évaluer l'impact des différents modes d'usage des sols sur la diversité microbienne des sols (programme ECOMIC-RMQS).

Les quantités d'ADN microbien extraites dans les échantillons de sols du Réseau de Mesures de la Qualité des Sols



Source : Programme ANR Ecomic-RMQS (2010).

Note : À l'échelle de la France métropolitaine, la distribution des quantités d'ADN microbien contenues dans les sols est principalement contrôlée par des propriétés des sols qui conditionnent la disponibilité en éléments nutritifs pour les micro-organismes (teneur en argile, pH, teneur en matières organiques).

Le devenir à long terme de ces populations, tant en nombre qu'en biodiversité, reste également une inconnue majeure. C'est aussi le cas pour les autres organismes vivants du sol, micro, méso et macrofaune notamment, en l'absence d'un inventaire

exhaustif de leur abondance et de leur diversité dans les sols du territoire. Les données relatives à la seule région Bretagne donnent néanmoins une première illustration de l'influence de certaines modalités d'usage des sols.

L'abondance et la diversité des nématodes et des vers de terre dans les sols du RMQS en Bretagne

		Valeur du 1 ^{er} et du 3 ^e quartile	
		52 sites RMQS sous culture	47 sites RMQS sous prairies
Nématodes	Abondance (individus par gramme de sol sec)	8 à 16	10 à 30
	Diversité (nombre d'espèces)	14 à 17	12 à 20
Vers de terre	Abondance (individus par m ²)	86 à 320	175 à 447
	Diversité (nombre d'espèces)	6 à 9	9 à 11

Source : Université Rennes 1, RMQS-Biodiv, 2009.

Note : Le premier quartile sépare les 25 % inférieurs des données et le troisième sépare les 25 % supérieurs des données.

En position d'interface dans l'environnement, les sols sont susceptibles de recevoir ou d'émettre un certain nombre de contaminants. Ces derniers peuvent se révéler préjudiciables à la santé humaine, via leur ingestion directe ou leur transfert dans les eaux, les plantes et la chaîne alimentaire, et se

transmettre dans l'ensemble des écosystèmes. Les distributions géographiques de certains éléments traces métalliques (ETM), comme le plomb ou le cadmium, peuvent être reliées à des phénomènes de contamination diffuse.

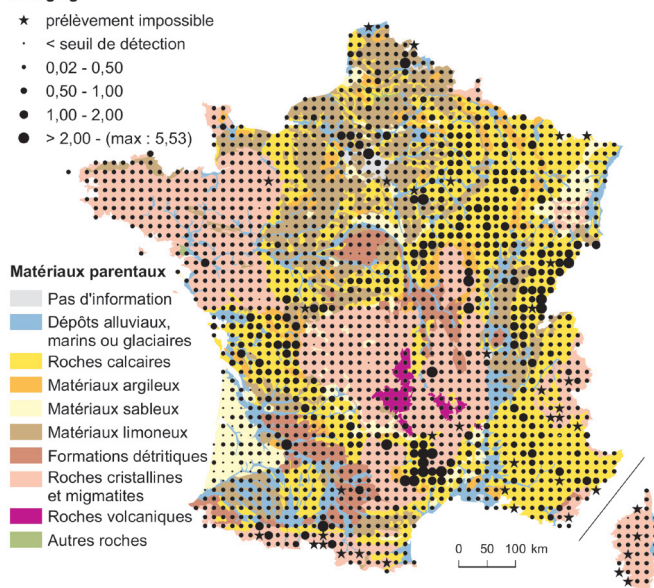
Les teneurs en cadmium total et en plomb extractible à l'EDTA des horizons de surface (0-30 cm) des sols de France métropolitaine

Teneur en cadmium total en mg.kg^{-1}

- ★ prélèvement impossible
- < seuil de détection
- 0,02 - 0,50
- 0,50 - 1,00
- 1,00 - 2,00
- > 2,00 - (max : 5,53)

Matériaux parentaux

- Pas d'information
- Dépôts alluviaux, marins ou glaciaires
- Roches calcaires
- Matériaux argileux
- Matériaux sableux
- Matériaux limoneux
- Formations détritiques
- Roches cristallines et migmatites
- Roches volcaniques
- Autres roches

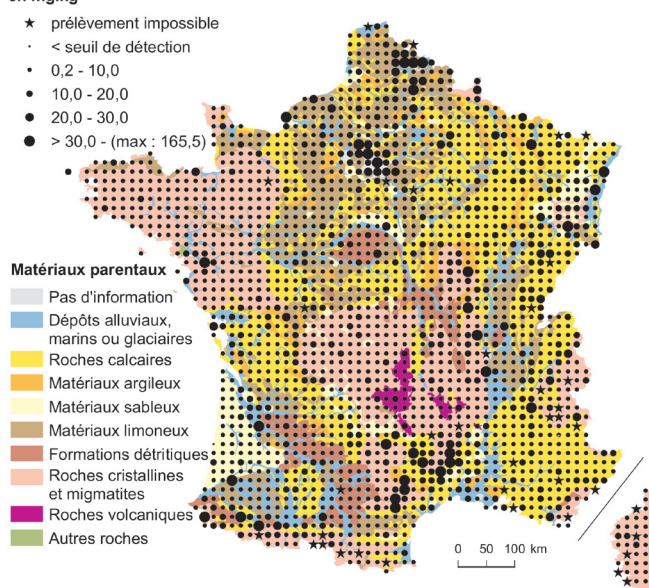


Teneur en plomb extractible en mg.kg^{-1}

- ★ prélèvement impossible
- < seuil de détection
- 0,2 - 10,0
- 10,0 - 20,0
- 20,0 - 30,0
- > 30,0 - (max : 165,5)

Matériaux parentaux

- Pas d'information
- Dépôts alluviaux, marins ou glaciaires
- Roches calcaires
- Matériaux argileux
- Matériaux sableux
- Matériaux limoneux
- Formations détritiques
- Roches cristallines et migmatites
- Roches volcaniques
- Autres roches



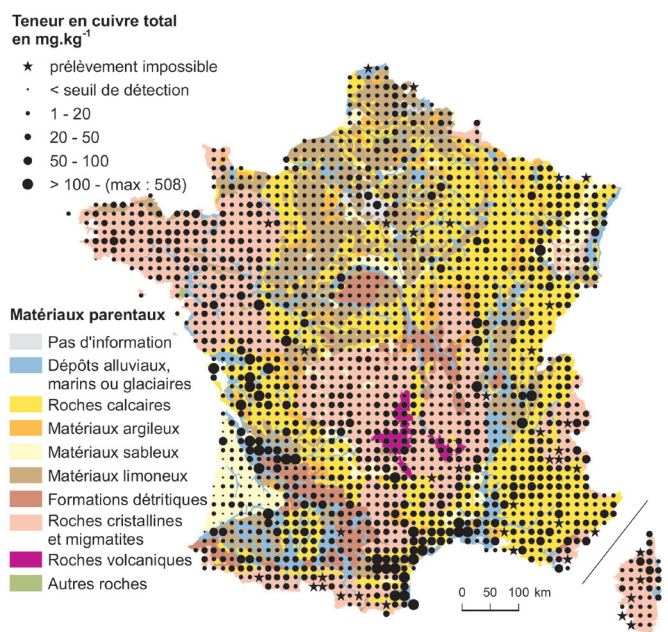
Source : Gis Sol-RMQS, 2011.

Note : La distribution du cadmium et du plomb dans les sols de France dépend à la fois des facteurs naturels comme les roches mères et la pédogenèse (cas du cadmium dans les sols issus de roches calcaires jurassiques et du plomb et du cadmium en bordure et au sud du Massif Central) et des contaminations diffuses d'origine anthropique (cas en région parisienne et dans le Nord-Pas-de-Calais pour les deux éléments).

Ces contaminations touchent principalement les zones urbaines et industrielles et montrent parfois de larges gradients affectant les secteurs situés en périphérie, voire des auréoles beaucoup plus larges comme en région parisienne et dans le Nord-Pas-de-Calais. Il est probable que de telles contaminations existent également autour de pôles urbains ou industriels plus petits, mais qu'elles aient échappé à la maille carrée de 16 km de côté du RMQS. **Certains sols urbains montrent d'ailleurs ponctuellement des teneurs très élevées en certains ETM.** En zone agricole, à l'exception des zones périurbaines et péri-industrielles, les sources

principales de contamination dans les sols sont liées aux usages et aux pratiques (engrais, traitements phytosanitaires, effluents d'élevage). En particulier, **la contamination en cuivre est omniprésente dans les sols viticoles.** Si elle ne présente *a priori* pas de danger pour la vigne elle-même, elle est susceptible de générer des transferts par érosion et elle pourrait devenir un handicap majeur en cas de changement d'usage des sols. Certains sols de vigne présentent également de fortes teneurs en plomb, probablement pour des raisons historiques d'application de produits de traitement contenant du plomb et aujourd'hui interdits.

*Les teneurs en cuivre total des échantillons de surface (0-30 cm)
des sols du Réseau de Mesures de la Qualité des Sols*



Source : Gis Sol – RMQS, 2011.

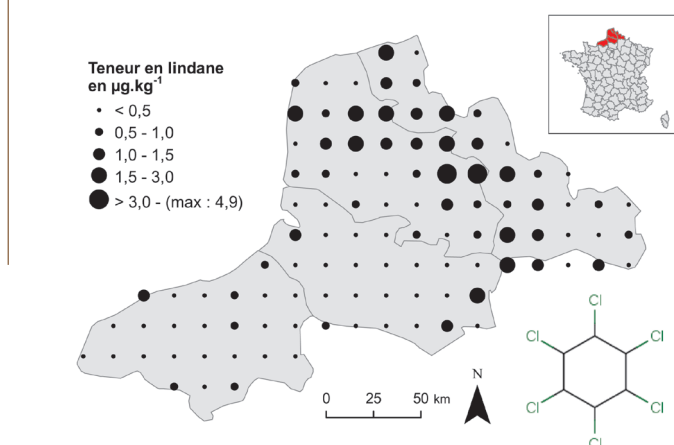
Note : Les fortes teneurs en cuivre sont principalement localisées dans les secteurs viticoles (Bordelais, Languedoc, etc.). Compte tenu de la taille de la maille du RMQS, certains vignobles « échappent » à cette cartographie. On observe des contaminations plus diffuses, très probablement d'origine industrielle, autour de Paris et dans le Nord-Pas-de-Calais.

Malgré l'identification de ces contaminations avérées, la grande majorité des sols de France présente des teneurs en ETM plutôt faibles (en règle générale, moins de 2 % des valeurs sont supérieures aux seuils retenus pour les épandages de boues de station d'épuration) ou d'origine naturelle.

Pour la majorité des situations, le risque de transfert de ces éléments dans la chaîne alimentaire reste très faible. Certaines contaminations diffuses peuvent être considérées comme historiques. La contamination diffuse en plomb des sols dans les espaces périurbains est, par exemple, très probablement à relier à l'addition de cet élément comme antidétonant dans les carburants avant la commercialisation de l'essence sans plomb en 1990. De même, le contrôle des émissions industrielles à la source est un facteur de diminution du flux d'entrée des contaminants dans les sols. **La distribution géographique de certains contaminants reste toutefois aujourd'hui inconnue. C'est le cas, par exemple, pour l'arsenic, le mercure et le sélénium.**

Une **gamme de polluants organiques** a été mesurée dans un sous-échantillon des sols du RMQS. Cet essai fait apparaître des points rassurants, mais également un certain nombre d'inquiétudes. **De nombreux polluants organiques ne sont pas – ou ne sont que très rarement – observés dans les sols.** Compte tenu de la taille de la maille d'observation, ceci ne signifie pas qu'il n'existe pas de contaminations ponctuelles. Cependant, la dispersion de ces contaminants par voie aérienne dans l'environnement semble relativement limitée, à moins que les sols ne les stockent pas, ou qu'ils soient rapidement biodégradés dans les sols. **Inversement, certains contaminants sont relativement ubiquistes dans les sols, les exemples types étant le DDT et le lindane, deux insecticides organochlorés interdits en Europe mais fortement rémanents.**

Les teneurs en lindane des horizons de surface (0-30 cm) des sols du nord de la France



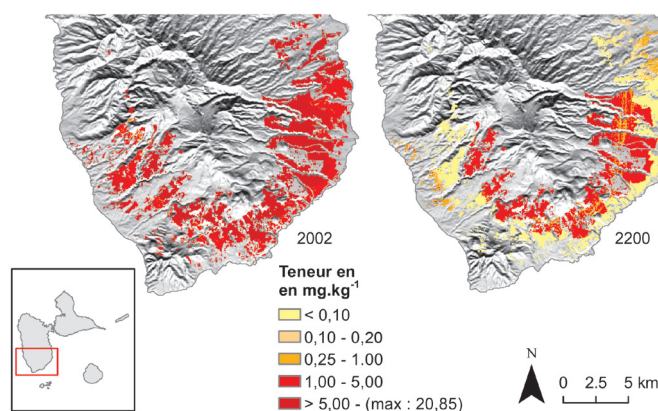
Source : Programme POP-RMQS, Anses, 2009. Villanneau *et al.*, 2009.

Note : Les teneurs en lindane ont été mesurées dans un sous-échantillon des sols prélevés dans le cadre du RMQS. Le lindane a été détecté dans tous les échantillons. Il montre par ailleurs un gradient de distribution géographique très net.

Les concentrations restent néanmoins faibles, souvent proches des limites de détection. Le lindane est présent dans les échantillons de sols de tous les sites analysés, même dans ceux où il n'a manifestement jamais été épandu. Les incertitudes concernent ses modalités de remobilisation, de volatilisation et de transfert aérien ou aquatique. Les inquiétudes sont liées

à la poursuite d'éventuels apports atmosphériques de longue distance et à l'impact que cette contamination généralisée pourrait avoir sur les écosystèmes et la santé humaine. **Un exemple extrême de contamination avérée par un polluant organique particulièrement persistant et préoccupant est le cas de la chlordécone dans les sols de bananeraies des Antilles.**

Les teneurs en chlordécone dans les sols de bananeraies du sud de Basse-Terre (Guadeloupe)

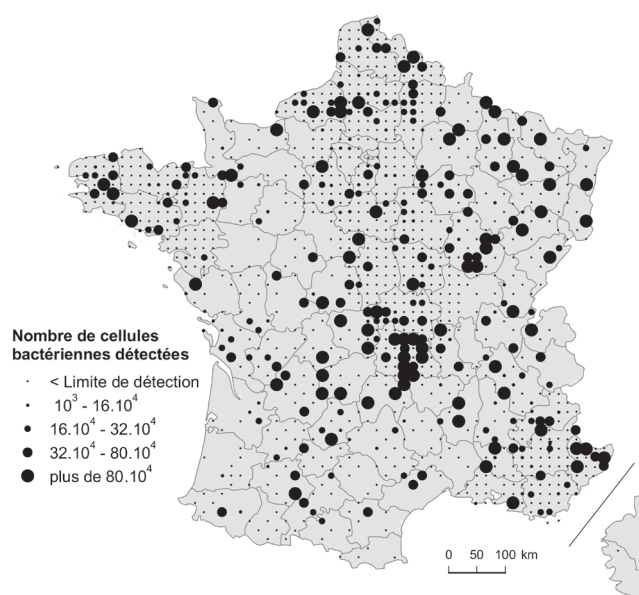


Source : Gis Sol – IGCS 2009 ; Cabidoche *et al.*, 2009.

Note : La chlordécone est un insecticide très persistant, aujourd'hui interdit, qui a été utilisé dans les bananeraies des Antilles. Les simulations par modélisation montrent que certains sols seront encore contaminés dans plusieurs siècles.

La caractérisation des sols en tant que réservoir de pathogènes n'en est encore qu'à ses prémices. Les résultats obtenus, ainsi que les interrogations récentes

sur l'origine de certains pathogènes, confortent l'idée que l'exploration de ce réservoir potentiel est à poursuivre.



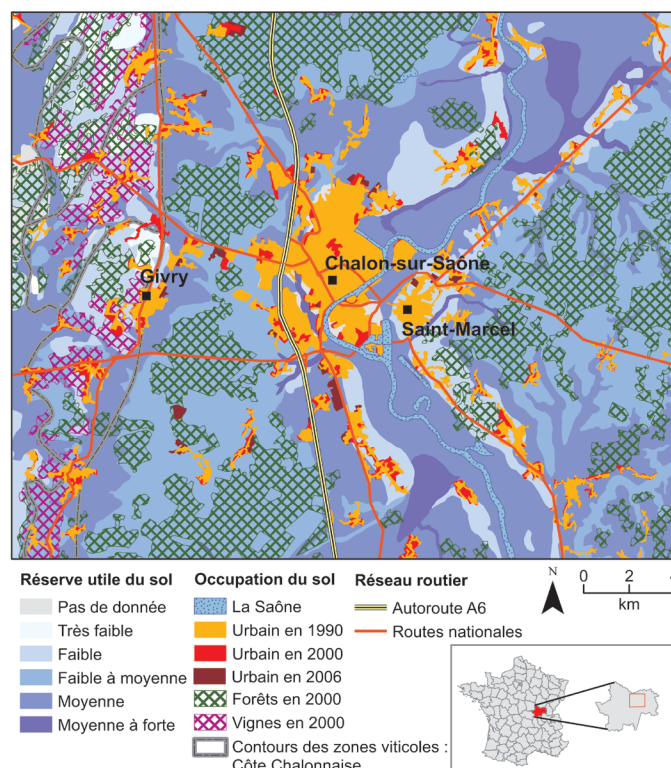
Source : Projet ANR PATHO-RMQS, IGN Geofla®, 2008.

Note : La distribution du genre *Acinetobacter* a été analysée pour 1 463 sites sur les 2 200 que compte le RMQS, dans le cadre du projet Patho-RMQS. La technique de réplique ciblée *in vitro* PCR (*Polymerase Chain Reaction*) a permis de quantifier les bactéries, sur des extraits d'ADN du sol. Le genre *Acinetobacter* a été détecté dans 112 des 1 463 échantillons testés. En revanche, l'espèce *Acinetobacter baumannii*, pathogène opportuniste de l'Homme, n'a été retrouvée que dans 8 des échantillons, démontrant ainsi sa très rare prévalence dans les sols.

L'ensemble des services rendus par les sols nécessite le maintien d'un « volume de sol » suffisant, tant en surface qu'en épaisseur. Ce maintien est menacé par diverses pressions naturelles ou anthropiques : artificialisation, érosion, extraction, glissements de terrain, etc. Des indicateurs de perte en sol sont ainsi nécessaires pour juger au mieux de leur importance et des moyens de lutte à y consacrer (érosion) ou pour orienter au mieux le choix des sols à affecter à certains usages (artificialisation, extraction). **Une inquiétude majeure concerne la progression de l'artificialisation des sols** qui s'est accélérée durant la dernière décennie. Elle constitue une menace évidente pour la plupart des fonctions des sols, excepté celle de support des infrastructures. Selon l'enquête Teruti-Lucas, l'artificialisation des sols touche une part importante des sols français (8,9 % en 2010). De plus, elle s'est

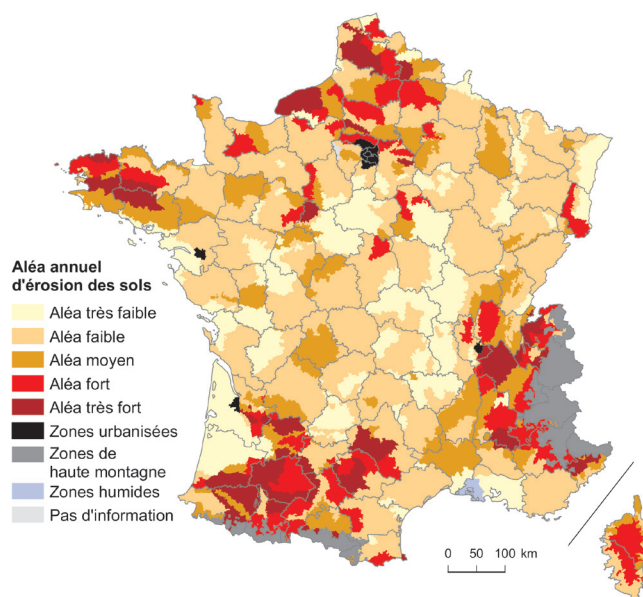
accélérée entre 2003 et 2009, affectant l'équivalent d'un département français moyen ($6\,100\text{ km}^2$) en sept ans, contre la même surface en dix ans entre 1992 et 2003 (Agreste, 2010). Les espaces artificialisés se sont étendus principalement au détriment des sols agricoles. Pour plus d'un tiers d'entre eux, il s'agit de sols de très bonne qualité agronomique.

De ce point de vue, **la gestion des sols périurbains est un enjeu important.** Ces sols sont à la fois soumis à de très fortes pressions foncières et affectés par des contaminations diffuses ou locales pouvant rendre préoccupants certains de leurs usages. Leur gestion locale raisonnée suppose une meilleure connaissance des services qu'ils peuvent rendre et des risques associés à leurs utilisations.

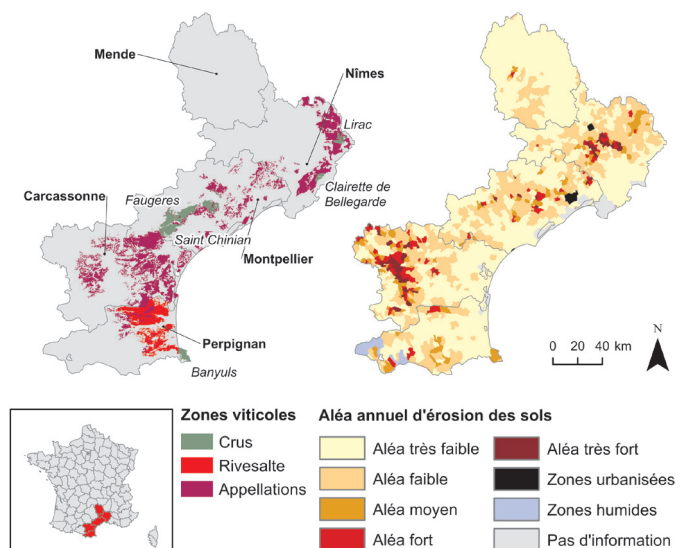


Une autre inquiétude majeure est relative à l'érosion des sols, qui constitue une perte souvent considérée comme irréversible.

Elle affecte principalement les sols agricoles limoneux des grands Bassins parisien et aquitain, ainsi que certaines situations de piémont et certains secteurs méditerranéens.



Note : L'aléa d'érosion des sols intégré par petite région agricole est estimé à l'aide du modèle Mesales (Modèle d'évaluation spatiale de l'aléa d'érosion des sols), développé par l'Inra. Il combine plusieurs caractéristiques du sol (sensibilité à la battance et à l'érodibilité), du terrain (type d'occupation du sol, pente) et climatiques (intensité et hauteur des précipitations). L'aléa est caractérisé par cinq classes représentant la probabilité qu'une érosion se produise.



Source : BRL – Chambre Régionale d'Agriculture du Languedoc-Roussillon, Gis Sol, 2011.

Note : Le Référentiel Régional Pédologique au 1/250 000 couvrant le Languedoc-Roussillon a permis d'affiner l'aléa érosif des sols à l'échelle de la région. L'aléa est fort au nord-ouest de Nîmes et de Carcassonne en raison des vignobles et des cultures couvrant peu des sols fortement érodibles et d'une forte agressivité des pluies.

Dans de nombreux cas, les pertes en sol provoquées par l'érosion sont supérieures aux volumes de sol formés par l'altération naturelle des roches. Au-delà des dommages parfois spectaculaires qu'elle entraîne en aval des zones érodées, l'érosion des sols est donc susceptible de remettre en cause la durabilité à long terme de certains agro-écosystèmes. Elle pourrait de

plus se trouver amplifiée par une augmentation des événements climatiques extrêmes.

Enfin, de grandes incertitudes subsistent sur l'état de **tassement** des sols agricoles et forestiers et sur l'évolution de leur structure à long terme.



La coulée d'eau boueuse du 9-10 mai 2009 dans le Sundgau (sud de l'Alsace).

Conclusion

Cette synthèse dresse un premier bilan de l'état des sols de France. Elle souligne les principales inquiétudes relatives à l'évolution de leur qualité. *A contrario*, elle met en évidence un certain nombre de points positifs. Enfin, elle met également en lumière les points pour lesquels subsistent de fortes incertitudes ayant différentes origines : manque de recul pour juger des évolutions en cours, modification et impact des pressions futures, absence de données ou d'indicateurs pertinents.

L'état des lieux reste donc nuancé. Cependant, certaines menaces apparaissent aujourd'hui particulièrement prégnantes ou ont parfois déjà provoqué des dommages quasi irréversibles par le passé.

La progression de l'artificialisation s'est accélérée durant la dernière décennie. La connaissance de cette menace, largement irréversible, relève d'autres dispositifs que ceux mis en place par le Gis Sol (Corine land Cover, Teruti-Luca, Cadastre). L'érosion pourrait aussi s'accélérer sous l'effet du changement climatique.

D'autres dommages passés sont difficilement réversibles. C'est en particulier le cas d'un certain nombre de contaminations diffuses ou locales dont l'origine est historique (plomb des essences, chlordécone aux Antilles, etc.). Pour certains de ces contaminants, leur interdiction (arséniate de plomb, divers polluants organiques persistants, etc.) ou un meilleur contrôle des sources (par exemple, limitation des rejets industriels, diminution de certains additifs dans l'alimentation animale, contrôle des teneurs en contaminants dans les boues de station d'épuration, etc.) permet de penser que les pressions sur les sols seront moins fortes à l'avenir. Pour d'autres contaminants (par exemple, le lindane), les voies de dispersion dans l'environnement posent encore de nombreuses questions quant à leur devenir.

Toutefois, la majorité des contaminants qui ont été analysés ne sont présents qu'en très petites quantités dans les sols. Si certains pourraient poser de réels problèmes sanitaires, la plupart d'entre eux ne présentent qu'un très faible risque de transfert dans la chaîne alimentaire.

Au plan de la fertilité chimique, l'évaluation de l'état des sols de France ne fait pas apparaître la nécessité d'une alerte générale, même si certains points restent préoccupants et nécessiteraient une analyse approfondie des flux en entrée et en sortie. La juxtaposition de situations d'excédents et d'insuffisances potentielles, en particulier en ce qui concerne le phosphore, soulève la question d'une meilleure valorisation des effluents d'élevage pour corriger les unes et les autres.

L'analyse réalisée sur l'ADN microbien des sols de France, tant en quantité qu'en biodiversité, montre, d'une part, qu'aucun sol ne paraît stérilisé, et que, d'autre part, les micro-organismes représentent un potentiel considérable pour une gestion plus écologique des sols et de la production agricole.

Si la connaissance de l'état des sols de France a considérablement progressé, de nombreuses incertitudes et de nombreuses interrogations dues à un manque de connaissances subsistent encore. Elles portent, par exemple, sur le stockage du carbone et son devenir sous l'effet du changement climatique, sur l'évolution de la biodiversité ou celle de l'état physique des sols.

Certaines de ces incertitudes sont tout simplement liées à l'absence de données. On ne dispose pas, par exemple, d'un inventaire national de la distribution de certains contaminants (arsenic, mercure, sélénium, etc.), ni de la méso et de la macro-faune du sol.

Pour certains de ces paramètres, le conservatoire d'échantillons de sols, mis en place dans le cadre des programmes du Gis Sol, constitue une véritable mémoire des sols et devrait permettre de reconstituer *a posteriori* certaines évolutions.

Les incertitudes concernent également des contaminants potentiellement émergents, comme les substances médicamenteuses ou certains perturbateurs endocriniens. Le diagnostic national sur l'impact de certains processus fondamentaux (par exemple, ceux liés aux émissions de N_2O) se heurte encore à des verrous scientifiques majeurs.

D'autres incertitudes sont liées à celles qui concernent l'évolution des pressions. Par exemple, les incertitudes sur l'évolution climatique future, et sur son impact sur la dynamique des matières organiques des sols, ne permettent pas de réaliser aujourd'hui un pronostic spatialisé de l'évolution des stocks de carbone des sols. De même, les changements d'occupation, d'usages ou de pratiques, qui représentent des facteurs majeurs d'évolution des pressions sur les sols, dépendront de contingences économiques ou politiques qui restent en grande partie imprévisibles.



La pédothèque du conservatoire d'échantillons de sols à l'Inra d'Orléans.

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

- Antoni V., Le Bissonnais Y., Thorette J., Zaidi N., Laroche B., Barthes S., Daroussin J. et Arrouays D., 2006. « Modélisation de l'aléa érosif des sols en contexte méditerranéen à l'aide d'un Référentiel Régional Pédologique au 1/250 000 et confrontation aux enjeux locaux », *Étude et Gestion des Sols*, 13. 201-222 p.
- Baize D., 1997. *Teneurs totales en éléments traces métalliques dans les sols*. Paris : Éditions Inra. 410 p. (coll. *Un point sur...*).
- Baize D., Deslais W., Bourennane H. et 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. 167-180 p.
- Baize D., Douay F., Villanneau E., Bourennane H., Sterckeman T., Ciesielski H. et King D., 2010. « Les éléments en traces dans les sols agricoles du Nord-Pas de Calais. I. Étude et cartographie des teneurs des horizons de surface. », *Étude et Gestion des Sols*, 17, 3-4. 213-238 p.
- Balesdent *et al.*, 2011, 2^e édition. Chapitre 5. Stockage et recyclage du carbone. Dans : Girard M.-C., Walter C., Rémy J.-C., Berthelin J., Morel J.-L. *Sols et environnement*. Paris : Dunod. 881 pages. (coll. *Sciences sup*).
- Cabidoche Y.-M., Achard R., Cattan P., Clermont-Dauphin C., Massat F. et Sansoulet J., 2009. « Long-term pollution by chlordecone of tropical volcanic soils in the French West Indies: A simple leaching model accounts for current residue. », *Environmental Pollution*, 157, 1697-1705 p.
- Cluzeau D., Pérès G., Guernion M., Chaussod R., Cortet J., Fargette M., Martin-Laurent F., Mateille T., Pernin C., Ponge J.-F., Ruiz-Camacho N., Villenave C., Rougé L., Mercier V., Bellido A., Cannavacciuolo M., Arrouays D., Boulonne L., Jolivet C., Lavelle P., Velasquez E., Plantard O., Walter C., Foucaud-Lemercier B., Tico S., Giteau J.-L., Bispo A., 2009. « Intégration de la biodiversité des sols dans les réseaux de surveillance de la qualité des sols : exemple du programme-pilote à l'échelle régionale, le RMQS BioDiv. » *Étude et Gestion des Sols*, 16, 187-201.
- Coic Y. et Coppenet M., 1989. *Les oligo-éléments en agriculture et élevage*. Inra éditions, 114 p. (coll. *Mieux comprendre*).
- Denoroy P., Dubrulle P., Vilette C., Colomb B., Fayet G., Schoeser M., Marin-Lafleche A., Pellerin F., Pellerin S. et Boiffin J., 2004. *Regifert, Interpréter les résultats des analyses de terre*. Paris : Inra éditions. 132 p. (coll. *Techniques et Pratiques*).
- Dequiedt S., Thioulouse J., Jolivet C., Saby N.-P., Lelievre M., Maron P.-A., Martin M.-P., Prévost-Bouré N.-C., Toutain B., Arrouays D., Lemanceau P. et Ranjard L., 2009. « Biogeographical patterns of soil bacterial communities. », *Environmental Microbiology Reports*. 1(4), 251-255 p.
- Flageollet J.-C., 1988. *Les mouvements de terrain et leur prévention*. Masson, Paris, 224 p.
- Follain S., Schvartz C., Denoroy P., Vilette C., Arrouays D., Walter C., Lemercier B. et 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 p.
- Gabrielle B., Prieur V., Thompson R., Schulz M., Schmidt M., Boukari E., Lehuger S., Chaumartin F. et Massad R., 2011. *Fine-scale estimation of biogenic emissions of nitrous oxide using ecosystem models and atmospheric transport models in France*. Proc. NitroEurope Open Science Conference, Edinburgh, 11-15 April 2011.
- Hénault C., Roger P., Laville P., Gabrielle B. et Cellier P., 2011. *Chapitre 7. Les émissions par les sols des gaz à effet de serre CH₄ et N₂O*. In : Girard M.-C., Walter C., Rémy J.-C., Berthelin J. et Morel J.-L., *Sols et environnement*. Dunod, France. 2^e édition. 881 p.

- Inra, 2002. *Contribution à la lutte contre l'effet de serre. Stocker du carbone dans les sols agricoles de France ?* (rapport d'expertise scientifique collective. Synthèse du rapport d'expertise réalisé par l'Inra à la demande du ministère de l'Écologie et du Développement durable). 2002. Paris : Arrouays D., Balesdent J., Germon J.-C., Jayet P.-A., Soussana J.-F. et Stengel P. (eds). 32 p.
- Jamagne M., 2011. *Grands paysages pédologiques de France*. Versailles : Éditions Quæ. 568 p. + annexes.
- Lefebvre M.-P., 2010. *Spatialisation de modèles de fonctionnement hydromécanique des sols appliquée à la prévision des risques de tassement à l'échelle de la France*. Thèse de doctorat de l'Université d'Orléans. Inra, Orléans, 293 p.
- Lemerrier B., Gaudin L., Walter C., Aurousseau P., Arrouays D., Schvartz C., Saby N.-P.-A., Follain S. et Abrassart J., 2008. « Soil phosphorus monitoring at the regional level by means of a soil test database. », *Soil Use and Management*, 24, 131-138 p.
- Martin M.-P., Wattenbach M., Smith P., Meersmans J., Jolivet C.-C., Boulonne L. et Arrouays D., 2011. « Soil organic carbon stocks distribution in France. », *Biogeosciences*, 8. 1053-1065 p.
- Saby N., Arrouays D., Jolivet C., Boulonne L. et Pochot A., 2006. « Geostatistical assessment of lead in soil around Paris, France. », *Sci. Tot. Env.* 367, 212-221 p.
- Saby N.-P.-A., Arrouays D., Antoni V., Foucaud-lemercier B., Follain S., Walter C. et Schvartz C., 2008. « Changes in soil organic carbon content in a French mountainous region, 1990-2004. », *Soil Use and Management*, 24. 254-262 p.
- Saby N.-P.-A., Marchant B.-P., Lark R.-M., Jolivet C.-C., Arrouays D., 2011. « Robust geostatistical prediction of trace elements across France. », *Geoderma*, 162 : 303-311 p.
- Schvartz C., Muller J.-C. et Decroux P., 2005. *Guide de la fertilisation raisonnée. Grandes cultures et prairies*. Sous l'égide du Comifer. Édition France Agricole. 412 p. (coll. *Produire mieux*).
- Service de l'Observation et des Statistiques (SOeS), 2011. « L'artificialisation des sols s'opère aux dépens des terres agricoles. », *Le point sur*, n° 75. 4 p.
- Service de l'Observation et des Statistiques (SOeS), 2009. « Le phosphore dans les sols, nécessité agronomique, préoccupation environnementale. », *Le point sur*, n°14, juin 2009. 4 p.
- Service de la statistique et de la prospective (SSP), 2010. *L'utilisation du territoire entre 2006 et 2009 : L'artificialisation atteint 9 % du territoire en 2009*, Agreste Primeur, n°246, juillet 2010. 4 p.
- Sogreah-Ademe, 2007. *Bilan des flux de contaminants entrant sur les sols agricoles de France métropolitaine : Bilan qualitatif de la contamination par les éléments traces métalliques et les composés traces organiques et application quantitative pour les éléments traces métalliques*. Rapport final. Ademe. 329 p. Téléchargeable : <http://www2.ademe.fr/servlet/getDoc?cid=96&m=3&id=57992&p1=00&p2=11&ref=17597>
- Villanneau E., Saby N.-P.-A., Arrouays D., Jolivet C.-C., Boulonne L., Caria G., Barriuso E., Bispo A. et Briand O. 2009. « Spatial distribution of lindane in topsoil of northern France. », *Chemosphere*, 77, 1249-1255 p.
- Villanneau E.-J., Saby N.-P.-A., Marchant B.-P., Jolivet C.-C., Boulonne L., Caria G., Barriuso E., Bispo A., Briand O. et Arrouays D., 2011. « Which persistent organic pollutants can we map in soil using a large spacing systematic soil monitoring design? A case study in Northern France. », *Sci. Tot. Env.* 409, 3719-3731 p.

Liens

- Ademe, Page « Sol » :
<http://www2.ademe.fr/servletKBaseShow?sort=-1&cid=96&m=3&catid=12620>
- Agence nationale du médicament vétérinaire :
<http://www.anmv.afssa.fr/>
- Atlas Européen de la Biodiversité des Sols :
http://eusoils.jrc.ec.europa.eu/library/maps/biodiversity_atlas/
- BDAT : Base de Données d'Analyses de Terre :
<http://www.gissol.fr/programme/bdat/bdat.php>
- BDETM : Collecte nationale d'analyses d'Éléments Traces Métalliques :
<http://www.gissol.fr/programme/bdetm/bdetm.php>
- Carte du pH de surface des sols forestiers français :
<http://www.ifn.fr/spip/spip.php?rubrique182&rub=cat>
- Cartographie interactive de l'aléa d'érosion des sols et des coulées boueuses, accès
« Cartographie » > « Cartographie interactive Géoïdd France » :
<http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/cartographie/article/cartographie-interactive-geoidd-france.html>
- Groupement d'intérêt scientifique sur les sols (Gis Sol) :
<http://www.gissol.fr/>
- INDIQUASOL : Base de Données Indicateurs de la Qualité des Sols :
<http://www.gissol.fr/programme/bdiqs/bdiqs.php>
- Inra d'Orléans, érosion des sols :
<http://erosion.orleans.inra.fr>
- Institut National des Sciences de l'Univers, Observatoire Multidisciplinaire des Instabilités
de Versants : <http://eost.u-strasbg.fr/omiv>
- La vie cachée des sols :
<http://www2.ademe.fr/servlet/getDoc?cid=96&m=3&id=72480&p1=30&ref=12441>
- Ministère en charge de l'Écologie : La rubrique « Maîtrise du ruissellement agricole » :
http://www.rdtrises.org/projets/digetcob/bib/techniques_ruis/pole_comp_HN/
- Portail de la Prévention des Risques Majeurs - Prim.Net, Section Mouvements de Terrain :
<http://www.risquesmajeurs.fr/le-risque-mouvements-de-terrain>
- Service de l'Observation et des Statistiques du Ministère en charge de l'Écologie : accès
thématique « Sol » :
<http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/theme/environnement/sous-theme/milieus-sol.html>
- Service de l'Observation et des Statistiques du Ministère en charge de l'Écologie, accès
« Données en ligne » > « Environnement » > « CORINE Land Cover » :
<http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/>
- Union des Industries de la Fertilisation (UNIFA), La fertilisation en France :
<http://www.unifa.fr/le-marche-en-chiffres/la-fertilisation-en-france.html>

Annexe

Les programmes du Gis Sol

Le programme d'Inventaire, Gestion et Conservation des Sols (IGCS) a pour but d'inventorier et de produire une cartographie informatisée multi-échelle des sols du territoire. Ce programme se décline à trois niveaux d'échelles : les Référentiels Régionaux Pédologiques à 1/250 000, le programme Connaissance Pédologique de la France aux échelles moyennes (1/100 000 et 1/50 000) et les Secteurs de Référence aux échelles détaillées (1/10 000). Fin 2010, les levés cartographiques des Référentiels Régionaux Pédologiques étaient achevés pour 28 départements de la métropole, la bande littorale guyanaise et une partie des Antilles. Les bases de données géographiques du programme IGCS sont utilisées comme outils d'aide à la décision et à la planification à des échelles variées et dans le cadre de thèmes multiples : agriculture, foresterie, qualité des eaux, émissions de gaz à effet de serre, aménagement, etc.

Le programme de la Base de Données des Analyses de Terre (BDAT) permet de collecter pour la France métropolitaine les résultats d'analyses effectuées pour des agriculteurs auprès de laboratoires d'analyses de terre agréés par le ministère en charge de l'agriculture. Il est informatisé et normalisé. La diffusion des résultats est publique et assurée via un serveur web de cartographie interactive. Ce programme regroupe aujourd'hui plus de 15 millions de résultats d'analyses. Leur répartition spatiale est relativement homogène dans les principales régions agricoles françaises. **Un programme spécifique dédié à la collecte des analyses en éléments traces métalliques (la BD ETM)** préalablement aux épandages de boues de stations d'épuration a également été mis en place. Ces programmes apportent une vision spatiale et temporelle de la répartition et de l'évolution d'un certain nombre de paramètres des horizons de surface des sols agricoles de France.

Enfin, le programme de surveillance Réseau de Mesure de la Qualité des Sols (RMQS) repose sur l'installation et l'observation, à pas de temps réguliers (tous les 10-12 ans), de près de 2 200 sites de suivi. Ils sont implantés sur des placettes géo-référencées et régulièrement réparties, selon une maille carrée de 16 km de côté. L'ensemble du territoire métropolitain et des Antilles françaises a ainsi été couvert en dix ans. Les premiers résultats permettent de qualifier la fertilité des sols français et d'estimer leur stock de carbone en lien avec l'atténuation du changement climatique. Les cartographies réalisées mettent également en exergue les zones naturellement riches en éléments en traces et celles où des contaminations diffuses d'origine anthropique sont suspectées. Ce programme alimente également de nombreuses autres études, comme par exemple celles de la contamination des sols par des polluants organiques persistants, ou encore par les bactéries pathogènes de l'Homme, et le rôle des sols dans les flux de gaz à effet de serre. Pour cela, il s'appuie sur le conservatoire national d'échantillons de sols créé à partir des prélèvements du RMQS.

Synthèse sur l'état des sols de France

Cette synthèse met à la disposition d'un large public le premier état des lieux sur la qualité des sols de France métropolitaine et des Outre-mer. Elle repose sur un important travail d'acquisition et d'exploitation de données réalisé par le Groupement d'Intérêt Scientifique Sol depuis 10 ans. Elle résume les principales conclusions d'un ouvrage complet, *L'état des sols de France*, publié simultanément.

Cette synthèse présente les connaissances acquises sur l'état chimique, biologique et physique des sols. Bien que subsistent encore de fortes incertitudes, cet état des lieux souligne les principales inquiétudes relatives à l'évolution de la qualité des sols mais met aussi en évidence certains points positifs.

En effet, les sols sont le support des activités agricoles et sylvicoles et les garants de notre sécurité alimentaire. En interagissant avec les autres milieux, ils assurent des services essentiels à l'Homme et à l'environnement. Pourtant, ils restent encore largement méconnus, car leur présence est le plus souvent occultée par la végétation, les habitations ou les infrastructures qui les recouvrent.

Or, les sols constituent une ressource naturelle dont la destruction est difficilement réversible et la réhabilitation très coûteuse. Leurs usages et leur devenir représentent un enjeu collectif majeur pour le développement durable. La connaissance de leur état et de son évolution est donc primordiale tant pour le maintien des activités humaines que pour la préservation de la qualité de notre environnement.

Considérant « le sol » comme un enjeu insuffisamment connu, le Groupement d'Intérêt Scientifique sur les sols, le Gis Sol, a été créé en 2001 par plusieurs acteurs publics. Il contribue aujourd'hui par cette première synthèse nationale à l'amélioration des connaissances sur les sols et à leur plus large appropriation par les citoyens, les décideurs ou les aménageurs.