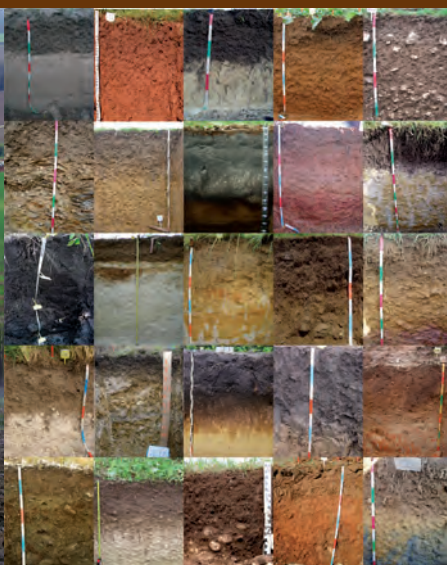


L'état des sols de France



LES SERVICES RENDUS PAR LES SOLS



LA DIVERSITÉ DES SOLS DE FRANCE



L'ÉTAT DES SOLS DE FRANCE ET SON ÉVOLUTION

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

Les travaux du Gis Sol ont ainsi été conduits autour de trois grands programmes complémentaires : l'Inventaire, Gestion et Conservation des Sols (IGCS) ; le Réseau de Mesures de la Qualité des Sols (RMQS) et la Base de Données des Analyses de Terre (BDAT).

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 sur les sols. Cette tâche était ambitieuse, car l'objectif recherché était de fournir des clés de compréhension de l'extrême variabilité spatiale des sols de France et de dresser un état de l'art des connaissances actuelles de leur qualité et de leur évolution possible, cela tout en restant simple, accessible et synthétique.

En 2006, le préambule de la convention renouvelant le Gis Sol précisait : « *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.* » Ce constat reste d'actualité et pointe 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.

Marie-Agnès VIBERT¹ et Valéry MORARD²
Co-présidents du Gis Sol

** 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.*

1 - Adjointe au Sous-directeur de la Biomasse et de l'Environnement à la Direction Générale des politiques agricole, agroalimentaire et des territoires du ministère de l'Alimentation, de l'Agriculture, de la Pêche, de la Ruralité et de l'Aménagement du territoire.

2 - Sous-directeur de l'information environnementale au Commissariat Général au Développement Durable Service de l'Observation et des Statistiques du ministère de l'Écologie, du Développement durable, des Transports et du Logement.

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.

Le sol, interface dans l'environnement

Cet ouvrage est consacré au sol, tels que le définissent les pédologues et les agronomes, à savoir la couche superficielle des surfaces continentales, formée par l'altération de la roche sous-jacente sous l'action du climat et des organismes vivants. Le volume du sol 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. La formation des sols résulte généralement d'une évolution lente, dont la durée varie de plusieurs millénaires à plusieurs dizaines, voire centaines, de millénaires. Compte tenu de la durée nécessaire à leur formation, ils constituent une ressource essentielle à préserver.

Les sols sont à la fois le produit et le support du développement de la végétation, donc de la biosphère continentale. Ils jouent un rôle majeur dans son évolution et dans celles des espèces qui l'habitent. En position d'interface avec les autres compartiments de l'environnement (atmosphère, biosphère, eaux, roches), ils échangent en permanence avec eux des flux d'eau, de gaz, de matières. Ils constituent par conséquent un maillon central dans la régulation des grands cycles planétaires tels que ceux de l'eau, du carbone ou de l'azote. Ils sont au cœur de grands enjeux planétaires particulièrement prégnants comme la sécurité alimentaire, le changement climatique ou la biodiversité. Les diverses prospectives planétaires relatives à l'horizon 2050, telles que celles de la *Food and Agriculture Organization* (FAO) des Nations unies, montrent que la disponibilité en terres cultivables, et donc en sols aptes à soutenir durablement les productions d'aliments, d'énergie ou de fibres, est une question clé pour satisfaire les besoins futurs. Épargner et valoriser efficacement ce milieu est une nécessité pour limiter l'extension des surfaces cultivées et la destruction corrélative d'écosystèmes précieux pour leur biodiversité, leurs fonctions de protection ou le stock de carbone qu'ils ont accumulé.

Les sols constituent donc une ressource naturelle. Elle peut être utilisée durablement pour la production agricole ou forestière. Mais sa destruction est difficilement réversible et sa réhabilitation est très coûteuse. Recréer un sol à partir de matériaux rapportés n'est envisageable que sur des surfaces restreintes, pour des aménagements urbains par exemple. C'est en ce sens qu'on peut qualifier les sols de ressources non renouvelables. Or des processus de destruction sont à l'œuvre, dont l'érosion, mais aussi l'excavation pour la construction des infrastructures humaines ou l'exploitation du sous-sol. Les usages et le devenir de cette ressource constituent un enjeu collectif pour le développement durable. En effet, la grande variabilité de la nature, des propriétés et des usages du sol et des pressions qu'ils subissent, conditionne des processus de dégradation des sols plus ou moins rapides. Pour les protéger et les exploiter au mieux, il est donc essentiel de disposer d'une connaissance objective et scientifique des sols et de l'évolution de leur qualité. Cette notion de qualité des sols ne peut être évaluée ni dans l'absolu, ni par un critère unique. Les multiples fonctions écologiques des sols sont associées à des services écosystémiques, tels qu'ils ont été inventoriés par le programme de travail international portant sur l'Évaluation des écosystèmes pour le millénaire (EM). Il a été conçu pour répondre aux besoins des décideurs et du public en matière d'information scientifique relative aux conséquences pour le bien-être humain des changements subis par les écosystèmes. Parmi ces services, la production d'aliments ou de matériaux est la plus valorisée. 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. Ces services sont exploités pour partie à travers des usages agricoles ou forestiers, souvent associés à l'épandage des déchets, à la protection contre les ruissellements catastrophiques, ou à la production d'eau potable. Les qualités des sols sont donc relatives aux services écosystémiques qui en sont attendus. Certains de ces services peuvent être antagonistes. Ainsi l'adaptation à une productivité agricole élevée, par la fertilisation, est un facteur de disparition d'espèces inféodées à un milieu pauvre en éléments nutritifs et de réduction de la biodiversité. La qualité d'un sol se définit ainsi en fonction de son aptitude à fournir les services attendus.

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, bien que leur potentiel de services écosystémiques soit progressivement reconnu, les connaissances sur les sols ne font pas l'objet d'une large appropriation par les citoyens, les décideurs ou les aménageurs. L'acquisition de cette information par les différentes parties prenantes de ce qu'il est communément admis d'appeler « la gouvernance à cinq » est un enjeu pour l'identification des conditions d'une gestion durable des sols.

La Charte de l'Environnement de 2005 énonce le droit des citoyens d'accéder aux informations environnementales et les invite à participer à l'élaboration des décisions publiques ayant une incidence sur l'environnement. Plus récemment, le Grenelle de l'environnement, qui s'est traduit par l'adoption en 2010 de la Loi ENE portant Engagement national pour l'environnement, a réuni pour la première fois l'État et les représentants de la société civile pour définir une feuille de route en faveur de l'écologie, du développement et de l'aménagement durables. Cependant, si l'eau, l'air ou la biodiversité sont désormais bien connus par les citoyens, les décideurs ou les aménageurs, il n'en va pas de même pour les sols.

Ce double 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. Il a été créé par la convention du 9 mars 2001 d'une durée de cinq ans, signée entre les ministères en charge de l'agriculture et de l'écologie, l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (Ademe), l'Institut français de l'environnement (Ifen) et l'Institut national de la recherche agronomique (Inra). Depuis, le Gis Sol s'est élargi à l'Institut de recherche pour le développement (IRD) en 2004 et à l'Inventaire forestier national (IFN) en 2009. Devant l'intérêt des partenaires pour les travaux menés, une nouvelle convention a été signée le 15 mai 2006 pour cinq nouvelles années. L'évaluation positive des résultats issus de ces dix ans de partenariat et l'apparition de nouveaux enjeux pour le Gis Sol, parmi lesquels la biodiversité et le changement climatique, appellent à son prolongement pour une nouvelle période. Les missions assignées au Gis Sol couvrent un large domaine d'actions. Parmi elles, on peut noter l'inventaire géographique des sols et le suivi opérationnel de leurs qualités, la création et la gestion d'un système d'information répondant aux demandes des pouvoirs publics et de la société, la valorisation des données et des résultats obtenus et enfin la coordination avec les programmes européens de même nature. La réalisation et la gestion des programmes du Gis Sol ont été confiées à l'Inra, qui a créé à cet effet l'unité de service Infosol. Les travaux sont menés en relation avec des partenaires régionaux divers.

Le Gis Sol est piloté par un Haut Comité de Groupement co-présidé par les ministères en charge de l'agriculture et de l'écologie et regroupant des représentants de chacun des partenaires. Le Haut Comité décide du programme annuel. Il coordonne également l'ensemble des programmes d'inventaire et de surveillance des sols sur le territoire français. Une conférence d'orientation bisannuelle réunit les différentes catégories d'utilisateurs actuels et potentiels des programmes du Gis Sol et de leur valorisation. L'objectif majeur de cette conférence est de mieux prendre en compte les attentes de ces utilisateurs. Les personnalités conviées sont d'origine très diversifiée : ministères en charge de l'agriculture, de l'écologie ou de la recherche, administrations déconcentrées, gestionnaires du monde agricole, associations environnementales, gestionnaires de réseaux, industriels, professionnels de la dépollution, experts fonciers et organismes de recherche.

Dans ce contexte, le Gis Sol met à la disposition d'un large public cet ouvrage portant sur l'état des sols de France, dans lequel il expose les principaux résultats de ces dix années de travaux. L'année 2011 étant l'année des Outre-mer, il était également essentiel pour le Gis Sol de mettre en exergue les spécificités des sols tropicaux ou volcaniques des Antilles, de Guyane, de Nouvelle-Calédonie et de La Réunion. L'année 2011 ayant été déclarée année internationale des forêts par les Nations unies, il était aussi important d'aborder les sols forestiers dans cet ouvrage.

Ce document, divisé en trois parties, liste dans un premier temps les fonctions des sols et les services qu'ils rendent. Dans une deuxième partie, il explicite la diversité et les principales caractéristiques des sols en France métropolitaine et en Outre-mer. Enfin, dans la dernière partie, l'accent est mis sur l'état actuel des sols, leur évolution observée ou probable et les conséquences environnementales ou réponses possibles. Le Gis Sol, et en particulier l'unité InfoSol de l'Inra, à qui a été confiée la coordination de cet ouvrage, a pris soin d'y associer les différents spécialistes des sols français, pour répondre aux interrogations des acteurs de l'environnement. Rédigé comme un outil de référence, ce rapport dresse un bilan sur l'état des sols de France et souhaite contribuer à l'émergence d'une politique de gestion durable des sols.

Les services rendus par les sols



© Antonio Bispo, Ademe

Le sol joue un rôle essentiel dans l'environnement, car il est à l'interface avec les autres milieux : atmosphère, biosphère, eaux superficielles et souterraines, sous-sol.

Si le sol évolue naturellement, essentiellement sous l'effet du climat et des flux d'eau et d'énergie le traversant, les activités humaines ont également un impact sur son évolution. L'Homme utilise le sol pour se nourrir, pour en extraire des matériaux et y construire des habitations et des infrastructures. Le sol rend ainsi des services qui interagissent : production agricole et forestière, support des paysages et des infrastructures, gisement de matériaux, mémoire du passé, épuration des polluants, régulation des eaux et des cycles de gaz à effet de serre et réservoir de biodiversité.

Mais les nombreuses pressions anthropiques exercées sur les sols peuvent induire des conflits d'usage. De plus, certains flux de composés organiques ou minéraux, issus principalement de l'agriculture et de l'industrie, qui transitent par les sols, participent fortement à leur dégradation.

Les services rendus par les sols

- 12 Le sol et la production végétale
- 14 Le sol, élément structurant du paysage
- 16 Le sol, source de matériaux
- 18 Le sol, support des infrastructures
- 20 Le sol et la conservation du patrimoine géologique et archéologique
- 22 Le pouvoir épurateur et filtrant du sol
- 24 Le sol et la réserve en eau : le rôle des zones tampons
- 26 La régulation des flux de gaz à effet de serre par le sol
- 28 Le sol, réservoir de biodiversité

Les services rendus par les sols

Malgré les nombreux services écosystémiques qu'il rend, le sol reste assez méconnu. Ses fonctions sont pourtant nombreuses : 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. Il est donc primordial de préserver ses 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.

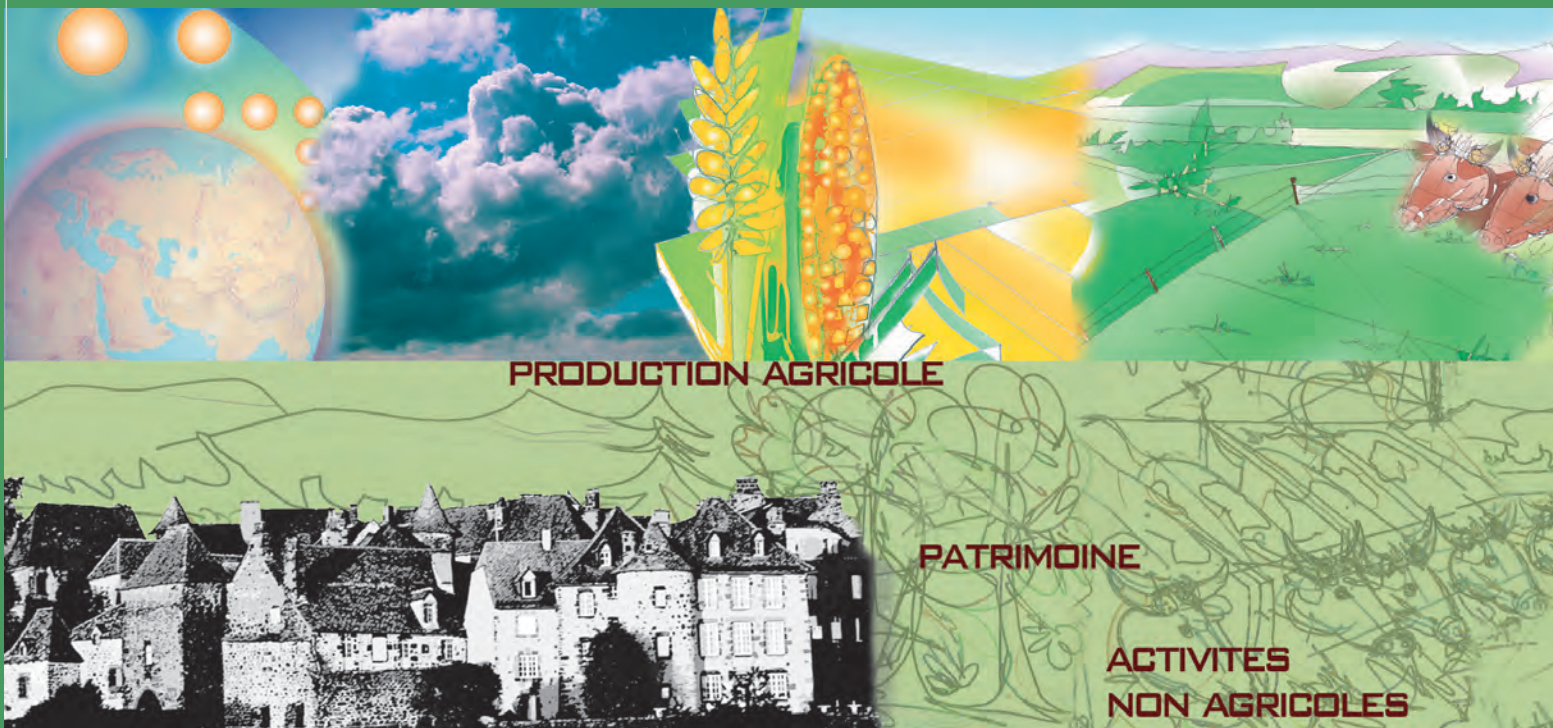
Le sol est le support des activités humaines et notamment de la production agricole et forestière. Il fournit ainsi les éléments indispensables à la production végétale pour nourrir les animaux et les hommes et produire des fibres, des matériaux et de l'énergie renouvelable. Les éléments de nos paysages agricoles, forestiers et urbains prennent appui sur le sol. Il fournit des matériaux de construction *via* l'exploitation des carrières et des gravières. 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 les polluants et autres substances apportés entre autres par les activités humaines : éléments traces (cadmium, mercure, plomb, etc.), polluants organiques persistants (hydrocarbures, pesticides, etc.), micro-organismes pathogènes, etc. Le sol régule le régime des eaux superficielles et l'alimentation des eaux souterraines, ainsi que le cycle du carbone, de l'azote et des gaz à effet de serre (dioxyde de carbone, méthane, protoxyde d'azote). Enfin, il abrite une biodiversité faunistique, floristique et microbienne considérable.

Le sol est donc un système vivant complexe, 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 (expansion urbaine, contamination, agriculture, etc.).



© Antonio Bispo, Adème

Le sol épure et régule les eaux.





Le sol et la production végétale

Une des fonctions prépondérantes du sol est la production de biomasse. En effet, le sol sert de support et de milieu nutritionnel aux plantes. L'agriculture et la forêt reposent sur l'exploitation de cette fonction du sol. Elles se répartissent l'essentiel du territoire français. Mais le sol peut également se révéler contraignant pour les plantes donnant aux régions leur vocation agricole ou forestière. Enfin, le sol est un élément majeur des terroirs français fournissant aux produits agricoles leur typicité.

Les relations entre le sol et le végétal sont complexes. Le sol est un support physique et nutritionnel pour la plupart des plantes. En effet, le système racinaire des plantes se développe dans le sol permettant leur ancrage mécanique et leur alimentation en eau et en nutriments. Cependant, le sol peut également se montrer contraignant pour les plantes : asphyxie par excès d'eau, toxicité de certains éléments chimiques (aluminium, calcaire, sel, etc.), disponibilité limitée des nutriments (en sols pauvres ou acides). Certaines plantes ont ainsi développé des adaptations anatomiques et physiologiques à ces contraintes du sol : à la diversité des sols répond donc une diversité végétale.

Certaines activités humaines, agriculture et foresterie, exploitent la production végétale pour la production d'aliments ou de matériaux. En France, l'agriculture occupe presque la moitié du territoire et la forêt environ un tiers. Cependant, des disparités existent entre régions. Certains départements sont très peu agricoles (Guyane, Île-de-France), tandis que l'agriculture domine dans de nombreux départements de la moitié Ouest et du Bassin parisien. De même, certains départements sont très peu boisés (surtout dans le Nord et le Nord-Ouest), alors que la Guyane est très majoritairement recouverte de forêts.

En raison de leurs propriétés, les sols expliquent en grande partie les vocations agricoles ou forestières de nos régions ainsi que le développement de certains systèmes de production agricole. Les grandes cultures intensives dominent largement sur les sols limoneux profonds des bassins sédimentaires (Bassin aquitain, Bassin parisien, Limagne). Avec le développement de la fertilisation ou de l'irrigation, les grandes cultures se sont également développées dans certaines régions caractérisées par des sols calcaires (Champagne, Poitou-Charentes). Les élevages à base de prairies se rencontrent principalement dans les milieux modérément acides des massifs anciens (Bretagne, Manche, Massif central) et dans des régions à fortes contraintes climatiques (Jura, Causses). Les sols les plus pauvres et les plus acides (Landes de Gascogne, Sologne, Vosges) sont en règle générale exploités par la production forestière. Les contraintes ou les caractères particuliers de certains sols ont généré des occupations qui leur sont spécifiques : riz sur les sols de Camargue, prairies ou peupleraies dans les sols humides de bas-fonds, vignes sur les sols graveleux des terrasses anciennes du bordelais ou sur les sols caillouteux de la vallée du Rhône, pin maritime sur les cordons dunaires atlantiques, etc.



© F. Lebourgeois, Inra

Une hêtraie avec tapis de jacinthes des bois (Forêt d'Eawy – Seine-Maritime).

1 Les terroirs



Le vignoble de Saint-Émilion (Gironde).

La notion de terroir est généralement associée à une production de qualité réalisée sur un territoire délimité. Cette notion repose sur l'acceptation que ce territoire fournit une qualité organoleptique spécifique au produit, la typicité. Cependant, le territoire n'est pas le seul élément d'un terroir et le savoir-faire ou la connaissance technique doivent également être pris en compte.

Cette notion de terroir est utilisée pour de nombreuses productions comme le vin, les fromages, les fruits (pêche, pomme, prune, raisin, etc.), le veau ou l'agneau, etc. Le sol est un des éléments majeurs du terroir. Ses propriétés physico-chimiques agissent sur la composition en certaines molécules, elles-mêmes responsables

de la qualité organoleptique du produit. Ainsi, selon la flore prairiale mangée par les vaches, le fromage de Comté n'a pas les mêmes saveurs. De même, la typicité des vins est fortement liée aux propriétés des sols sur lesquels la vigne est conduite. Cette relation est généralement connue depuis longtemps et les terroirs ont été délimités souvent historiquement. Les relations entre les propriétés du sol et la qualité organoleptique des produits sont difficiles à établir tant elles sont complexes. Pour certains terroirs, comme les vignobles du bordelais, ce sont les régulations de l'alimentation en eau et en éléments minéraux par le sol qui constituent les facteurs principaux de qualité.

2 Les spécificités des sols tropicaux



Un paysage de bananeraie à Basse-Terre (Guadeloupe).

Les Antilles françaises présentent des particularités climatiques et pédologiques diverses sur de petits territoires.

Ces îles volcaniques montagneuses ne comportent pas de zones arides ni de dessèchement de l'air. L'évapotranspiration est dépendante du rayonnement global qui diminue avec l'altitude, alors que le volume des pluies augmente avec l'altitude sur les versants est et décroît sur les versants ouest jusqu'à la côte.

En Guadeloupe, les systèmes bananiers en altitude sont développés sur des ANDOSOLS à allophanes (sols jeunes développés dans des roches volcaniques) ou sur des sols bruns andiques à halloysite (minéral silicaté) dominante. À la Martinique, les systèmes bananiers sont généralement développés sur les sols brun-rouille à halloysite du versant Nord-Atlantique. Les cultures d'ananas se pratiquent souvent sur les sols relativement jeunes sur ponces du versant est de la Montagne Pelée. Après des décennies de culture de canne à sucre sur les VERTISOLS (sols argileux développés dans des argiles gonflantes) du sud-est de la Martinique, les systèmes ont évolué vers des systèmes prairiaux et maraîchers avec la mise en place d'un périmètre irrigué. Les systèmes vivriers se développent sur les versants est, ou en altitude, tant sur les ANDOSOLS sur cendres et ponces que sur les sols à caractères fersiallitiques, riches en argiles et en oxydes de fer.

Les forêts se structurent dans les paysages humides d'altitude. Souvent naturelles ou perturbées, ou de plantation de Mahoganys aux Antilles, elles représentent des parts importantes des territoires : 97 % de la Guyane, 48 % de la Réunion, 43 % de la Martinique et 22 % de l'archipel guadeloupéen. La Guyane est un cas particulier, continental et équatorial. Dans les régions les plus sèches des Antilles, les petites forêts sont des recrus (nouvelles pousses suivant une coupe) secondaires de faibles extensions et correspondent à des zones fortement exploitées sur de longues périodes.

Le sol, élément structurant du paysage

Le paysage est « une portion de territoire vu par un observateur. Y sont inscrits des faits naturels et humains, actuels ou passés, dont certains aspects sont visibles à un moment donné » (Deffontaines *et al.*, 2006). Le sol joue un rôle primordial dans la construction des paysages, car il sert de support à toutes les autres composantes du paysage.



Un paysage du bocage normand.

© Laurent Mignaux, Medditi

Les paysages sont formés par un ensemble d'éléments naturels (forêts, lacs et rivières, roches, sols, etc.), que les activités humaines ont modifiés et façonnés au cours du temps. Les caractéristiques et les dynamiques des paysages résultent donc d'évolutions naturelles et de l'impact des activités humaines passées et présentes. La convention européenne du paysage (Convention de Florence (2000), entrée en vigueur en France en 2006) reconnaît « juridiquement les paysages en tant que composante essentielle du cadre de vie des populations, expression de la diversité de leur patrimoine commun culturel et naturel, et fondement de leur identité ». Sa mise en œuvre par les pouvoirs publics vise à préserver durablement la diversité des quelque 2 000 paysages français.



Un paysage d'openfield en Haute-Loire.

© Arnaud Bouissou, Medditi

© Thierry Degen, Medditi

L'observation d'un paysage est subjective et dépend de la sensibilité de chaque observateur. Le paysage perçu par le pédologue est différent de celui du géologue, du botaniste, de l'agronome, du sociologue, de l'aménageur, de l'agriculteur, etc.

Intimement liés au relief et aux processus qui les façonnent, les sols structurent les paysages. Ils influencent l'organisation de la végétation, l'occupation des sols et leur usage. Ainsi, des sols peu épais de plateau sont souvent peu propices aux cultures et plutôt recouverts de massifs forestiers. De même, des sols hydromorphes de fond de vallée avec des marques morphologiques liées à un engorgement en eau sont peu favorables aux cultures en l'absence de drainage et sont donc plus souvent occupés par des prairies.

Pour exploiter les sols peu favorables, l'Homme a parfois façonné et structuré les paysages par des aménagements spécifiques. Il a ainsi épierré des terres agricoles pour faire des murets et pour façonner des terrasses artificielles de moyenne montagne, permettant de cultiver les sols de pente. Or, l'exode rural entraîne l'abandon des terrasses, édifices fragiles nécessitant un entretien régulier pour réparer les murs et remonter la terre. De même, les zones humides argileuses du marais Poitevin ont été mises en valeur dans les années 1970, par un système de drainage profond associé à des labours en ados (billons ou rejets de terre de forme arrondie) séparés par des fossés d'évacuation des eaux superficielles. Enfin, les haies, omniprésentes dans le paysage bocager de

Bretagne occupent près de 100 000 km contre 250 000 km dans les années 1970. Situées sur des levées de terre, la couche organo-minérale de surface des sols de haie peut atteindre 1 m contre 30 cm habituellement. La haie limite le départ des particules de terre vers l'aval. Les sols situés sous la haie stockent trois fois plus de carbone qu'en amont. La préservation du système bocager permet ainsi de lutter contre l'érosion des sols et contre la diminution des matières organiques.

Les paysages ruraux sont aussi marqués par des aménagements agricoles (chemins, morcellement parcellaire, remembrement, drainage, etc.), qui eux-mêmes modifient les sols. Le drainage de 6 millions d'hectares en France a ainsi permis d'allonger les périodes favorables au travail du sol. La reconversion de certains sols prairiaux en sols cultivés a cependant induit une diminution de leur stock de carbone.

© Laurent Mignaux, Meddit



Un fond de vallée agricole (vallée de la Vézère – Dordogne) : le découpage en lanière des terrains agricoles structure le paysage.



Des terrasses, soutenues par des murs de pierre, sculptant le paysage (Haute vallée de la Cèze – Gard).

Le sol, source de matériaux

Les matières premières utilisées dans les travaux publics, le génie civil et le bâtiment proviennent de l'exploitation de carrières. Les matériaux extraits peuvent être utilisés directement, ou après traitement sous la forme de granulats. Ils représentent 376 millions de tonnes en 2009, tandis que l'extraction d'argile pour la production de matériaux en terre cuite représente un peu plus de 4,3 millions de tonnes.

L'Homme a façonné les paysages pour y prélever des matériaux : les carrières, les gravières, l'extraction des pierres et des argiles. L'exploitation des sols riches en matière organique d'origine végétale des tourbières fournissait du combustible par le passé, tandis qu'elle est plutôt liée à l'horticulture actuellement (terreau). Les carrières ont fourni des pierres d'appareil, de blocage ou de moellonage pour la construction, souvent localement. Le sable du sol est exploité pour l'industrie du verre.

En zone tropicale, les gisements de latérites sont exploités pour la production de briques et les cuirasses pour la pierre de construction ou comme gisement métallifère. Les sols sont creusés pour l'exploitation des filons aurifères, notamment en Guyane. Les sols fournissent aussi le matériel nécessaire à la fabrication de briques ou de torchis ou d'habitations en pisé. Des méthodes de construction réutilisent d'ailleurs à nouveau le sol local pour la construction.

Enfin, les sols sont exploités à d'autres fins. Les argiles sont recherchées depuis fort longtemps pour la poterie.

Plus récemment, elles entrent dans certains processus utilisés dans les industries papetières, pétrolières et chimiques et notamment dans la composition de colles, de plastiques ou de solvants. Elles sont aussi utilisées pour la cosmétique, en raison des propriétés leur permettant de passer de l'état de gel à celui de liquide par agitation et de se figer au repos.

Selon la Fédération Française des Tuiles et Briques (FFTB), l'extraction d'argile en France a représenté un peu plus de 4,3 millions de tonnes en 2009, contre 5,6 en 2008, soit une baisse de -23 %. Cent vingt-six carrières d'argiles sont ainsi exploitées en France métropolitaine et une à la Martinique, exclusivement pour la production de matériaux en terre cuite. L'argile extraite subit différentes étapes lors du procédé de fabrication des produits en terre cuite (briques, pavage, tuiles, etc.) : extraction et concassage des matières premières, malaxage et humidification, façonnage des produits, séchage, cuisson et traitements après cuisson.

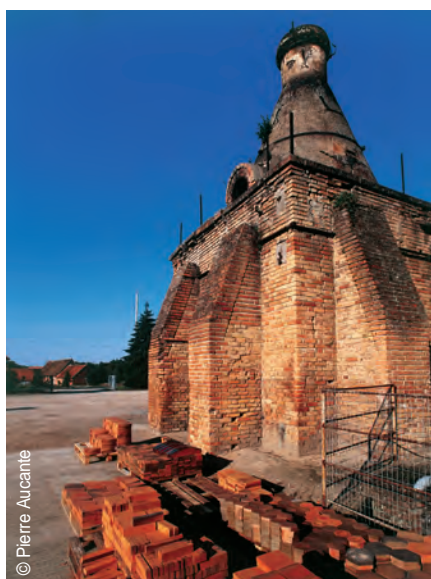
L'extraction d'argile en France en 2008 et 2009

Type de production	Production 2008 (en milliers de tonnes)	Production 2009 (en milliers de tonnes)
Tuiles & accessoires	3 006	2 354
Briques de structure	2 331	1 758
Briques apparentes + pavage	276	214
Autres produits	25	27
Total	5 638	4 353

Source : FFTB, 2011.

Note : La production d'une tonne de produits de terre cuite nécessite un peu plus d'une tonne d'argile.

1 L'exploitation de l'argile en région Centre



© Pierre Aucante

En Sologne, territoire situé entre Orléans et Vierzon et enserré par les boucles de la Loire et du Cher, le sol et le sous-sol sont constitués de couches de sables et d'argiles. Celles-ci ont été exploitées depuis l'époque romaine pour la poterie, mais il faut attendre la moitié du XIX^e siècle pour voir le développement de plus de 500 tuileries-briqueteries artisanales, dont seule une trentaine subsiste actuellement. De même, dans le Berry (départements du Cher et de l'Indre), un habitat médiéval et un four de potier datant du XI^e siècle ont été visiblement implantés à proximité d'un gisement de kaolinite, argile blanche particulièrement recherchée et exceptionnelle dans cette région.

L'utilisation des ressources du sol pour la fabrication de briques (Briqueterie-tuilerie à Ligny-le Ribault – Loiret).

2 L'extraction des carrières de roches massives et des gravières



© Laurent Migraux, Meddit

Une carrière de sable en forêt de Fontainebleau.

Selon l'Union nationale des industries de carrières et matériaux, l'extraction de granulats a représenté 376 millions de tonnes en 2009 en France, contre 431 en 2008 (soit -12,8 %). De taille inférieure à 125 mm, ils proviennent de l'exploitation d'alluvions détritiques naturelles (graviers et sables), ou du concassage de roches massives ou de matériaux issus du recyclage de bétons et de pierres de taille. L'extraction nécessite des engins de travaux publics (terrain meuble) ou flottants (site immergé), ou l'explosif (roches massives). La forte demande en granulats concerne particulièrement les sols sableux des grandes vallées (la Loire, etc.). L'usage du ciment et du béton au XIX^e siècle a permis le développement des infrastructures routières, ferroviaires et des villes. Le béton est obtenu

en mélangeant sable, granulats, ciment et eau. Les granulats assurent la consistance, le volume et la résistance, tandis que le ciment sert de liant, comme dans les poudingues et conglomérats créés par la cimentation naturelle de gravières et de sables.

3 Un exemple en Gironde : l'extraction de granulats concurrence la viticulture



Un sol de graves, avec des dragées de quartz affleurant aux pieds des vignes.

En région Aquitaine, la production de granulats représente 23 millions de tonnes, soit un peu plus de 5 % de la production nationale. La majorité des roches extraites est d'origine alluvionnaire (54 %) et calcaire (33 %) (Cellule économique régionale des transports d'Aquitaine, 2005). Dans le département de la Gironde, l'extraction de granulats ne suffit pas à couvrir les besoins pour la construction d'ouvrages et d'infrastructures routières, notamment pour l'agglomération bordelaise. Ainsi, 30 % des granulats sont importés des régions voisines, induisant un impact environnemental et des coûts liés au transport non négligeables.

L'extraction des granulats détruit la végétation, modifie fortement le paysage et altère le patrimoine pédologique et les circulations d'eau. Or cette pression s'exerce surtout sur les sols alluvionnaires à fort potentiel viticole (les Graves, le Médoc, le Sauternes, etc.). Dans ces zones convoitées pour l'exploitation des granulats, les sols graveleux particulièrement riches en éléments grossiers sont en effet dominants. Cette compétition se traduit par une pression sur le terroir, dont les enjeux sont sensibles pour la profession viticole. La proportion des zones d'extraction de granulats au sein des zones d'Appellation d'origine contrôlée (AOC) est cependant très faible, car les projets d'exploitation nécessitent systématiquement un déclassement préalable de l'AOC.

Dans les Graves, la compétition entre terroirs viticoles et exploitation de granulats est particulièrement forte. Le territoire viticole des Graves s'étend du nord de Bordeaux au sud de Langon, limité à l'est par la Garonne et à l'ouest par le massif forestier des Landes de Gascogne. C'est le domaine de deux grandes AOC : Pessac-Léognan au nord et Graves au sud. Les formations alluvionnaires (graves et cailloux issus de l'ancien lit de la Garonne) y sont également propices à la production de granulats. À cela s'ajoute une importante pression foncière à proximité de Bordeaux et de Langon, qui nécessite des granulats. En 2004, la part artificialisée du territoire représente ainsi plus de 16 000 hectares (25 % de la surface totale), tandis que les vignobles ne représentent que 6 300 hectares (10 %) et les zones d'extraction de granulats environ 950 hectares (1,5 %). Si ces dernières paraissent négligeables par rapport à l'étendue du territoire des Graves, leur implantation se fait néanmoins aux dépens des sols viticoles.

Le sol, support des infrastructures

Si la proportion de sols agricoles représente 75 % du territoire, l'urbanisation grignote progressivement les paysages ruraux, notamment dans les zones péri-urbaines. Les espaces urbains supportent de nombreuses infrastructures et leurs sols sont particulièrement hétérogènes.

Les trois quarts du territoire de la France métropolitaine sont exploitables par l'agriculture, mais l'espace à dominante rurale occupe moins de 60 % du territoire métropolitain. Il est souvent fortement lié à l'organisation spatiale des sols. Le sol est le support de l'habitat humain, des activités industrielles, des infrastructures de loisirs et de transport. Ces infrastructures représentent un peu plus de 5 % de la surface de la France (CORINE Land Cover, 2006). Elles sont surtout concentrées autour des centres urbains mais s'étendent de plus en plus dans les zones rurales. La démographie et le développement

économique nécessitent toujours plus d'infrastructures, mais celles-ci entrent en concurrence avec d'autres activités humaines ou d'autres fonctions du sol. C'est pourquoi il est nécessaire de mettre en place des politiques d'aménagement du territoire permettant de maintenir des zones agricoles, forestières ou naturelles.

Si les paysages ruraux ont presque toujours précédé les paysages urbains, l'urbanisation gagne de plus en plus sur les zones agricoles, forestières ou naturelles. Selon l'enquête Teruti-Lucas, l'artificialisation des sols touche

une part importante des sols français (8,9 % en 2010). Cette artificialisation s'opère à 58 % sur des sols qui étaient cultivés ou en herbe en 2006. De plus, l'artificialisation s'accélère entre 2006 et 2009, affectant l'équivalent d'un département français moyen (6 100 km²) en sept ans, contre un département en dix ans entre 1992 et 2003 (Agreste, 2010).

L'espace à dominante urbaine couvre plus de 40 % du territoire, regroupe plus de 80 % de la population et assure 45 % de la production agricole dans les espaces périurbains. Ceux-ci conservent généralement un paysage campagnard, marqué par les cultures, la forêt, l'habitat pavillonnaire, des infrastructures routières et des zones d'activités. De ce fait, les sols des espaces périurbains sont particulièrement diversifiés, regroupant

différents niveaux d'artificialisation, du sol naturel peu modifié au sol fabriqué.

Enfin, les sols urbains supportent de nombreuses infrastructures : bâtiments, réseaux routier et ferroviaire, zones industrielles et commerciales, espaces verts, etc. Ces sols sont très variés et peuvent être fabriqués, scellés, compactés, imperméabilisés, reconstitués, confinés, etc. Fortement remaniés pour la mise en place de réseaux d'assainissement, de communication ou de voiries, ou des fondations, ils sont composés de matériaux divers et souvent multiples comme la terre végétale ou des remblais. Cette hétérogénéité leur confère des propriétés particulières, notamment au niveau de la compaction et de l'imperméabilisation.



© Laurent Mignaux, Meddit

Des immeubles de grande hauteur au nord-est de Paris.



© Thierry Degen, Meddit

La construction d'infrastructures routières près d'Angoulême.



© Antonio Bispo, Ademe

Des sols d'espace vert.



© Antonio Bispo, Ademe

L'ouverture d'une tranchée dans un sol urbain pour la construction de réseaux.

Le sol et la conservation du patrimoine géologique et archéologique

Les sols et leurs constituants sont les tout premiers éléments que découvrent le géologue et le pédologue sur le terrain. Leur histoire, à savoir leur nature, leur formation, leur mise en place et leur évolution, dépend de plusieurs facteurs dont l'environnement géologique, le climat et l'Homme. En effet, le sol conserve l'empreinte des activités passées de l'Homme et assure ainsi une fonction de protection du patrimoine archéologique.

Les sols contiennent une somme d'informations considérable pour la connaissance de la succession des couches géologiques et de leur histoire, des paléoenvironnements et de l'évolution des cycles climatiques. Par leur contenu et leur composition, les sols apportent des données importantes sur l'évolution des êtres vivants : faune, flore, activités de l'Homme.

L'Homme ayant souvent choisi comme lieux d'habitats les abris sous roche ou les entrées de grotte, ou encore les bords de rivières et de lacs, il en résulte que la notion de sol et de sédiments archéologiques est en général restreinte à ces milieux particuliers. Pour les archéologues, le mot « sol » est couramment utilisé pour désigner un sol d'habitat, c'est-à-dire une surface sur laquelle sont mis au jour les résultats des activités de la vie de l'Homme : dallages de pierres mis en place pour se protéger de l'humidité, pierres délimitant des zones d'habitat, vestiges de cabanes, foyers aménagés, ateliers de tailles d'objets et d'outils, déchets culinaires, sépultures, restes d'animaux lorsque l'Homme n'occupait pas les lieux. Toutes ces observations sont fondamentales pour mieux connaître l'évolution de l'Homme, de ses civilisations et de son environnement, d'où la nécessité de protéger les sites qui représentent la mémoire de cette évolution.

C'est à la Convention, lors de la révolution française, que l'on doit l'idée d'assurer la protection du patrimoine archéologique français. Mais ce n'est qu'en 1887 puis en 1913 que des lois viennent assurer la protection juridique des gisements archéologiques. La réglementation sur les fouilles elles-mêmes, par suite du renvoi d'un premier projet en 1907, ne verra le jour qu'en 1941. Depuis la loi du 27 septembre 1941, tout un ensemble de mesures assure la protection juridique des sites géologiques et archéologiques et place sous le contrôle de l'État l'exécution des grands travaux, des recherches, l'exploitation scientifique des découvertes, la conservation des sites et des vestiges, leur réhabilitation et leur présentation au public.

La réglementation de la recherche archéologique répond aujourd'hui à deux préoccupations essentielles : d'une part assurer de façon rigoureuse l'exploitation de gisements dont la fouille peut enrichir la connaissance de notre passé ; d'autre part préserver et conserver l'ensemble des sites qui constitue un patrimoine d'une remarquable richesse.



La grotte ou « Caune » de l'Arago (Tautavel, Pyrénées-Orientales) : mise à jour des niveaux d'occupation du Paléolithique inférieur et moyen et du plus ancien crâne humain européen (450 000 ans).

© E. Bozet

© Anne Ficher de Forges



Le dolmen de Pierre Fenat (Loiret) : monument funéraire mégalithique préhistorique constitué de plusieurs grosses dalles de couverture (tables) posées sur des pierres verticales servant de pieds.

© Antonio Bispo, Ademe



Les empreintes d'Odysseus (le dinosaure de Plagne, de plus de 30 mètres de long et pesant près de 50 tonnes), dans les sols du chantier de fouilles archéologiques de Bellegarde (Ain).

Le pouvoir épurateur et filtrant du sol

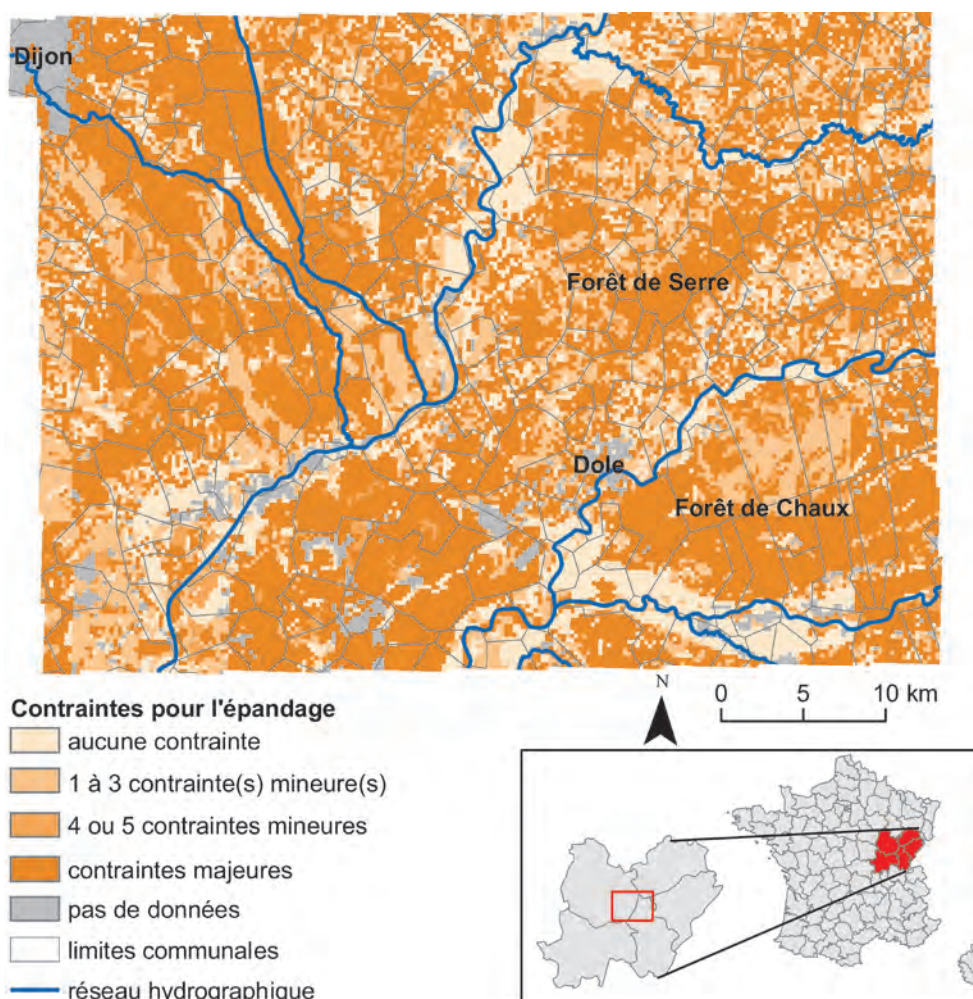
Le sol présente un pouvoir épurateur et filtrant pour lui-même et pour l'ensemble des autres milieux en relation avec lui : l'atmosphère, la biosphère, les eaux superficielles et souterraines, le sous-sol. Le sol stocke, dégrade et limite les transferts vers ces milieux de nombreux produits épandus, qu'ils soient solides ou liquides, minéraux ou organiques, d'origine agricole, industrielle ou urbaine.

L'Homme utilise de nombreux produits organiques (effluents, produits phytosanitaires) ou minéraux (fertilisants). Épandus sur les sols ou les cultures, ils peuvent conduire à des risques de contamination des sols, des plantes et de la chaîne alimentaire, des eaux superficielles et souterraines, et de l'atmosphère.

Les propriétés biologiques et physico-chimiques du sol lui confèrent un pouvoir épurateur, c'est-à-dire la capacité de stocker et de dégrader les éléments et organismes présents dans les produits épandus. Ainsi, dans le cadre de l'épandage de déchets et de sous-produits d'origine urbaine, industrielle ou agricole, plusieurs propriétés

du sol influencent la capacité de stockage, de dégradation et de biodisponibilité des polluants contenus dans les déchets à épandre. Il s'agit notamment du pH du sol, de sa teneur en calcaire, de sa capacité à fixer des cations pouvant recharger la solution du sol, de sa teneur en eau, de ses teneurs en éléments traces métalliques (cuivre, plomb, etc.), etc. L'aptitude d'un sol à l'épandage de déchets est donc appréciée à partir de ces propriétés pédologiques, mais aussi des propriétés des milieux externes au sol (nature de la roche, occupation du sol, pente, etc.) et des propriétés physiques et chimiques des déchets à épandre.

L'aptitude des sols du territoire de Dijon à l'épandage de déchets organiques de type liquide

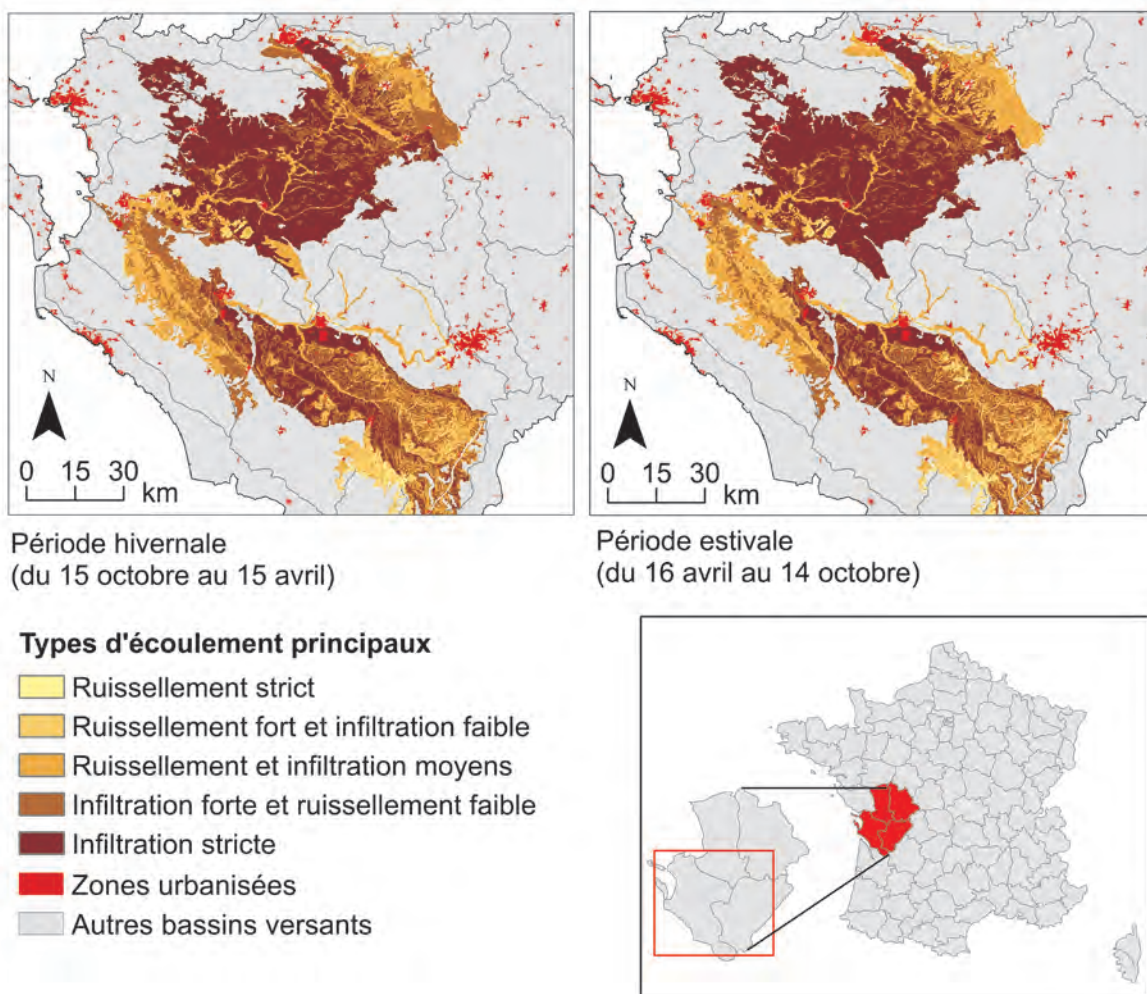


Source : © IGN, BD Carto ©, 2006.; d'après Crampon N., 2006.

Le sol a également un pouvoir filtrant qui limite les transferts des éléments et de leurs sous-produits de dégradation vers les autres milieux. Le pouvoir filtrant vis-à-vis des eaux souterraines ou superficielles est ainsi évalué en estimant la sensibilité du sol à l'infiltration ou au ruissellement des éléments. Les propriétés pédologiques à considérer sont : la battance des sols (sensibilité des sols à la fermeture de la porosité en surface, avec formation d'une croûte réduisant l'infiltration de l'eau),

la teneur en éléments grossiers, la texture (teneur en argiles, limons et sables) de surface, la structure, l'excès d'eau, la présence d'un plancher imperméable, la vitesse de percolation dans le substrat et la réserve utile en eau. La prise en compte de ces propriétés correspond à la première étape de la démarche d'estimation de la vulnérabilité des eaux aux transferts d'éléments provenant de la surface, en distinguant les types d'écoulement principaux à partir du sol.

Le pouvoir filtrant des sols et les types d'écoulement principaux sur trois bassins versants tests de la région Poitou-Charentes



Source : GRAP PC, CRA PC, SRTM (NGA-NASA), Inra Orléans, 2008.

Ces propriétés pédologiques sont ensuite associées à des propriétés externes au sol permettant d'apprécier les facteurs aggravants de l'infiltration ou du ruissellement des éléments (densité du réseau hydrographique,

épaisseur de la zone non saturée, pluies efficaces, etc.), et aux propriétés des éléments transférables, afin d'aboutir à l'estimation de la vulnérabilité des eaux aux transferts de polluants.

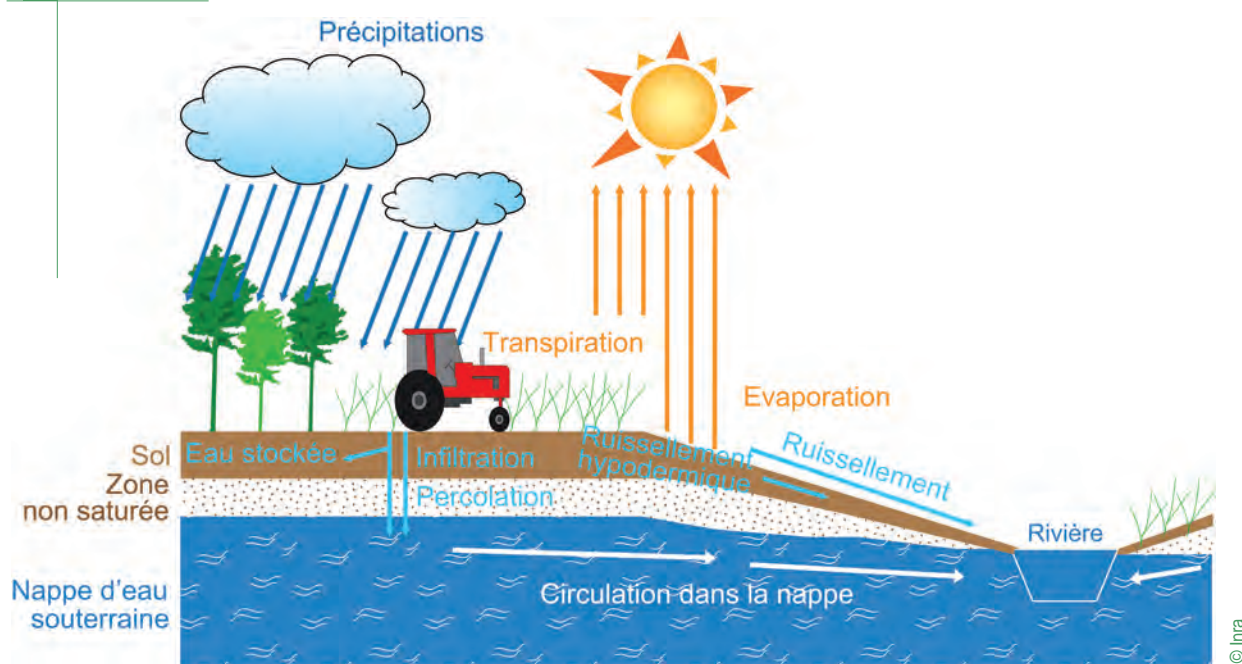
Le sol et la réserve en eau : le rôle des zones tampons

Le sol joue un rôle prépondérant dans le cycle de l'eau. Il constitue une réserve en eau pour les plantes et les êtres vivants présents dans le sol. Il est au cœur des transferts d'eau entre l'atmosphère, les nappes d'eau souterraine et les cours d'eau. Certains sols, situés dans les zones humides ont, du fait de leur possibilité de réserve en eau importante, un rôle de zones tampons vis-à-vis des écoulements d'eau.

Les propriétés du sol déterminent en grande partie la part des eaux de pluie qui ruisselle à la surface du sol

et rejoint les eaux de surface, et la part qui s'infiltrate dans le sol. Cette dernière est stockée dans le sol.

Le cycle de l'eau



La capacité de stockage en eau, ou réserve en eau d'un sol représente la quantité totale d'eau qu'un sol peut stocker. Cette eau n'est pas liée au sol de manière irréversible. Elle alimente en eau les plantes et l'ensemble des êtres vivants présents dans le sol. Cependant, la végétation ne peut utiliser qu'une partie de l'eau stockée dans le sol : la réserve utile en eau. La réserve en eau d'un sol comme sa réserve utile dépendent de la texture, de la structure et de la profondeur du sol, et de sa profondeur d'enracinement maximale. Ainsi, un sol limoneux de 1,20 m d'épaisseur peut contenir 380 mm d'eau, soit une proportion importante de la pluviométrie annuelle en climat tempéré. Sur ces 380 mm, seuls 250 mm sont accessibles à la végétation. Pour un sol sableux de même épaisseur, la réserve en eau est de 130 mm et sa réserve utile de 80 mm. Les sols à réserve utile importante présentent donc moins de risque de sécheresse pour les cultures, d'où un recours moindre à l'irrigation sur ces sols.

Une partie de l'eau stockée dans le sol retourne vers l'atmosphère, soit par évaporation à partir de la surface

du sol, soit par transpiration par les végétaux. Enfin, sous l'effet de la gravité, une partie de l'eau percole progressivement vers le sous-sol. Elle contribue alors à recharger en eau les nappes d'eau souterraine, ou s'écoule latéralement sous la surface du sol (ruissellement hypodermique) vers les cours d'eaux.

Certains sols peuvent jouer le rôle de zones tampons en régulant les écoulements hydrologiques. En effet, dans les zones humides, les sols ont un plancher imperméable ou une nappe d'eau à faible profondeur qui empêche l'eau s'infiltrant dans le sol de s'écouler par gravité. Situés dans les bas-fonds, ces sols forment ainsi des réservoirs d'eau importants. Ils agissent ainsi comme des éponges, en absorbant momentanément les excès d'eau de pluie ou de ruissellement, pour les restituer progressivement dans le milieu naturel, lors des périodes de sécheresse. Ils diminuent ainsi l'intensité des crues et soutiennent les débits des cours d'eau en période d'étiage.



Un FLUVIOSOL BRUT sur les berges du Loiret (Loiret).



Un sol de tourbière soligène (issue du ruissellement ou de la percolation des eaux sur des pentes, ou de sources) : HISTOSOL composite, soligène, à matériaux terreux, au-dessus d'un REDUCTISOL issu de moraine (Saint-Martin-Vésubie – Alpes-Maritimes).

La régulation des flux de gaz à effet de serre par le sol

Les sols jouent un rôle important dans la régulation des flux de gaz à effet de serre. Ce sont les organismes du sol, particulièrement sensibles aux conditions du milieu et à leurs variations, qui sont impliqués dans les processus d'émission ou d'absorption.



© J.-M. Barbier, Inra

Une rizière au stade de la levée du riz en Camargue.

L'effet de serre est un phénomène naturel correspondant à l'absorption par l'atmosphère du rayonnement solaire réfléchi par la surface terrestre. Il est amplifié par les activités humaines libérant des gaz à effet de serre (GES). Parmi eux, le dioxyde de carbone (CO_2) contribuerait à 60 % de l'effet de serre additionnel, le méthane (CH_4) à 20 % et le protoxyde d'azote (N_2O) à 6 %. Si la combustion de carburants fossiles est à l'origine de la majorité des émissions de CO_2 d'origine anthropique les sols seraient par contre à l'origine d'un tiers des émissions planétaires de méthane et des deux tiers de celles de N_2O . Toutefois, les sols interviennent sur la régulation des flux de GES en stockant du carbone et en absorbant du méthane.

Les stocks de carbone organique dans la couche superficielle (0-30 cm) des sols métropolitains sont évalués à environ 3 milliards de tonnes. Les sols représentent un compartiment majeur du cycle global du carbone. Le carbone organique contenu dans les végétaux provient de la photosynthèse qui absorbe du CO_2

atmosphérique. Ce carbone est le constituant principal des matières organiques des sols, qui proviennent principalement de la décomposition des végétaux. Ces matières organiques sont ensuite biodégradées plus ou moins rapidement sous l'action des micro-organismes du sol en fonction des conditions du milieu, des usages et des pratiques agricoles. Cette dégradation produit du CO_2 qui est émis en retour dans l'atmosphère. Toute modification de ce cycle entraîne une variation, positive ou négative, des stocks de carbone des sols. Ceux-ci peuvent donc constituer un puits ou une source de CO_2 atmosphérique. Ainsi, la minéralisation des matières organiques du sol sous l'effet de changements d'occupation ou d'usage (déforestation, retournement de prairies, etc.) peut être à l'origine de flux très importants de CO_2 vers l'atmosphère.

Le méthane est produit par certains micro-organismes dans les sols submergés (prairies humides, tourbières, rizières, etc.) par transformation des matières organiques en l'absence d'oxygène. Dans les sols exondés, d'autres

micro-organismes absorbent le méthane atmosphérique et le transforment en CO_2 en présence d'oxygène. Ces deux types de micro-organismes sont présents dans les sols submergés et par conséquent un fort pourcentage de méthane produit dans les zones sans oxygène est en fait ré-oxydé dans les zones oxygénées, limitant ainsi les émissions de méthane vers l'atmosphère pour ces sols.

Le protoxyde d'azote est émis par les sols lors de la dénitrification ou de la nitrification, deux processus majeurs du cycle de l'azote dans le sol. La dénitrification apparaît dans des sols appauvris en oxygène lorsque certaines populations microbiennes modifient leur respiration en utilisant les ions nitrate et nitrite du sol à la place de l'oxygène. En conditions de bonne aération, d'autres micro-organismes oxydent l'ammonium en nitrites puis

en nitrates : c'est la nitrification. Le protoxyde d'azote peut apparaître comme sous-produit de ces deux processus.

Les caractéristiques du milieu et leurs variations spatio-temporelles influencent l'activité des microorganismes impliqués dans les émissions de GES par les sols. Les conditions d'aération des sols, conditionnées par le climat, les pratiques agricoles et le fonctionnement hydrique des sols sont déterminantes sur le fonctionnement de ces processus et l'intensité des émissions de méthane et de N_2O .



© Antonio Bispo, Ademe

Une tourbière.

Le sol, réservoir de biodiversité

S'il est désormais bien établi que la nature du sol détermine la diversité des espèces végétales et animales s'y développant, il est peu connu qu'une biodiversité importante réside également dans les sols eux-mêmes. Cette fraction oubliée pourrait représenter selon certaines estimations un quart de la biodiversité mondiale.

Les liens entre la nature des sols et la diversité végétale et animale sont étudiés et identifiés depuis longtemps. Ainsi, il est connu que certaines espèces végétales sont plus fréquentes voire même inféodées à des milieux très particuliers. C'est par exemple le cas pour les prairies sèches calcaricoles abritant des Orchidées, ou les tourbières favorisant le développement des Drosera. Ces liens entre espèces végétales et milieux peuvent même être si étroits que certaines espèces végétales sont utilisées comme indicatrices de paramètres physico-chimiques du sol, tels que le pH. De même, la distribution des vertébrés terrestres est également influencée par les caractéristiques des sols, qui peuvent constituer un abri ou un milieu de vie pour de nombreux animaux. Les caractéristiques de texture (teneurs en argiles, limons, sables), de réserve en eau et de pierrosité des sols déterminent par exemple l'habitat de certaines espèces protégées ou menacées comme le Pélobate brun dans l'Indre ou le Grand Hamster en Alsace.

Si ces liens entre la biodiversité terrestre « visible » et le sol sont connus, personne ne soupçonne la considérable biodiversité cachée dans les sols, que ce soit en nombre d'individus ou d'espèces. Ainsi, une cuillère à café de sol peut contenir plusieurs millions de micro-organismes répartis en plusieurs milliers d'espèces différentes, et un hectare de prairie peut abriter plus d'une tonne et demie de vers de terre. La diversité des organismes du sol est telle que la plupart des grands groupes taxonomiques peuvent y être identifiés, même si la connaissance de ces groupes est encore peu étendue. En effet, pour certains d'entre eux, on estime qu'à peine plus de 1 % des espèces est actuellement identifié (Decaens, 2010) !

Pourtant, les rôles exercés par les organismes du sol sont identifiés depuis très longtemps. Darwin a été l'un des premiers à caractériser et à quantifier l'action des vers de terre sur la formation des sols. En outre, les nombreuses actions des organismes du sol permettent à celui-ci d'assurer certains services qu'il rend à l'Homme. Par exemple, les bactéries et les champignons des sols dégradent les matières organiques, restituant ainsi aux plantes les nutriments nécessaires à leur croissance.



Une *Ophrys abeille* (*Ophrys apifera*).

© Antonio Bispo, Ademe

Les nématodes régulent les populations de micro-organismes, tandis que les vers de terre structurent les sols. Enfin, le sol est également un fournisseur de médicaments : actuellement de nombreux antibiotiques présents sur le marché sont issus de bactéries du sol.

Alors qu'elle reste encore méconnue et qu'elle est le moteur du fonctionnement des cycles du carbone et de l'azote, cette fraction de la biodiversité terrestre est de plus en plus menacée par l'accroissement des pressions exercées par le changement climatique et les activités humaines. Parmi ces dernières, l'artificialisation et l'imperméabilisation des terres, les modes de gestion agricole et forestière et la contamination des sols sont les plus conséquents. Les organismes des sols, leurs relations et leurs activités doivent être mieux considérés, car ils sont une voie d'avenir pour maintenir la production agricole tout en limitant les intrants (ex : engrais, produits phytosanitaires).



© Antonio Bispo, Ademe

Une Rossolis à feuilles rondes (*Drosera rotundifolia*).



© Antonio Bispo, Ademe

Un *Lumbricus terrestris* sur un sol en Bretagne.

- Aucante P., 2010. « La brique de Sologne », dans *Géosciences pour une Terre durable*, 2010. « La Loire, Agent géologique ». *Géosciences*, n°12, décembre 2010. 132 p. pp. 27.
- Cellule économique régionale des transports d'Aquitaine, 2005. *Le transport de granulats en Aquitaine : coûts directs et indirects par route, fer, mer et voie fluviale*. Compte-rendu de la réunion Certa-Cebatrama du 13 décembre 2005. 4 p.
- Cheverry C. et Gascuel C., 2009. *Sous les pavés, la terre : connaître et gérer les sols urbains*. Montreuil : Omniscience. 208 p. (coll. Écrin).
- Crampon N., 2006. Estimation de l'aptitude à l'épandage d'effluents organiques sur les sols à partir de bases de données géographiques. Mémoire de Master 2, Univ. Orléans, Inra InfoSol. 35 p.
- Decaens T., 2010. Macroecological patterns in Soil communities. *Global Ecology and Biogeography*, (2010) 19, 287–302.
- Deffontaines J.-P., Ritter J., Deffontaines B. et Michaud D., 2006. *Petit Guide de l'observation du paysage*. Paris : Inra, Éditions Quæ. 31 p.
- Girard M.-C., Walter C., Rémy J.-C. et al., 2011. *Sols et environnement*. 2^e édition. Paris : Dunod. 881 p. (coll. Sciences sup).
- Hénaut C. et Gabriel B., 2011. Chapitre 14 : *Les émissions par les sols des gaz à effet de serre CH₄ et N₂O*, dans Girard M.-C. et al., 2011. *Sols et environnement*. 2^e édition. Paris : Dunod. 881 p. (coll. Sciences sup).
- Inra, 2009. *Le sol*. Paris : Inra. 183 p. (coll. Dossier Inra).
- 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.
- Koller R., Sauter J., Pierrillas S. et Viot M., 2004. « Classification des bassins versants alsaciens en fonction de leur sensibilité aux produits phytosanitaires », *Étude et Gestion des Sols*, 11(3), 2004. pp. 219-234.
- Medd, 2003. *Le drainage dans le marais poitevin*. Rapport IGE/03/043. 42 p.
- Miskovsky J.-C., 2002. *Géologie de la préhistoire*. Paris : Association pour l'étude de l'environnement géologique de la préhistoire. 1 519 p. (coll. Géopré, Presses Universitaires de Perpignan).
- Querrien A., Moulin J., 2009. « La connaissance des sols et les aménagements du paysage au Moyen Âge : l'apport de la carte pédologique », dans Association française pour l'étude des sols, 2009. *Actes des 10^e Journées d'Étude des Sols*, 11 au 15 mai 2009, Strasbourg, pp. 43 à 44.

- Service de l'Observation et des Statistiques, 2009. « La France vue par CORINE Land Cover, outil européen de suivi de l'occupation des sols ». *Le point sur*, n° 10, avril 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.
- Union nationale des industries de carrières et matériaux de construction, 2007. *Statistiques 2007 de l'Union Nationale des Industries de Carrières et Matériaux de Construction*. 47 p.
- Union nationale des producteurs de granulats, 2011. *Livre blanc - Carrières et granulats, pour un approvisionnement durable des territoires*. Paris : UNPG. 132 p.
- Union nationale des producteurs de granulats, 2006. *Les granulats : géologie, industrie, environnement*. Dossier réalisé dans le cadre de la Convention générale de Coopération signée avec le ministère de l'Éducation nationale, de l'Enseignement supérieur et de la Recherche et l'Unicem. 31 p.

Liens

- Cellule Économique du Bâtiment, des Travaux Publics et des Matériaux de Construction d'Aquitaine : <http://www.cebatrama.org/> rubrique « Publications » > « Les transports de granulats en Aquitaine (publication 2006) »
- Conseil de l'Europe, Convention européenne du paysage : <http://www.coe.int/> rubrique « Culture, patrimoine, nature » > « Développement durable » > « Textes de référence » > « Convention européenne du paysage »
- Dinoplage, sur les traces des géants : <http://www.dinoplagne.com/>
- Fédération Française des Tuiles et Briques : <http://www.fttb.org/>
- Groupement d'intérêt public Bretagne environnement : <http://www.bretagne-environnement.org/>
- Groupement d'Intérêt scientifique Sol : <http://www.gissol.fr/>, rubrique « Actualité » > « Publications » > « Connaître les sols pour préserver la ressource en eau. Guide d'application à l'échelle d'un territoire »
- Miruram Valpedo – Base de données sols des régions méditerranéennes et tropicales Valsol : <http://miruram.mpl.ird.fr/>
- Sol Info Rhône-Alpes : <http://www.rhone-alpes.chambagri.fr/sira/>
- Sols et Territoires de Bourgogne : <http://stb.educagri.fr/>
- Union nationale des industries de carrières et matériaux de construction : <http://www.unicem.fr/>

La diversité des sols de France



Photo 1 : © Laëtitia Chegard, CDA Manche
Photos 2, 5, 7, 23, 24 : © Christian Barneoud, GRAPE
Photo 3 : © Sandrine Renault, CDA Aube
Photos 4, 8, 12, 13, 18, 20, 21, 22 : © Claudy Jolivet, Inra
Photos 6, 10, 15, 25 : © Jean-Luc Giteau, CDA Côtes-d'Armor

Photo 9 : © Thierry Peloquin, CDA Deux-Sèvres
Photo 11 : © Aurore Toiser, Ensa de Toulouse
Photos 14, 17 : © Jean-Claude Lacassin, Société du Canal de Provence
Photo 16 : © Francis Michel, Solest
Photo 19 : © Line Boulonne, Inra

Les sols forment une couverture quasi continue des terres émergées. Ils se sont développés aux dépens du substrat géologique, sous l'influence du climat, de la topographie et des êtres vivants.

La grande variété des situations qui ont présidé à leur formation a généré une grande diversité naturelle des sols.

Ainsi, deux grands traits de diversité caractérisent les sols, d'une part leur organisation verticale, et d'autre part leur organisation spatiale. La cartographie des sols a justement pour vocation d'inventorier cette diversité et de la restituer dans toute sa complexité. Elle fournit à tous les acteurs du sol, agriculteurs, forestiers, aménageurs, non seulement une information sur la localisation des sols dans l'espace mais également sur leurs caractéristiques et leurs propriétés.

Parmi ces propriétés, certaines peuvent évoluer en fonction du temps et sous l'action de l'Homme. D'autres sont considérées comme plus pérennes. C'est le cas de la profondeur et de certains constituants du sol (argiles, limons, sables, cailloux, minéraux et éléments majeurs) directement hérités de la roche dans laquelle le sol s'est développé ou des processus de formation du sol. L'étude des propriétés du sol permet de définir les origines du sol et sert aussi à expliquer les évolutions des autres propriétés du sol moins pérennes. Elle est également primordiale pour déterminer les aptitudes des sols à remplir leurs fonctions productives ou environnementales.

La diversité des sols de France

35 La diversité naturelle des sols de France

- 36 • Les conditions de formation des sols
- 38 • La répartition des sols à différentes échelles

44 Les principales caractéristiques des sols

- 45 • La profondeur des sols
- 49 • La texture des sols
- 53 • La pierrosité des sols
- 54 • L'eau dans les sols
- 58 • La minéralogie des sols
- 62 • Les carbonates dans les sols
- 64 • Les éléments majeurs totaux des sols

La diversité naturelle des sols de France

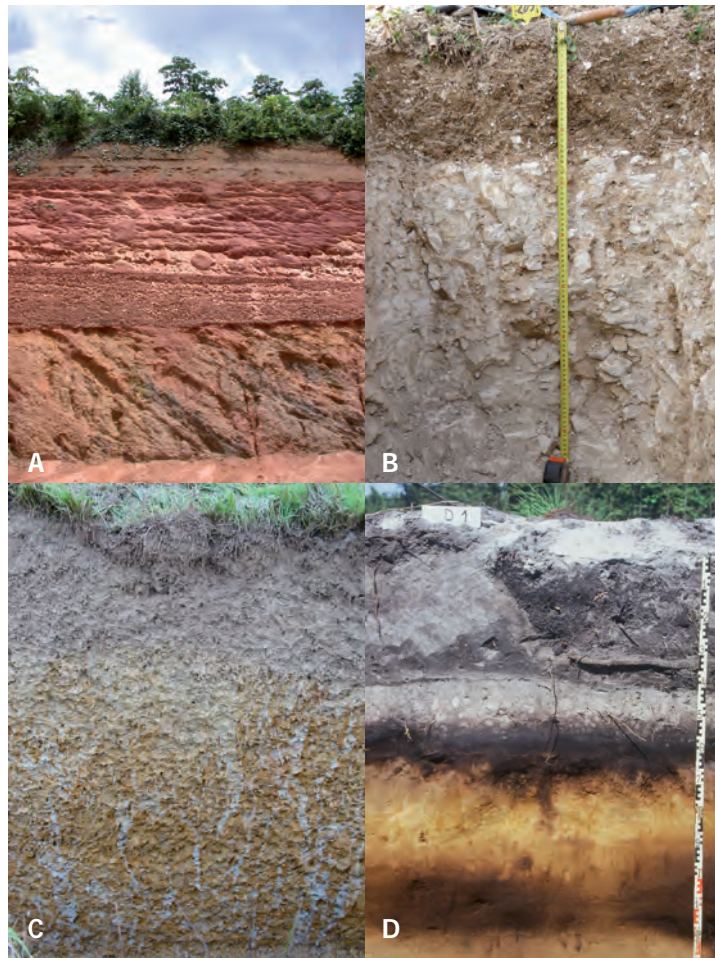
Les sols se forment aux dépens du substrat géologique, sous l'influence du climat, de la topographie et des êtres vivants. La formation des sols nécessite plusieurs milliers d'années, ce qui les rend non renouvelables à l'échelle de l'Homme. La grande variabilité des situations présidant à leur formation a généré une diversité naturelle des sols, dont la cartographie essaie de rendre compte.

La diversité des sols est liée à la diversité des facteurs de leur formation. En effet, les sols sont issus de l'altération des roches affleurant à la surface du globe. Selon leur nature et leur origine, ces roches subissent des processus d'altération différents et plus ou moins marqués donnant naissance à des sols variés.

Mais une même roche ne s'altère pas de la même façon selon le climat. De plus, en favorisant le départ ou l'accumulation de matières, le relief a également une action prépondérante. Enfin, l'activité biologique, par l'apport de matières organiques issues essentiellement de la décomposition des végétaux et par la modification de l'assemblage des constituants du sol, joue elle aussi un rôle primordial dans la formation des sols.

Les sols actuels sont issus de plusieurs milliers d'années d'évolution, voire plusieurs centaines de milliers dans certaines zones tropicales. Selon l'âge des sols, différents stades d'évolution sont atteints et produisent, là encore, une grande diversité.

Cette diversité génère des sols de couleurs, de consistances et de textures différentes. Ces sols présentent des propriétés physiques ou chimiques variables, les rendant plus ou moins aptes à remplir leurs fonctions. La connaissance de cette diversité naturelle devient alors indispensable pour une gestion durable des sols et de l'environnement.



Une illustration de la diversité des sols :

A. Un FERRALLITISOL (Guyane)

© Michel Brossard, IRD

B. Un CALCOSOL (Ardennes)

© Francis Michel, Solest

C. Un REDOXISOL (Nièvre)

© Arnaud Vautier, CDA Nièvre

D. Un PODZOSOL (Gironde)

© Claudy Jolivet, Inra

Cette diversité n'est pas le fruit du hasard. Elle est organisée selon les facteurs de formation des sols. Les cartes de sols s'établissent donc sur cette base et permettent d'appréhender la diversité spatiale des sols d'un territoire.

■ Les conditions de formation des sols

Les sols se forment à partir des roches présentes à la surface des continents. Les grands traits de leur formation sont assujettis à trois grands types de mécanismes : l'altération de la roche, l'incorporation de matières organiques, et la redistribution, la migration et l'accumulation de matières au sein du volume du sol.

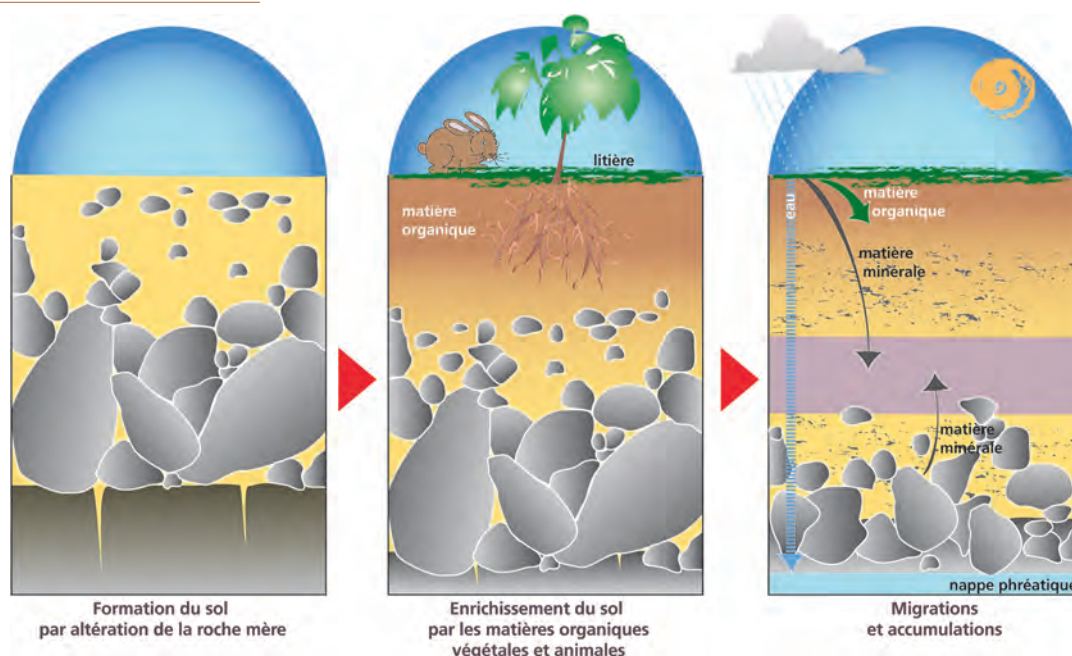
Ces mécanismes conduisant à la différenciation des sols sont étroitement imbriqués dans l'espace et au cours du temps. Le sol s'approfondit à sa base par altération de la roche, perd de la matière par drainage, mais aussi en surface par ruissellement et érosion.

Les conditions de régulation de ces processus dépendent du temps d'action des phénomènes, de la nature des roches (selon qu'elles sont plus ou moins « décomposables » face à un même facteur physico-chimique), du climat local et de l'activité biologique. La nature et la concentration des substances chimiques en solution qui traversent les roches en cours d'altération, et les conditions locales du relief régulant les écoulements superficiels et souterrains de l'eau agissent aussi sur ces conditions.

L'altération de la roche débute par sa désagrégation et se poursuit par la transformation de ses minéraux en argiles. Toute roche soumise aux conditions du climat ambiant subit, sous l'action des eaux de percolation et du gaz carbonique, une désagrégation physique et une altération chimique. La roche subit ainsi une transformation partielle ou totale, son volume original étant ou non conservé. Une partie des minéraux primaires qui la constituent disparaît, soit par dissolution et évacuation par les eaux de drainage, soit par transformation en nouveaux minéraux. Tant que la roche d'origine est encore reconnaissable, le résultat de cette altération est appelée altérite.

L'incorporation de matières organiques et l'action biologique (faune, micro-faune et micro-organismes, végétation) affectent en continu les processus, et laissent une empreinte forte dans la partie supérieure des sols. Parallèlement, la formation de minéraux s'accompagne ou est suivie de la redistribution de matières, oxydes et oxyhydroxydes de fer, d'aluminium et de manganèse, de matières organiques. La roche n'est alors plus reconnaissable.

Les étapes de la formation du sol



Sous les climats tempérés et tempérés-atlantiques, le temps de formation des sols est borné par l'extension de la dernière glaciation. Les sols y sont relativement jeunes en comparaison de ceux d'autres régions du globe. Sous climat tropical, les temps de formation

peuvent être longs comme pour les sols du centre de la Guyane (centaines de milliers d'années). Mais ils peuvent aussi être très courts quand il s'agit de dépôts volcaniques récents sur les îles de la Guadeloupe, de la Martinique ou de La Réunion.

1 Les sols à pédogenèse particulière : les sols hydromorphes, les tourbes, les sols salés



Un REDUCTISOL salé (Bouches-du-Rhône).

Des évolutions particulières de pédogenèse existent en fonction de conditions locales, soit par accumulation ou rétention d'eau, soit par accumulation de sels. Ainsi, lorsque les mécanismes de drainage sont déficients, ou bien lorsque les sols sont soumis en permanence à une nappe phréatique affleurante, les sols sont dits hydromorphes. Le fer se trouve sous forme réduite par manque d'oxygène, et les horizons présentent des teintes bleu-vert caractéristiques. Lorsque la hauteur de la nappe s'abaisse et que les horizons peuvent se ré-oxyder, les oxydes de fer se déposent et donnent au sol toute une série de teintes rouge à rouille.

Dans certains cas, cette hydromorphie peut empêcher les matières organiques de se décomposer. L'accumulation de couches successives de débris aériens et de racines produits par les plantes entraîne la formation de tourbe. Parmi les tourbes, plusieurs mécanismes principaux peuvent être distingués. Dans les vallées alluviales, la nappe phréatique affleurante et ayant de faibles oscillations est à l'origine de l'hydromorphie. En milieu humide et froid, sur des matériaux acides localisés dans des dépressions mal drainées, ce sont plutôt les eaux pluviales qui s'accumulent. Enfin, dans les zones boréales, c'est plutôt le froid qui empêche la décomposition des matières organiques. En France, la localisation des tourbières est mal connue car elles occupent souvent des surfaces réduites.

Certains sols sont très riches en sodium soit par présence d'une nappe d'eau salée (sols de bord de mer), soit parce que la roche d'origine est elle-même riche en sodium. Le sodium étant très mobile, il est généralement éliminé par drainage. Mais si le climat est trop sec ou si l'apport en sodium est régulier (cas des sols de bord de mer), le sodium subsiste dans les sols. Ceux-ci ont souvent un pH très élevé, une mauvaise structure, voire une dégradation des argiles qui peuvent être lessivées. Un cas particulier exemplaire est l'association de soufre et de fer dans des alluvions marines récentes. Les mécanismes peuvent conduire, en s'éloignant de l'influence de la nappe, au désalage relatif de la surface et à la différenciation de sulfures de fer. Ceux-ci produisent alors de l'acide sulfurique par oxydation. L'abaissement du niveau de la nappe dans des polders ou dans des conditions locales particulières de dynamique des nappes dans les mangroves sous les tropiques sont à l'origine de ce phénomène.

■ La répartition des sols à différentes échelles

La cartographie des sols est le moyen de définir l'extension géographique d'unités de sol à une échelle donnée. Opération de synthèse, elle détermine le modèle d'organisation spatiale des sols basé sur leurs facteurs de formation (géologie, climat, relief, végétation).

Elle permet de dresser des inventaires spatialisés des sols d'une région donnée et représente, par conséquent, un outil d'appui aux politiques publiques. Toutefois, selon l'échelle de la carte et ses objectifs, on distinguera soit les unités de sol seules, soit des regroupements d'unités de sol.

Ainsi, les petites échelles à vocation nationale ou continentale comme le 1/1 000 000 servent à des représentations d'ensemble à but scientifique et didactique. Elles sont également utilisées pour l'aide à la décision au niveau national ou européen. Les unités représentées sont des regroupements d'unités de sol. Par exemple, la carte des sols de France représente essentiellement la forte influence de la nature du matériel minéral dans lequel se sont formés et évoluent actuellement les sols. La répartition des types de sols est fortement marquée par la grande diversité des roches que l'on rencontre en France : les roches quartzitiques sableuses des Landes et de Sologne, les granites et granulites de Bretagne et des Vosges, les schistes des Alpes, de Bretagne et du Massif central, les calcaires durs du Bassin parisien et du Midi, les craies de Champagne, les marnes à l'Est et en Limagne, les basaltes du Massif central, les limons éoliens des Bassins aquitain et parisien et d'Alsace, les alluvions fluviales et fluvio-marines de Camargue et des marais de l'Ouest. Sur un tiers du territoire, les formations superficielles limoneuses se sont déposées sur des épaisseurs d'un demi à plusieurs mètres d'épaisseur. Ces limons datent de l'ère Quaternaire (entre -50 000 et -10 000 ans) et marquent les sols de Beauce, d'Île-de-France et de Picardie. Également présents en Bretagne, en Brie ou dans la vallée de la Garonne, ils ont des compositions variées du fait de leur origine éolienne, fluviale ou colluvionnaire.

Également aux petites échelles, les représentations au 1/250 000 synthétisent l'information importante pour une région, une portion de région ou un département. Ces représentations illustrent des faits marquants à prendre en compte dans ces territoires. Ainsi, la carte des sols de la Côte-d'Or au 1/250 000 permet de délimiter des unités cartographiques définies par une homogénéité des roches et du relief actuel qui leur est associé.

Aux échelles moyennes (du 1/50 000 au 1/100 000), les représentations cartographiques détaillent la distribution des sols avec plus de précision, en mettant en valeur les lois de distribution écologique des sols.

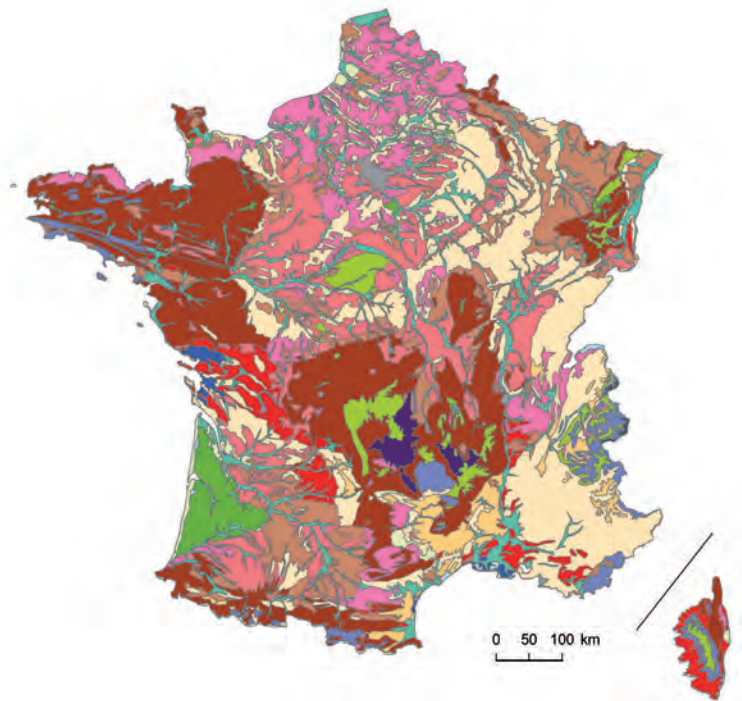
Les études détaillées du fonctionnement du sol et la définition des contraintes dans le cadre de stratégies de production ou de gestion locale s'effectuent à grande échelle (1/20 000 à 1/10 000).

Enfin, d'autres formes de représentation permettent de mieux définir les relations entre unités au sein du paysage. C'est le cas notamment des toposéquences illustrant les relations latérales entre les sols et les lithologies dans une portion de paysage.



© Anne Richer de Forges, Inra

L'organisation des sols et le micro-relief dans les sols sableux des Landes de Gascogne.



Sols des roches calcaires

- RENDOSOLS, CALCOSOLS, CALCISOLS et BRUNISOLS Eutriques
- LITHOSOLS calcaires, RENDOSOLS et RENDISOLS

Sols des matériaux sableux

- REGOSOLS et ARENOSOLS
- ALOCRISOLS et PODZOSOLS leptiques
- PODZOSOLS

Sols des matériaux argileux

- CALCISOLS, CALCOSOLS, BRUNISOLS Eutriques, PELOSOLS et VERTISOLS

Sols d'altération, peu différenciés

- BRUNISOLS Eutriques à Dystriques et ALOCRISOLS

Sols des formations limoneuses

- LUVISOLS Typiques et NEOLUVISOLS
- LUVISOLS rédoxiques, Dégradés et PLANOSOLS

Autres sols

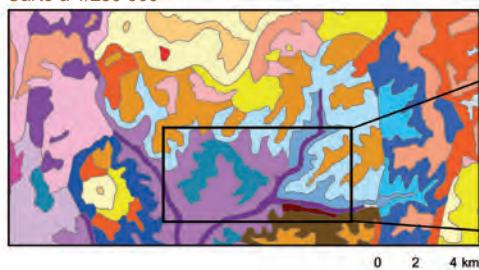
- ANDOSOLS
- FERSIALSOLS et BRUNISOLS fersiallitiques
- SALISOLS et SODISOLS
- FLUVIOSOLS et THALASSOSOLS
- LITHOSOLS et RANKOSOLS

Non sols

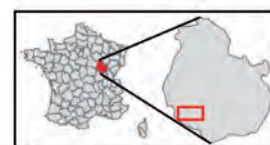
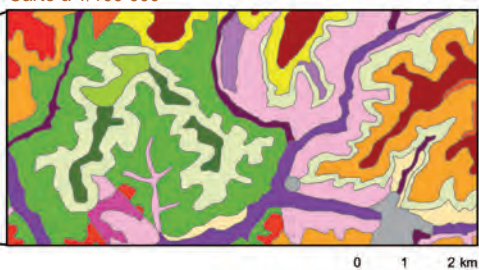
- Glaciers
- Villes
- Lacs

Source : Inra, Base de données Géographique des Sols de France à 1/1 000 000, 1998.

Carte à 1/250 000



Carte à 1/100 000



Les sols de Côte-d'Or vus à 1/250 000

Morvan

- Collines granitiques
- Placages résiduels marno-calcaires
- Collines sur formations volcaniques
- Fortes pentes boisées sur roches volcaniques
- Versants sur roches volcaniques

Auxois

- Plateaux résiduels de calcaire bajocien en dalles
- Pentés liasiques
- Replats domériens
- Piedmont et dépressions marneuses
- Limons
- Bas-fonds et dépressions
- Bas de plateaux

Pays d'Arnay

- Plateaux résiduels sur argile gréseuse et grès
- Surfaces résiduelles sur marnes et calcaires
- Plateaux résiduels de calcaires
- Pentés sur argile lourde et argile gréseuse
- Bas de versants sur formations gréseuses
- Pentés sur marne et calcaire
- Bas de versants granitiques

Bassin d'Épinac-Autun

- Bas de versants sur granite
- Pentés des contreforts sur argile gréseuse

Autres

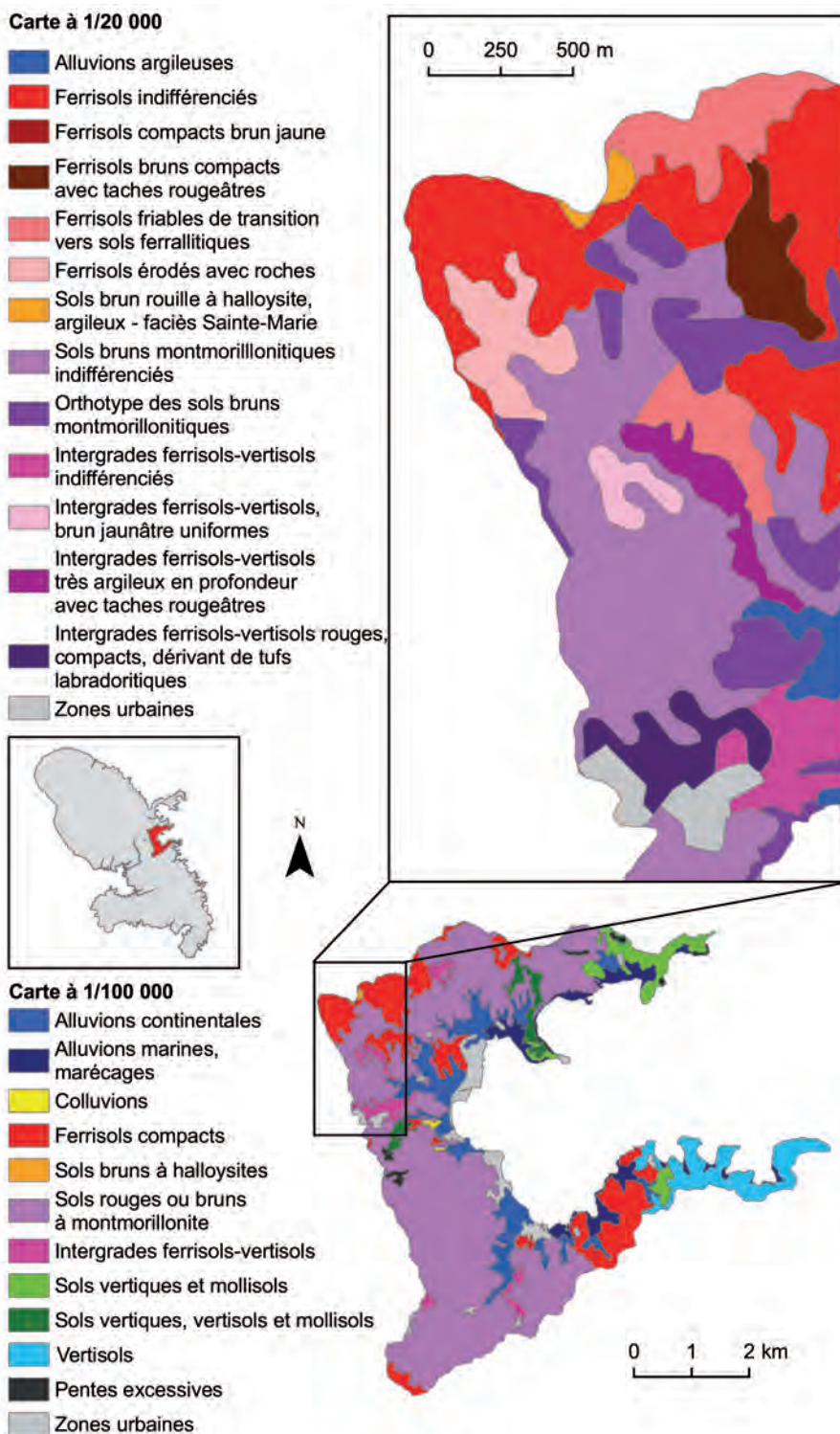
- Vallées
- Lacs, Etangs

Les sols de Côte-d'Or vus à 1/100 000

- Bordures de plateaux faiblement inclinés, cultivés, sur matériaux d'altération des calcaires
- Plateaux cultivés limono-argileux issus des formations sinémuriennes
- Replats sommitaux cultivés limoneux des bas plateaux sinémuriens
- Fonds de vallons et vallées, humides, inondables, des zones avales
- Fonds de vallons et vallées, humides, inondables, des zones amonts
- Versants et bas-fonds humides, argilo-limoneux sur granite ou roches volcaniques
- Versants hettangiens, localement calcaires, en prairies
- Hauts de versants sur grès et calcaires du Rhétien
- Faibles pentes sablo-argileuses issues de l'altération des grès rhétiens
- Petits replats sablo-argileux, souvent hydromorphes, du horst de Longecourt issus de grès
- Replats sommitaux ou faibles pentes issus des argiles gréseuses du Rhétien
- Bas de versants, hydromorphes en profondeur, au pied des fortes pentes, issus de colluvions granitiques
- Croupes et replats sablo-argileux à blocs de granite de la bordure morvandelle
- Replats sommitaux découpés, cultivés, sablo-argilo-limoneux issus de roches effusives
- Versants gravelo-caillouteux sur arène granitique et granite
- Versants forestiers, à forte pente, très gravelo-caillouteux, limono-argilo-sableux
- Massifs forestiers dominant la vallée de l'Arroux, majoritairement sableux, sur grès
- Villes

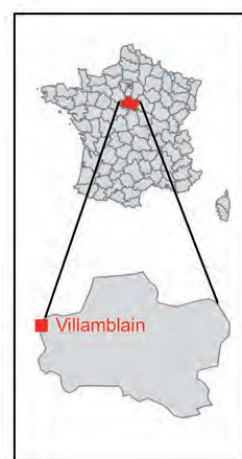
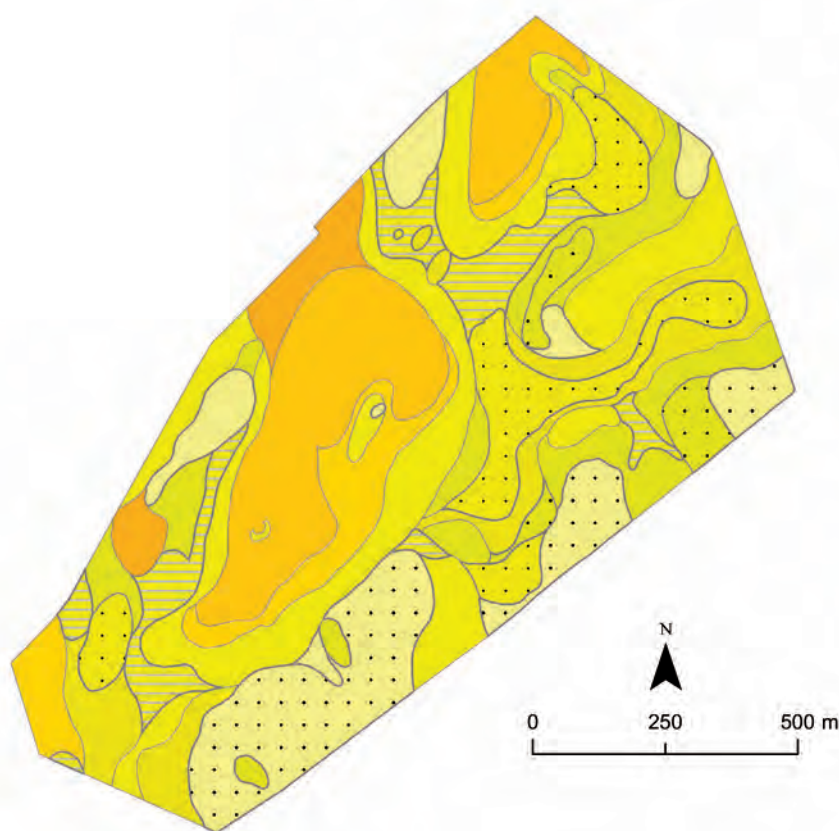
Sources : Inra, Chrétien J. et Meunier D., Référentiel Régional Pédologique de Côte-d'Or à 1/250 000, 1998 ; Inra-Enesad, Chrétien J., Fresse J.-C., Meunier D., Mori A., Vermé P., Carte pédologique de France : feuille de Beaune, 1996.

Note : Certains sols délimitables au 1/100 000 ne le sont plus au 1/250 000 et nécessitent d'être regroupés comme le montre l'exemple ci-dessus.














Source : IRD, Base de données Valsol de la Martinique à 1/20 000, d'après Colmet-Daage. 1969. Carte des sols des Antilles : Guadeloupe volcanique et Martinique au 1/20 000. Orstom Antilles, 2006.

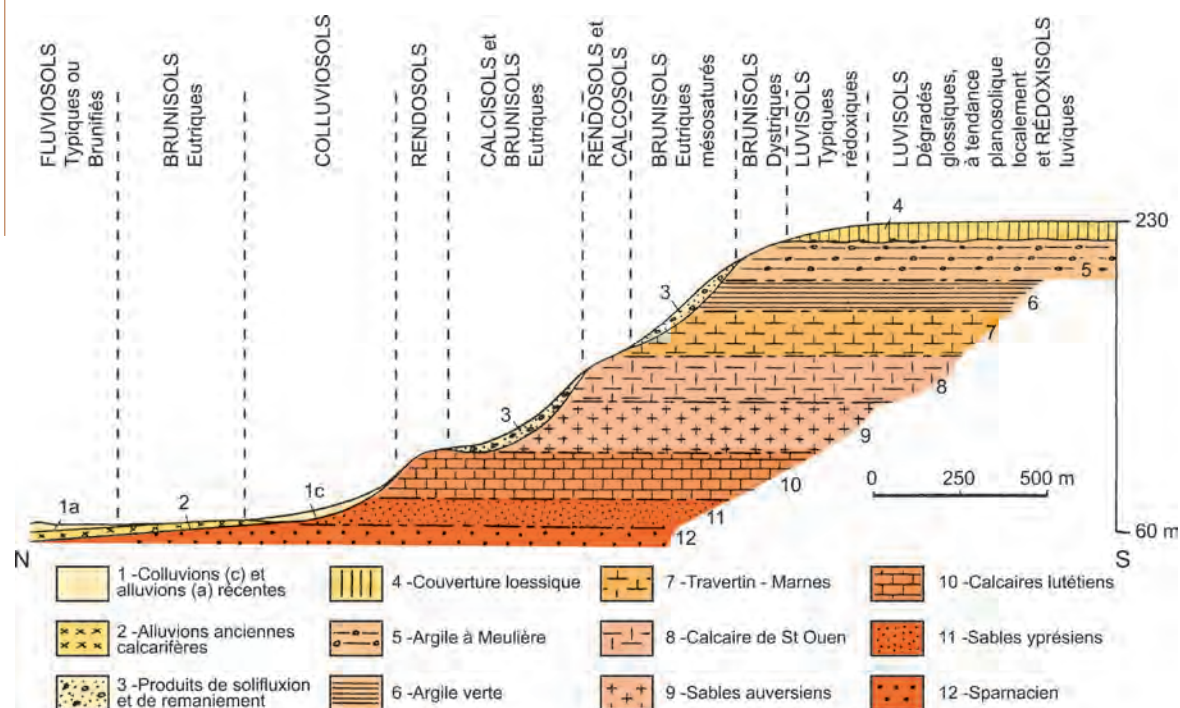
Note : Plus l'échelle de la carte est grande, plus les sols peuvent être délimités et décrits avec précision comme le montre l'exemple ci-dessus entre une carte à 1/20 000 et une synthèse cartographique à 1/100 000.



TYPE DE SOL

-  CALCISOLS développés sur matériau cryoturbé beige et gris
-  CALCISOLS développés sur matériau cryoturbé beige moyennement profond
-  CALCISOLS développés sur matériau cryoturbé beige peu profond
-  CALCOSOLS caillouteux développés sur calcaire dur
-  CALCOSOLS caillouteux développés sur calcaire gris
-  CALCOSOLS caillouteux développés sur calcaire tendre
-  CALCOSOLS développés sur calcaire dur
-  CALCOSOLS développés sur calcaire gris
-  CALCOSOLS développés sur calcaire tendre
-  CALCOSOLS développés sur matériau cryoturbé beige
-  CALCOSOLS développés sur matériau cryoturbé beige et gris

Source : Nicoulaud B., Couturier A., Beaudoin N., Mary B., Coutadeur C., King D., 2004. Modélisation spatiale à l'échelle parcellaire des effets de la variabilité des sols et des pratiques culturales sur la pollution nitrique agricole. In : Monestiez *et al.* (eds). Organisation spatiale des activités agricoles et processus environnementaux. Inra Éditions, Paris, France.



Source : Marcel Jamagne, 2011, *Grands paysages pédologiques de France*. Éditions Quæ.

Note : Sur le plateau, on trouve des sols lessivés ayant tendance à l'excès d'eau sur le loess. Sur le haut de versant, des sols brunifiés se sont développés dans les argiles et les marnes. Sur les calcaires de mi-pente, les sols présentent des phénomènes plus ou moins marqués de dissolution et de redistribution des carbonates. Dans le bas de la pente, les sols sont enrichis régulièrement par des colluvions. Enfin, la vallée est occupée par des sols alluviaux.

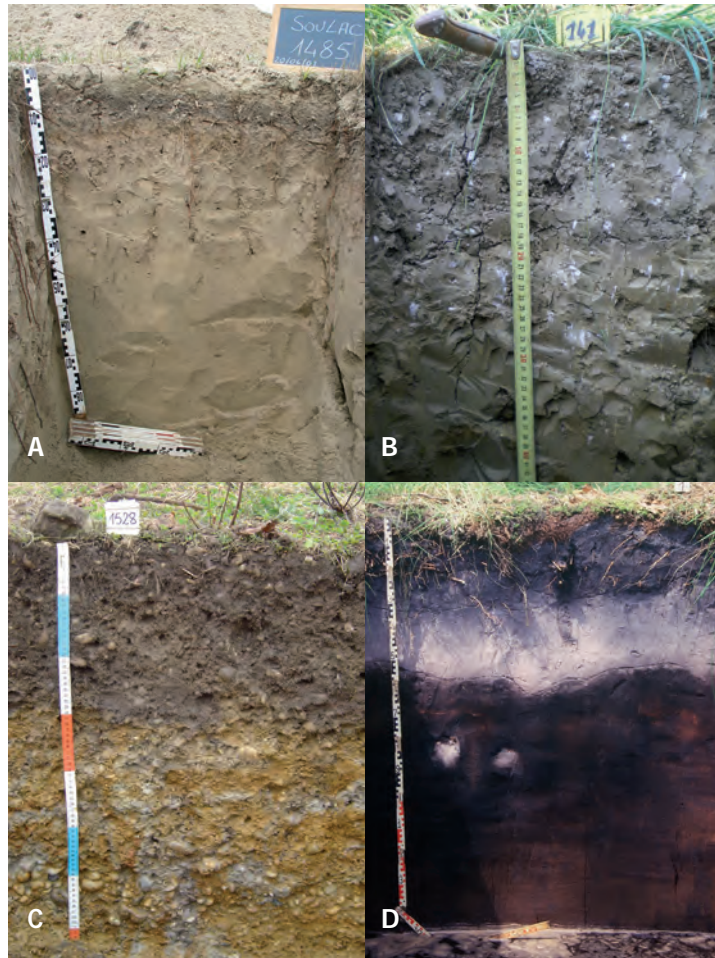
Les principales caractéristiques des sols

La variété des situations à l'origine de la formation des sols génère une forte diversité de leurs caractéristiques. Certaines d'entre elles peuvent évoluer sous l'action de l'Homme. D'autres évoluent peu mais leur connaissance est utile pour mieux gérer les sols et comprendre comment ils sont influencés par les activités humaines. Ces caractéristiques, considérées comme pérennes à l'échelle de l'Homme sont la profondeur du sol, la texture, la pierrosité, la minéralogie, les éléments majeurs.

Le sol est organisé à différentes échelles et constitué de particules minérales dont la taille et la nature diffèrent. Aux constituants minéraux s'ajoutent des constituants organiques dont le rôle est primordial. Les constituants du sol et leur organisation à diverses échelles déterminent les propriétés des sols. Définies par un ensemble d'observations, de descriptions et d'analyses, elles donnent une fiche d'identité au sol et conditionnent son comportement physique, chimique ou biologique.

Les caractéristiques les plus évidentes du sol concernent sa couleur, sa texture et sa structure. Les constituants organiques de couleur noire, les oxyhydroxydes de fer et de manganèse dans les teintes ocre à rouille, et le calcaire plutôt blanc se conjuguent pour donner sa couleur au sol. Sa texture repose sur l'appréciation du mélange des particules minérales de taille différentes constitutives du sol : les argiles, les limons et les sables (du micromètre à 2 mm). Enfin, la structure du sol résulte des différents modes d'assemblage des constituants organiques et minéraux. Elle correspond aux caractéristiques de taille, de forme et de netteté des fragments qui s'individualisent naturellement (du millimètre à plusieurs centimètres).

Les propriétés cristallochimiques des constituants minéraux ainsi que leur surface au contact de la solution du sol déterminent leur réactivité chimique. Cette réactivité varie en fonction du type de minéral argileux (particules de taille inférieure à 2 micromètres). Les particules de taille supérieure ont en général peu de réactivité. La réactivité, tant des particules minérales que des composés organiques et de leurs associations, est définie par la quantité et la nature des charges électriques. Les propriétés électrochimiques de ces constituants



Une illustration de la diversité des caractéristiques des sols.

A. Un ARENOSOL (Gironde)

© David Sardin, ENITA Bordeaux

B. Un CALCISOL argileux (Ardennes)

© Francis Michel, Solest

C. Un PEYROSOL (Gironde)

© David Sardin, ENITA Bordeaux

D. Un PODZOSOL durique (Gironde)

© Claudy Jolivet, Inra

régulent le comportement du sol en termes de mobilité, d'accumulation et de transfert des éléments minéraux ou des molécules qui circulent dans la solution du sol.

De taille plus importante, les limons et les sables constituent un squelette rigide et peu réactif. Leur assemblage détermine en partie les propriétés physiques des sols, notamment la mise en réserve et la circulation de l'eau et des gaz, ainsi que le comportement mécanique des sols.

■ La profondeur des sols

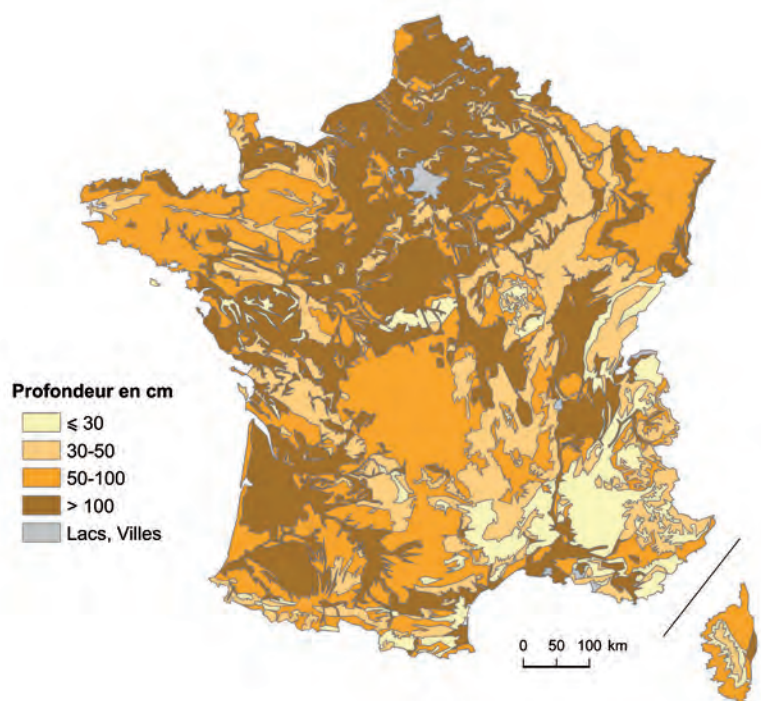
Le sol fournit et régule les ressources minérales et hydriques pour les plantes. Il participe à la recharge des nappes d'eau souterraines et joue ainsi un rôle de régulateur hydrologique. C'est également un système épura-
teur des eaux en retenant et en dégradant les éléments contaminants qu'elles contiennent.

De nombreuses propriétés du sol interviennent sur sa capacité à retenir l'eau ou à dégrader des polluants. Mais on oublie souvent que la profondeur du sol est l'un des facteurs les plus importants. En effet, plus le sol est profond, plus il peut stocker d'eau et d'éléments. La dégradation des contaminants est d'autant plus efficace que leur temps de résidence dans le sol est important. La connaissance de la profondeur du sol est donc essentielle à la fois pour connaître les aptitudes culturales des sols, mais également dans de nombreuses problématiques environnementales.

La profondeur du sol se définit comme la profondeur jusqu'à l'apparition de la roche non altérée. Le sol s'épaissit au détriment de la roche dans laquelle il se développe. Par conséquent, plus la roche est dure ou s'altère difficilement, moins le sol est épais. De même, plus le sol est ancien, plus il est épais. Ainsi les sols européens qui ont environ 10 000 ans sont plutôt de profondeur moyenne, tout au plus quelques mètres, alors qu'en zone tropicale les sols, plus anciens, peuvent atteindre plusieurs dizaines de mètres. L'épaisseur des sols varie également selon le régime climatique qui peut altérer les roches plus ou moins rapidement ou favoriser l'érosion.

Le relief est également un facteur important de variation de la profondeur du sol. Sur les pentes fortes, le départ de matières par érosion conduit à des sols peu épais. *A contrario*, les sols sont plus épais en bas de pente, là où les matières érodées se déposent.

La profondeur des sols en France métropolitaine



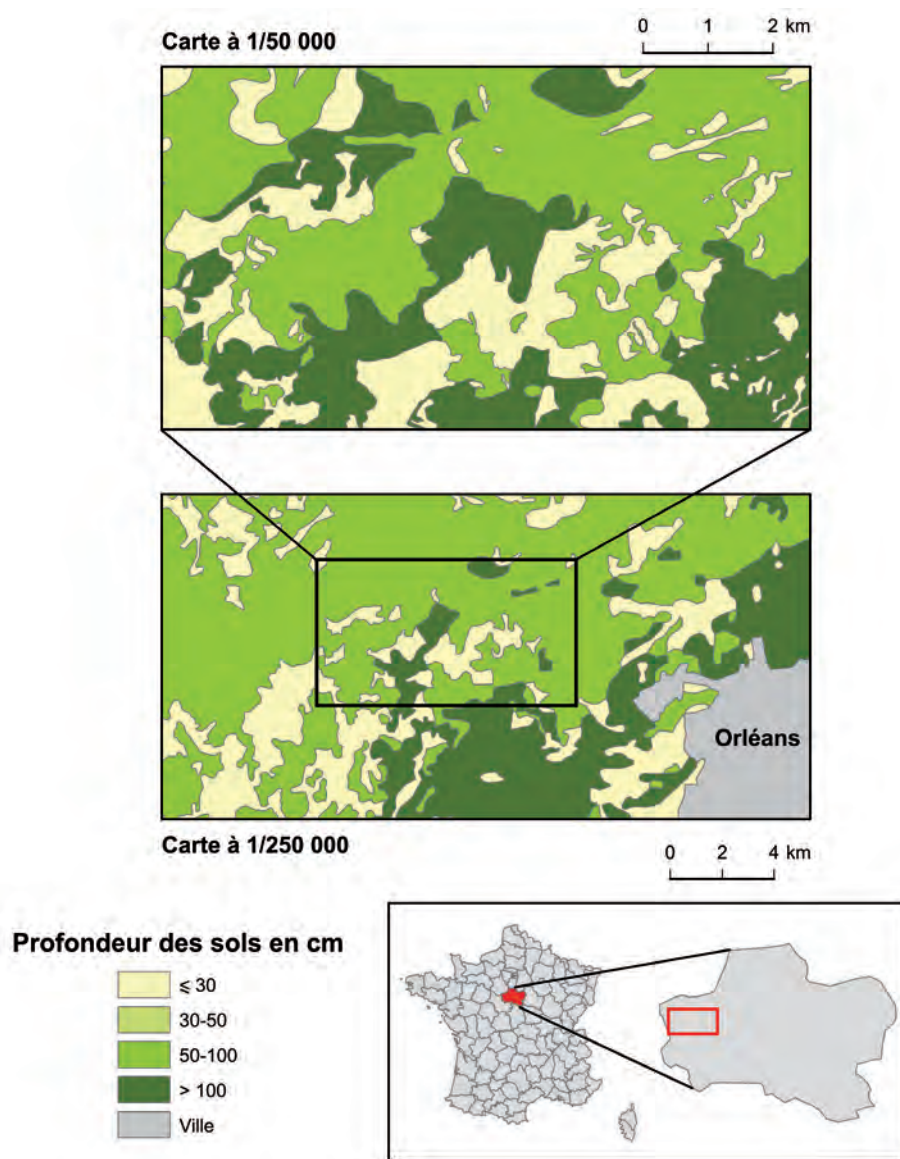
Source : Inra, Base de données géographique des sols de France à 1/1 000 000, 1998.

En France métropolitaine et à l'échelle nationale, la profondeur du sol varie surtout en fonction des roches à partir desquelles le sol s'est développé. Ainsi, les sols très profonds (plus de 100 cm) correspondent surtout aux formations limoneuses. Les sols profonds (50-100 cm) se situent surtout sur les grands massifs cristallins anciens (Massif armoricain, Massif central et Vosges), ainsi que dans le Bassin aquitain et en Champagne. Ils se sont développés sur des roches cristallines (gneiss, granite, micaschistes et schistes), sur les roches sédimentaires sableuses ou limoneuses, et sur la craie. Ces sols profonds à très profonds, favorables à l'agriculture, coïncident donc avec les zones les plus cultivées et représentent environ deux tiers des sols.

Les sols très peu profonds ne représentent que 10 % de la surface et les sols moyennement profonds 20 %. Ils sont localisés surtout dans le quart Sud-Est de la France et correspondent surtout à des sols développés sur des roches calcaires ou à des sols d'altitude.

À l'échelle régionale, la cartographie des sols permet de rendre compte d'une variabilité régionale de la profondeur du sol qui est déterminée davantage par la géomorphologie et le relief. Plus l'échelle de restitution cartographique est grande, plus il est possible de distinguer des types de sol. En conséquence, des variations de profondeur du sol peuvent apparaître sur une carte à grande échelle là où la profondeur semblait homogène à moyenne échelle.

La profondeur des sols du Loiret à 1/250 000 et à 1/50 000

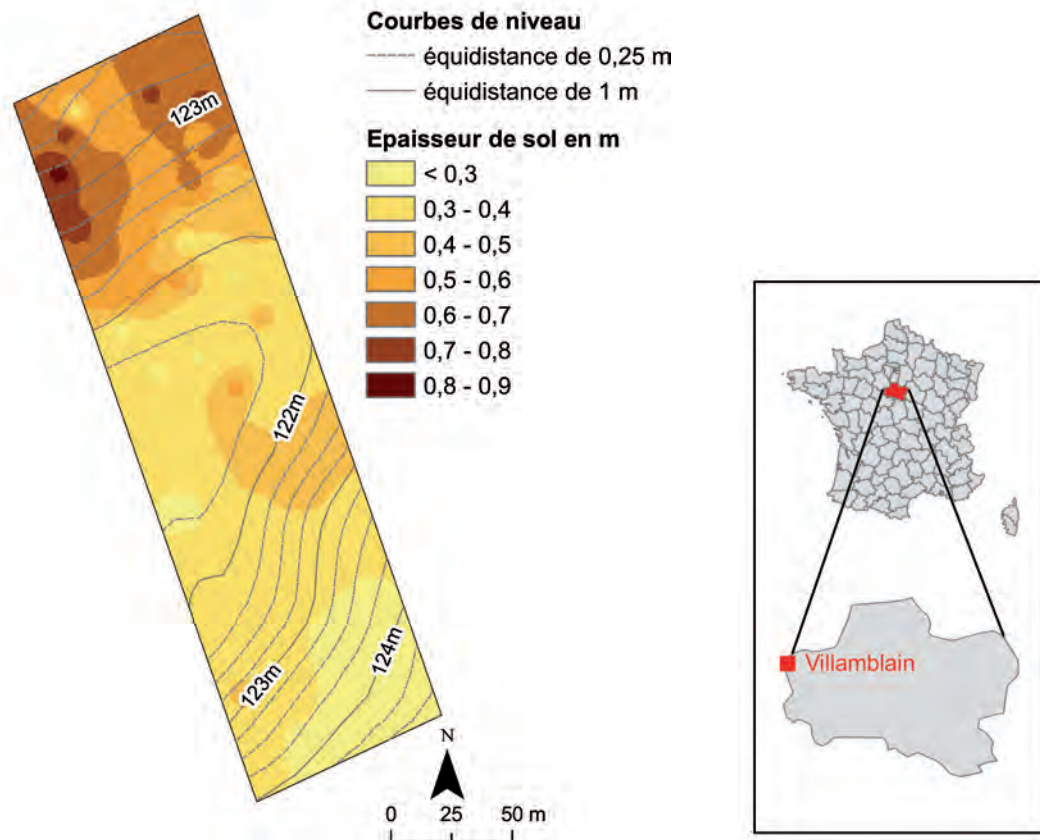


Source : Inra, Richer de Forges A., Référentiel Régional Pédologique du Loiret à 1/250 000, 2008 ; Chambre Départementale d'Agriculture du Loiret, Richer de Forges A., Carte des sols de Patay (Loiret) à 1/50 000, 2003.

La variabilité de la profondeur du sol existe également à l'échelle de la parcelle. Des moyens d'investigation modernes, comme la géophysique, permettent d'estimer la variabilité intra-parcellaire. Dans le cadre d'une

agriculture de précision, connaître cette variabilité permet à l'agriculteur d'adapter ses pratiques culturales aux sols de ses parcelles et de réduire l'impact environnemental de certaines pratiques (fertilisation, pesticides).

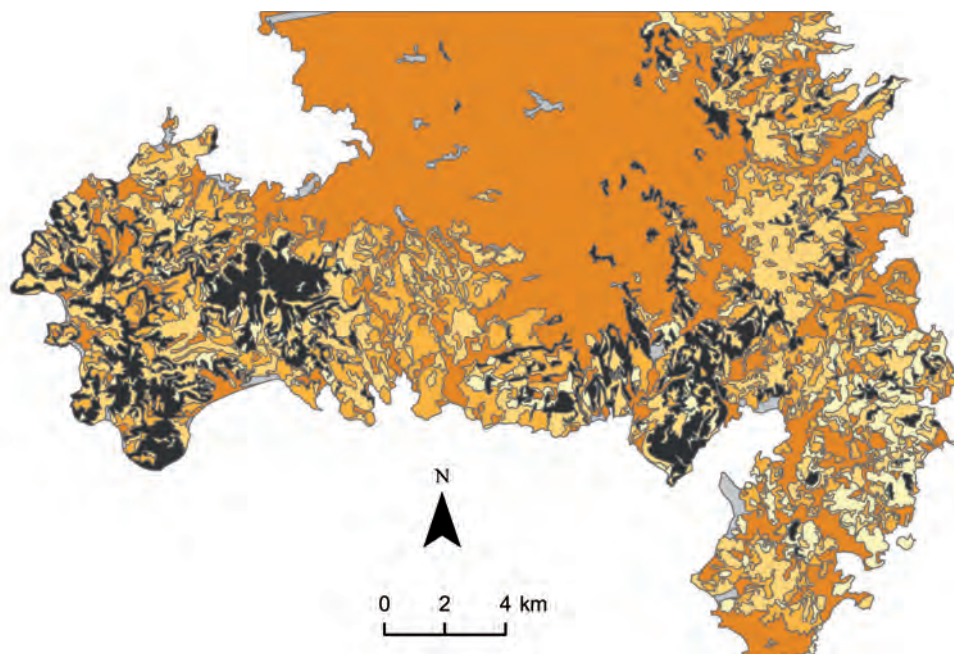
L'épaisseur du sol d'une parcelle agricole à Villamblain en Beauce (Loiret)



© Didier Michot, 2003, Intérêt de la géophysique de subsurface et de la télédétection multispectrale pour la cartographie des sols et le suivi de leur fonctionnement hydrique à l'échelle parcellaire, Thèse Université d'Orléans, 174 p.

Il est également nécessaire de distinguer la profondeur du sol de la profondeur maximale d'enracinement. Cette dernière correspond à la partie du sol exploitable par les plantes. Dans la grande majorité des sols, ces deux profondeurs sont identiques. Mais dans certains sols, des obstacles à l'enracinement peuvent réduire le volume de sol exploitable par les racines. Ces obstacles peuvent être physiques comme la présence d'un horizon compacté ou la présence d'une nappe d'eau. Ils peuvent être chimiques comme un horizon enrichi en sels. Connaître ces obstacles est donc primordial

pour estimer les aptitudes agricoles des terres. Enfin, dans certains cas, la profondeur d'enracinement peut être plus grande que la profondeur du sol lorsque le matériau géologique est meuble ou fracturé ce qui permet la pénétration des racines. Cela revêt une grande importance pour les cultures pérennes (arboriculture, forêts, vigne) car les plantes peuvent alors s'enraciner très profondément, particulièrement dans certains sols peu profonds. La plante peut alors puiser l'eau et les nutriments nécessaires à sa croissance dans la roche.



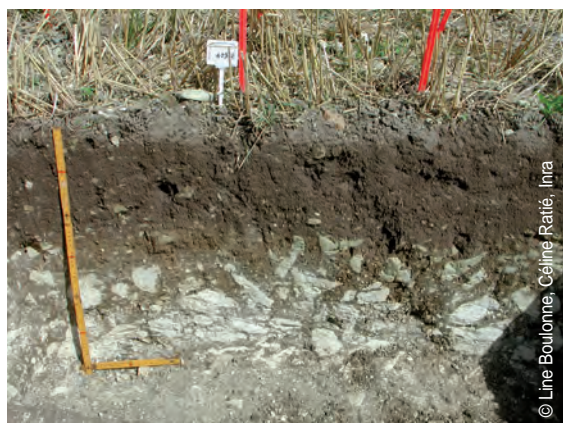
Profondeur en cm

- Sols "squelettiques" < 20 cm
- Sols courts entre 20 et 40 cm
- Sols moyennement profonds entre 40 et 70/80 cm
- Sols profonds supérieurs à 70/80 cm
- Pentés fortes
- Zones urbaines



Source : IRD, Base de données Valsol de la Martinique à 1/20 000, d'après Colmet-Daage, 1969. Carte des sols des Antilles : Guadeloupe volcanique et Martinique au 1/20 000. Orstom Antilles, 2006.

Note : Le matériau originel des sols est très varié ainsi que son degré de fragmentation et d'altération chimique. Le relief est formé de collines et de piedmonts et les pentes sont très faibles à fortes. Cet ensemble lithologie-relief conditionne la profondeur du sol : aux pentes les plus fortes ou aux roches les plus dures sont associés les sols peu profonds, aux roches tendres sur faibles pentes et aux bas-fonds correspondent en général les sols les plus profonds.



Un CALCOSOL leptique sur craie de 30 cm d'épaisseur (Indre-et-Loire).



Un FERRALLITISOL remanié sur alluvions du fleuve Maroni de 140 cm d'épaisseur (Guyane).

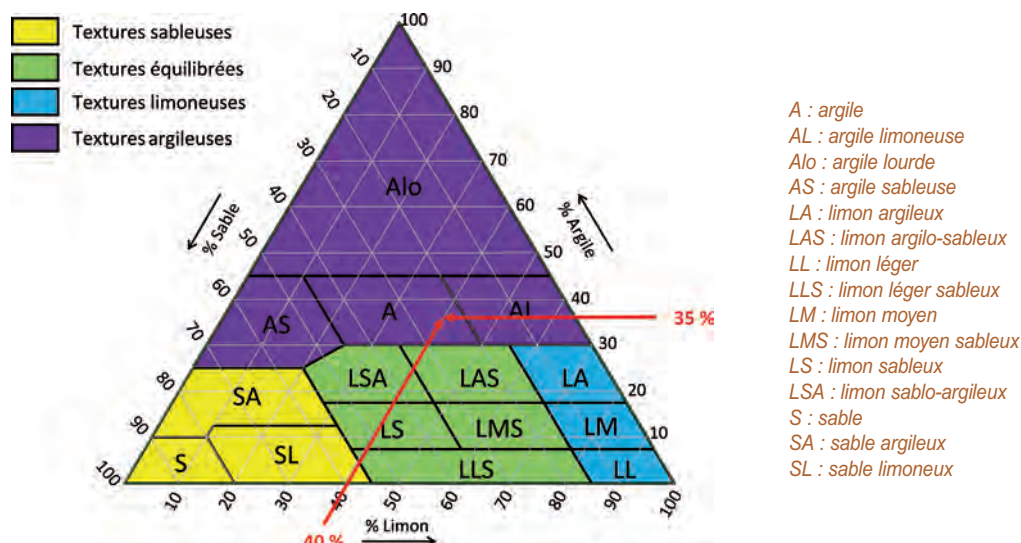
■ La texture des sols

Les constituants du sol sont classés selon leur taille. Cette analyse granulométrique distingue deux grands ensembles de constituants. La terre fine correspond à des constituants de diamètre inférieur à 2 millimètres, tandis que les éléments grossiers mesurent plus de 2 millimètres.

En général, l'analyse granulométrique de la terre fine s'intéresse à la fraction minérale des constituants. C'est pourquoi les matières organiques sont généralement détruites en début d'analyse. Les particules minérales sont ensuite classées selon différentes tailles. Trois fractions principales sont considérées :

les argiles de taille inférieure à 2 micromètres, les limons de taille comprise entre 2 et 50 micromètres, et les sables entre 50 micromètres et 2 millimètres. La texture correspond à un classement selon les proportions de ces trois fractions principales. Ce classement s'effectue via un triangle de texture. Chaque côté du triangle correspond à l'axe d'une des trois fractions. Des classes sont définies par la proportion de chacune des trois fractions. Pour certaines classes, une seule fraction prédomine sur les autres. C'est le domaine des textures sableuses, limoneuses ou argileuses. D'autres textures, plus équilibrées, sont une combinaison des trois fractions sans dominance particulière.

Un exemple de triangle de texture : celui utilisé pour établir la carte des sols de l'Aisne



Source : d'après Jamagne M., 1967, Bases et techniques d'une cartographie des sols. Annales Agronomiques. Volume 18. N° hors série. 142 pages.

Note : En rouge, la position dans le triangle d'un échantillon de sol ayant 40 % de limon et 35 % d'argile. La somme argile + limon + sable fait toujours 100 %.

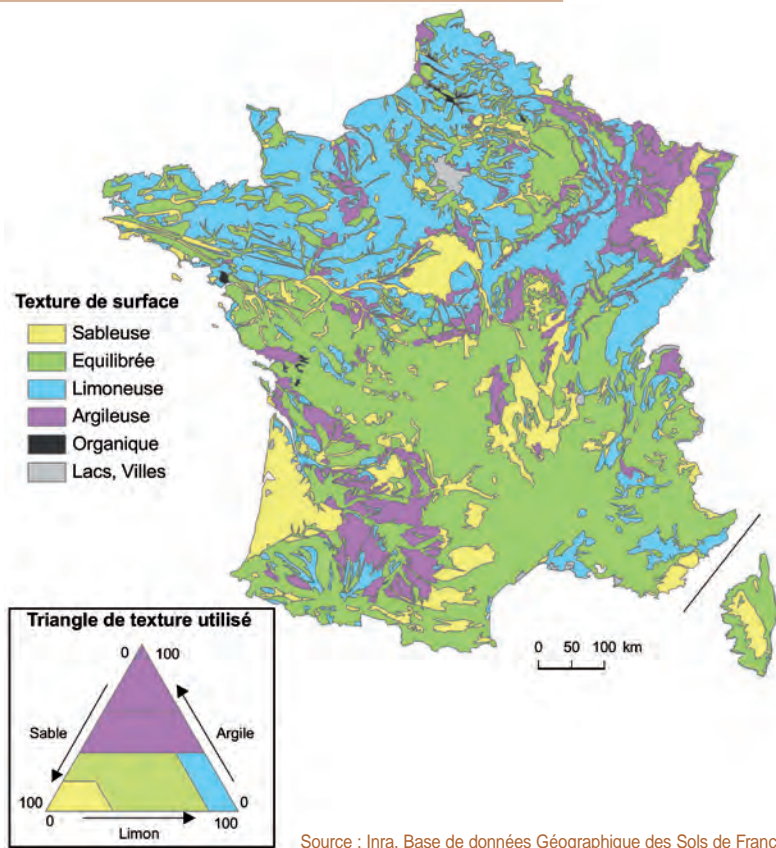
La texture est un des facteurs clés de la fertilité des sols. En effet, de nombreuses propriétés physiques et chimiques sont liées à la texture. Elle agit sur la structure du sol c'est-à-dire sa capacité à former des agrégats et donc en corollaire des pores, vecteurs des flux d'eau, d'air et d'éléments minéraux et organiques dans le sol. La structure conditionne de ce fait l'aération du sol et permet la respiration des racines, de la flore et de la faune du sol, ainsi que la rétention de l'eau utilisable par les racines. Ainsi, dans un sol sableux, la structure est plutôt particulière et meuble alors qu'elle a tendance à être massive et peu stable dans un sol limoneux.

La texture intervient également dans la capacité du sol à retenir l'eau. Plus la granulométrie du sol est grossière,

moins le sol retient d'eau. Ainsi, la quantité maximale d'eau retenue par le sol après écoulement de l'excédent par gravité est de l'ordre de 15 % de son poids dans un sol sableux, de 45 % dans un sol limoneux et de 50 % dans un sol argileux.

Les sols sableux sont localisés majoritairement dans les Landes, la Sologne et les Vosges où ils sont le support d'importants massifs forestiers. Ils sont également présents dans le Massif central, développés sur des arènes granitiques. Les textures équilibrées sont majoritaires en Champagne et dans la moitié sud de la France. Les textures limoneuses sont surtout présentes dans la moitié nord de la France et les textures argileuses en Lorraine et dans le Sud-Ouest.

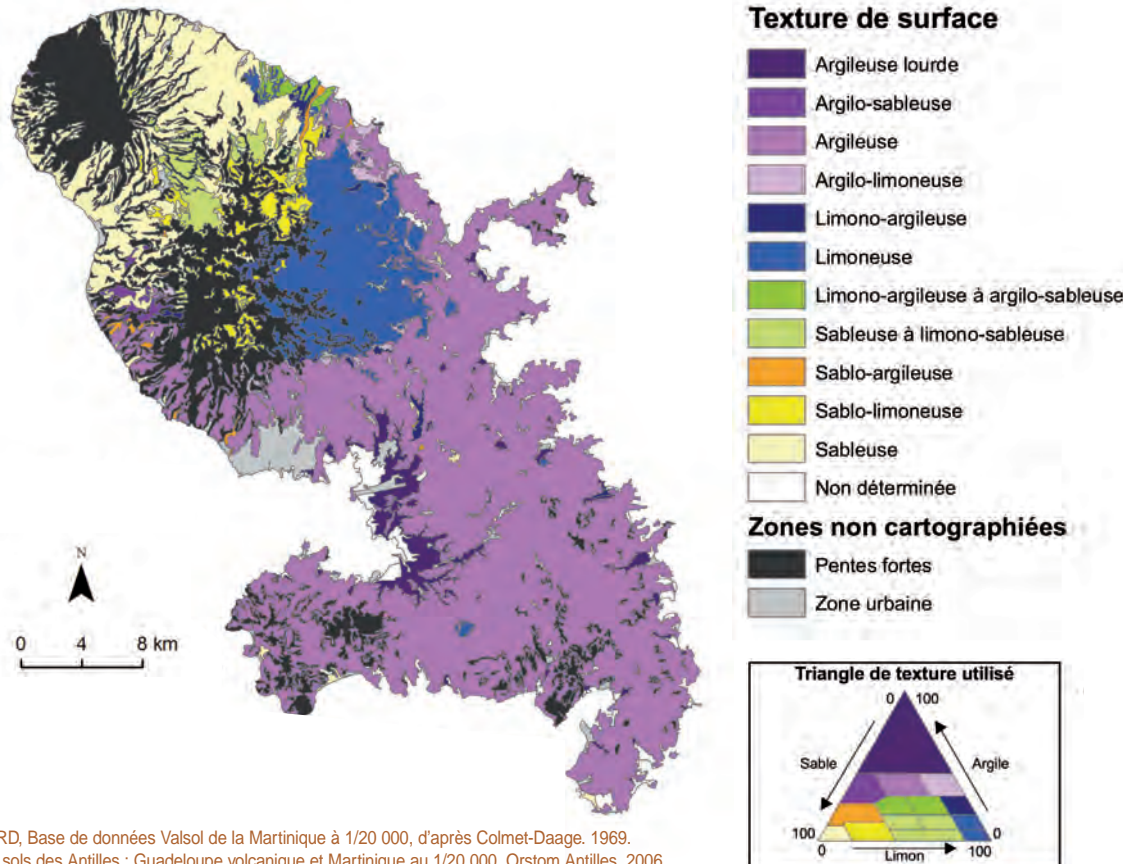
La texture des horizons supérieurs du sol en France métropolitaine



À la Martinique, le sud est surtout de texture argileuse correspondant à des sols évolués de volcanisme ancien.

Les sols peu évolués de volcanisme récent du nord de l'île sont de textures limoneuses à sableuses.

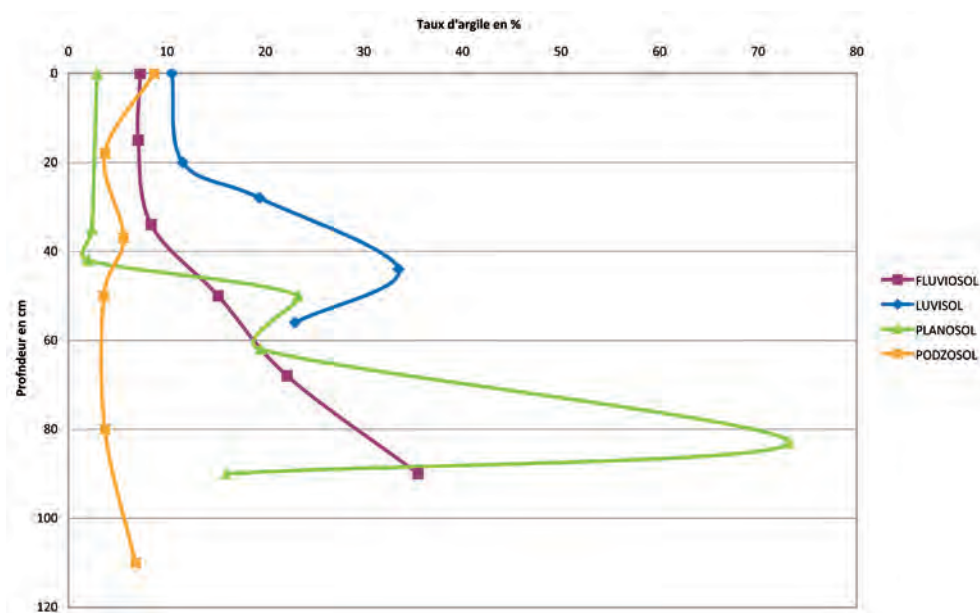
Les textures des horizons supérieurs du sol à la Martinique



Cependant, la texture d'un sol est loin d'être homogène. Ainsi, le taux d'argile peut varier en fonction de la profondeur. Dans l'exemple ci-dessous, cette variation peut être faible pour le PODZOSOL (sol sableux) à très forte pour les trois autres sols. Le PODZOSOL s'est développé sur un sable pauvre en argile expliquant ses faibles taux d'argile. Pour le FLUVIOSOL (sol alluvial), le taux d'argile augmente avec la profondeur. Cette variation est due à la diversité des dépôts d'alluvions dans lesquels le sol s'est développé. Certains sols peuvent se développer dans plusieurs matériaux superposés qui donnent des matériaux pédologiques aux caractéristiques différentes. Ainsi, le PLANOSOL (sol ayant un horizon plus riche en argile créant un obstacle à l'infiltration de l'eau) s'est développé dans une molasse superposée à une marne.

Cela a généré deux horizons plus riches en argile. Enfin, certains processus de formation des sols créent des mouvements de matières au sein du sol. Ainsi, le lessivage, un des processus les plus répandus en climat tempéré, entraîne les particules fines dispersées telles que les argiles et les hydroxydes de fer associés en profondeur. Les horizons supérieurs s'appauvrissent alors en argile tandis que les horizons inférieurs s'enrichissent comme le montre le LUVISOL. Ces variations de texture peuvent générer des comportements particuliers des sols. Les horizons plus argileux étant plus imperméables, ils créent un obstacle à l'écoulement des eaux. Cela peut entraîner des zones d'excès d'eau temporaire, appelées nappes perchées, qui sont très contraignantes pour les cultures.

La variation du taux d'argile selon la profondeur pour quatre types de sol contrastés



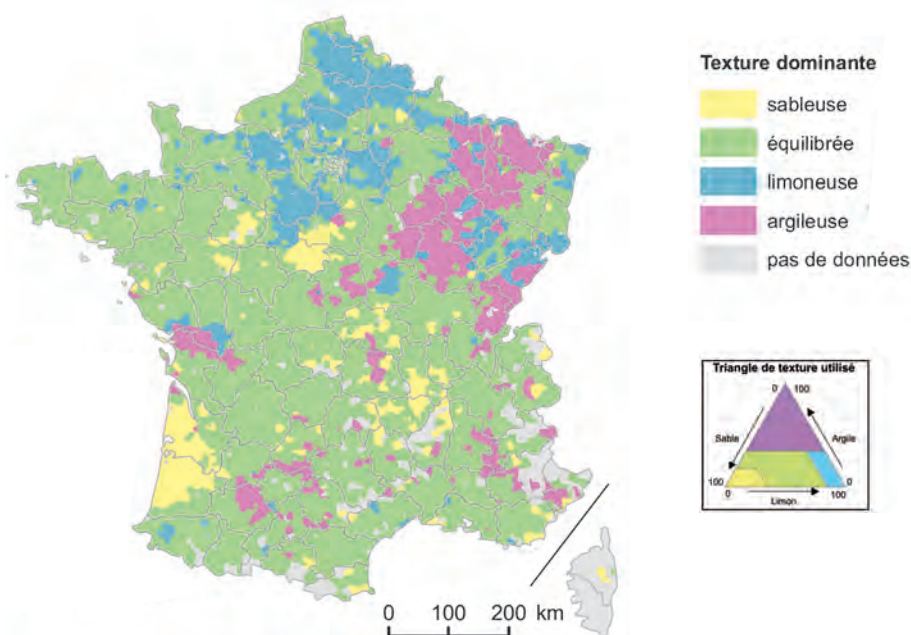
Source : Gis Sol, Donesol, 2011.

encart 1 Les textures des sols agricoles et des sols forestiers sont-elles si différentes ?

La Base de Données d'Analyses de Terre contient les résultats d'analyse de sols réalisés pour les agriculteurs par les laboratoires agréés auprès du ministère de l'Agriculture depuis les années 1990. Le grand nombre de résultats d'analyse qu'elle contient permet d'avoir une assez bonne vision des sols agricoles français, surtout des terres arables. L'Inventaire Forestier National conduit des campagnes de collecte d'information sur la forêt chaque année. Il a donc ainsi constitué une base de données sur les sols forestiers.

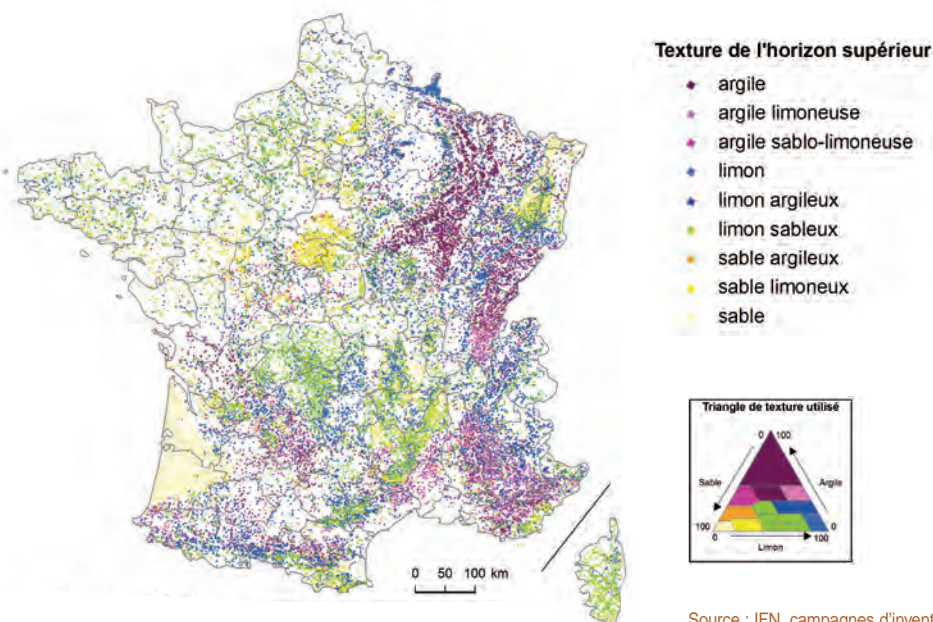
Certaines régions ne présentent pas de différence de texture entre les sols agricoles et forestiers. On observe une certaine homogénéité des sols dans ces régions. C'est le cas des sols sableux des Landes et de Sologne, ainsi que des sols argileux du Jura et de Lorraine. D'autres régions présentent des différences résultant d'une diversité des sols dans ces régions à laquelle répond une diversité d'usage. Ainsi, en Provence ou en Rhône-Alpes, les sols agricoles sont plus limoneux que les sols forestiers, plus argileux. Enfin, dans les Bassins aquitain et parisien comme en Bretagne, il est difficile de comparer en raison du faible nombre de forêts.

La texture dominante de l'horizon supérieur des sols agricoles par canton



Source : Gis Sol, BDAT, 2011.

La texture de l'horizon supérieur des sols forestiers



Source : IFN, campagnes d'inventaire 2005-2009.

■ La pierrosité des sols

La quantité d'éléments grossiers dans le sol détermine sa pierrosité. Ces éléments correspondent aux constituants minéraux du sol de diamètre supérieur à 2 millimètres, ceux inférieurs à 2 millimètres représentant la terre fine.

Les conséquences de la pierrosité sur les propriétés des sols sont assez complexes et dépendent de la taille des éléments grossiers, de leur forme, de leur pétrographie, de leur degré d'altération, de leur porosité, de leur dureté et du volume qu'ils occupent.

La présence d'éléments grossiers est généralement considérée comme une contrainte pour l'agriculture. En effet, ils réduisent le volume de terre fine du sol, limitant la quantité d'éléments nutritifs et d'eau disponibles pour les plantes. Ainsi, pour une épaisseur de sol donnée, un sol caillouteux est moins riche en éléments nutritifs et retient moins d'eau qu'un sol non caillouteux.

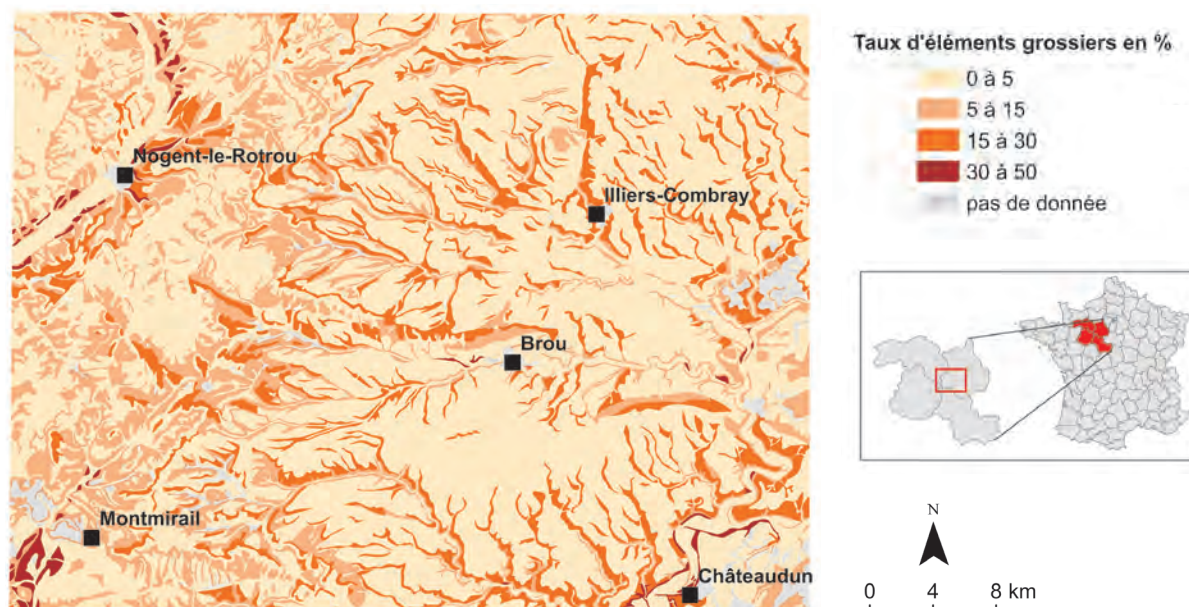
Les éléments grossiers sont à l'origine de difficultés lors de la préparation du sol et du semis et de l'augmentation de l'usure du matériel. Ils gênent la germination et peuvent causer des lésions sur les plantes lorsqu'ils sont déplacés par les engins agricoles. Cependant, ces inconvénients sont surtout dommageables en cultures annuelles. Ils le sont moins en cultures pérennes, que ce soit en prairie ou en cultures ligneuses.



Un exemple de sol très caillouteux : un PEYROSOL cailloutique sur graves (Gironde).

Certains éléments grossiers peuvent, lorsqu'ils sont altérés, fournir des éléments nutritifs à la plante comme les micas par exemple qui sont riches en potassium. D'autres peuvent constituer une réserve en eau non négligeable et notamment les éléments grossiers issus de la craie. Ils peuvent améliorer la structure du sol en augmentant la part des petits agrégats et ainsi favoriser le développement des racines dans le sol. Dans un sol argileux, ils peuvent favoriser la fissuration du sol. Ils peuvent aussi limiter le tassement. Enfin, ils influent sur le régime thermique des sols.

La teneur en éléments grossiers de la couche superficielle des sols dans les environs de Châteaudun



Source : Inra, Betremieux R., Bourlet M., Darthout, R., Gobillot, T., Isambert, M., Carte Pédologique de France : feuille de Châteaudun, 1984.



Une zone de vignoble à La Réunion avec de nombreux éléments grossiers affleurant en surface.

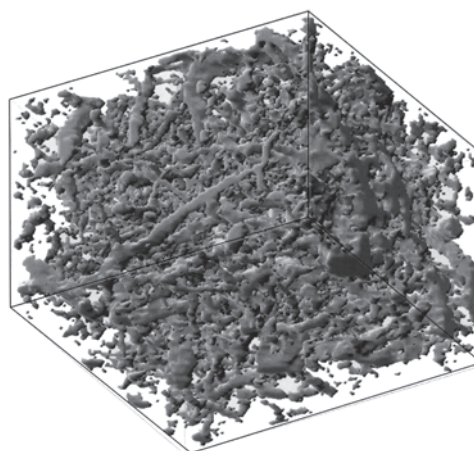
■ L'eau dans les sols

Le sol régule le régime des eaux superficielles et l'alimentation des eaux souterraines. Il détermine le partage entre ruissellement et infiltration des eaux de pluie. Il permet aussi l'alimentation en eau de la biosphère qui restitue une partie de cette eau à l'atmosphère via la transpiration des plantes. L'eau contenue dans le sol joue un rôle prépondérant dans de nombreux processus environnementaux par la dissolution, le dépôt, la transformation, la dégradation et le transport de diverses substances.

Lorsqu'il pleut, une partie de l'eau s'infiltrate dans le sol où elle est stockée et le reste s'écoule par ruissellement vers les eaux de surface. L'eau contenue dans le sol se charge en substances minérales ou organiques dissoutes et constitue la solution du sol. Celle-ci tient un rôle prépondérant dans de nombreux processus : formation et évolution des sols, nutrition des plantes et de la biosphère du sol, transfert de substance dissoutes ou en suspension vers les eaux souterraines, recharge des nappes. En effet, de nombreuses réactions chimiques ont lieu à l'interface entre la solution et la phase solide ou les micro-organismes du sol. Des substances sont dissoutes et d'autres se déposent, sont transformées ou dégradées. En permettant une alimentation régulière des plantes en eau, le sol leur permet de résister à la pression climatique par la transpiration et de restituer ainsi à l'atmosphère une grande partie de l'eau des pluies.

La capacité du sol à retenir l'eau dépend de sa porosité. En effet, le sol est formé de particules solides mais également d'espaces vides, appelés pores, occupés soit par de l'eau, soit par de l'air. Cette porosité est fonction à la fois de l'arrangement des particules solides, mais aussi des pressions climatiques (cycle

gel/dégel ou humectation/dessiccation par exemple) et anthropiques (passage d'engins, labour, etc.) que le sol subit. Elle occupe en général entre 30 et 60 % du volume total du sol.



© Isabelle Cousin, Inra

La porosité d'un sol vue en trois dimensions par tomographie aux rayons X.

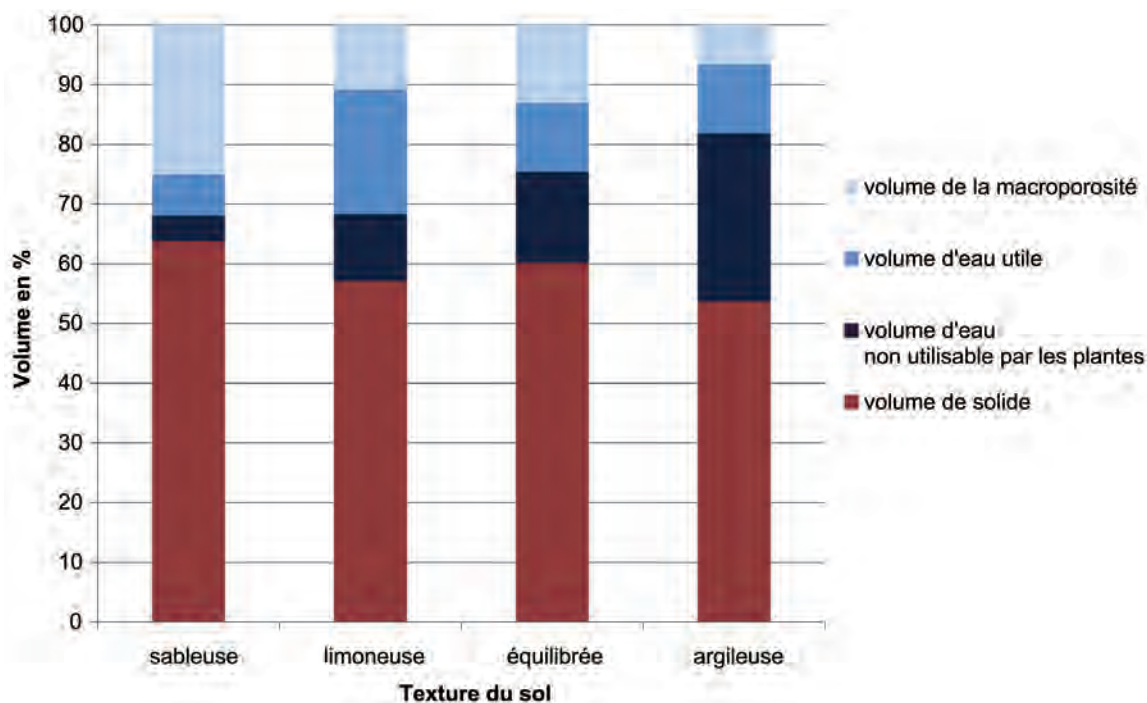
Note : La tomographie est une technique d'imagerie permettant de reconstruire le volume d'un objet à partir d'une série de mesures effectuées par tranche depuis l'extérieur de cet objet. L'échantillon de sol est imprégné d'une résine fluorescente puis sa surface est photographiée sous lumière fluorescente afin de mettre en évidence la porosité. L'échantillon est ensuite meulé sur une très faible épaisseur et photographié de nouveau. On obtient ainsi une image en trois dimensions de la porosité de l'échantillon (en gris).

Plus les pores sont petits, plus l'eau est retenue fortement. On distingue ainsi plusieurs porosités qui déterminent plusieurs états de l'eau dans le sol. Les pores de grande taille, de diamètre supérieur à 50 micromètres (μm) environ, forment la macroporosité dans laquelle circule l'eau de gravité. Celle-ci ne réside en général dans les sols que quelques heures à quelques jours après une pluie. Par contre, elle peut résider beaucoup plus longtemps dans les sols présentant un obstacle à l'écoulement et une nappe d'eau temporaire ou permanente. Lorsque cette eau de gravité s'est totalement écoulée, l'eau restante retenue est conservée dans le sol et constitue la capacité au champ. Celle-ci représente donc la quantité totale d'eau que le sol peut retenir et détermine la taille maximale du réservoir d'eau que forme le sol. Les pores de taille moyenne, de diamètre compris entre 0,2 et 50 micromètres (μm) environ, contiennent l'eau utile, c'est-à-dire l'eau que les plantes sont capables d'extraire du sol. Lorsqu'il n'y a plus d'eau utile, le point de flétrissement permanent est atteint et les plantes ne peuvent plus absorber d'eau. Enfin, les pores de petite taille, dont le diamètre est inférieur à 0,2 μm environ contiennent une eau inutilisable par les plantes.

La quantité totale d'eau que le sol peut retenir ainsi que la quantité d'eau utile varient selon la texture. Les sols constitués de particules fines (argiles, limons) ont des porosités élevées, de l'ordre de 40 à 45 % alors que les sols riches en sables ont une porosité moindre de l'ordre de 35 %. Cependant, plus les particules sont fines et plus la part des pores fins est élevée. Ainsi, le volume des pores fins est de l'ordre de 5 % en sol sableux, 10 % en sol limoneux et 30 % en sols argileux. *A contrario*, la macroporosité est de l'ordre de 25 % du volume des sols sableux alors qu'elle n'est que de 10 % en sols limoneux et de 5 % en sols argileux.

En conséquence, pour un sol d'un mètre d'épaisseur, la capacité à retenir l'eau peut aller du simple au triple voire au quadruple selon la texture. Même si les sols sableux stockent majoritairement de l'eau utile, leur réserve en eau utile reste faible. Les sols limoneux sont ceux qui fournissent le plus d'eau utile. Bien qu'ayant la plus forte capacité à retenir l'eau, les sols argileux fournissent proportionnellement le moins d'eau utile.

La part des volumes de solide, d'eau et de macroporosité pour quatre sols d'un mètre d'épaisseur de texture différente

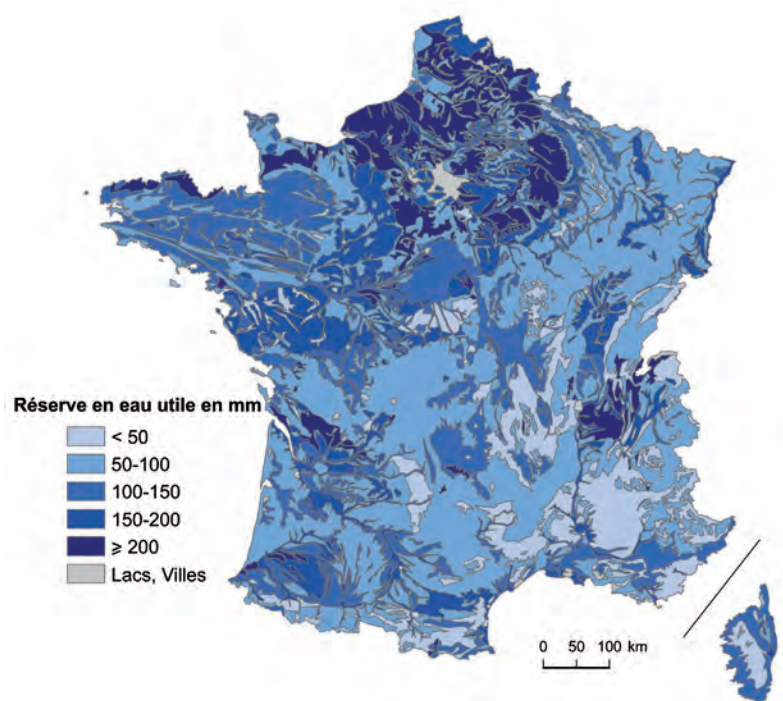


Source : D'après Bruand A., Duval O., Cousin I., 2004. Estimation des propriétés de rétention en eau des sols à partir de la base de données SOLHYDRO : Une première proposition combinant le type d'horizon, sa texture et sa densité apparente. *Étude et Gestion des Sols*, Volume 11, numéro 3, pages 323-332.

Le volume du sol est limité en profondeur par la présence de la roche. Donc plus un sol est épais, plus sa réserve en eau est grande. Cependant, certaines roches (craie, lœss, marnes, etc.) peuvent également servir de réserve en eau et réalimenter le sol au fur et à mesure qu'il se dessèche. La pierrosité, en diminuant le volume de terre fine, réduit la taille du réservoir d'eau du sol. Toutefois, certains éléments grossiers peuvent eux-mêmes retenir de l'eau (cailloux de craie par exemple).

La carte des réserves en eau utile de la France métropolitaine tient compte de ces différents facteurs. Elle montre une relation forte avec la texture mais aussi la profondeur des sols. Ainsi, les sols présentant les plus fortes réserves en eau utile sont les sols limoneux du Bassin parisien qui cumulent une texture limoneuse favorable et une forte épaisseur. Les sols à plus faible réserve sont les sols sableux (Landes, Vosges) ou peu épais (Causses, Provence, seuil du Poitou).

Les réserves en eau utile de la France métropolitaine



Source : Inra, Base de données Géographique des Sols de France à 1/1 000 000, 1998.

La circulation de l'eau dans le sol dépend de la manière dont les pores sont connectés entre eux et de la taille des pores connectés. Plus les pores sont connectés entre eux et plus ces pores sont gros, plus l'eau circule vite. Ainsi, dans les sols sableux où les pores de grande taille sont nombreux et bien connectés entre eux, l'eau s'évacue très rapidement avec une vitesse d'environ 10 m.j^{-1} . *A contrario*, en sols argileux, les pores de grande taille sont souvent isolés les uns des autres et

l'eau circule surtout *via* les pores de petite taille par diffusion. L'eau s'écoule donc plus lentement dans ces sols avec une vitesse inférieure à 10 cm.j^{-1} . Les sols limoneux présentent des vitesses d'écoulement intermédiaires. Cependant, dans certains sols argileux, des fissures peuvent apparaître notamment lorsque le sol se dessèche. Ces fissures forment alors des voies préférentielles d'écoulement qui peuvent accélérer très fortement les transferts d'eau.

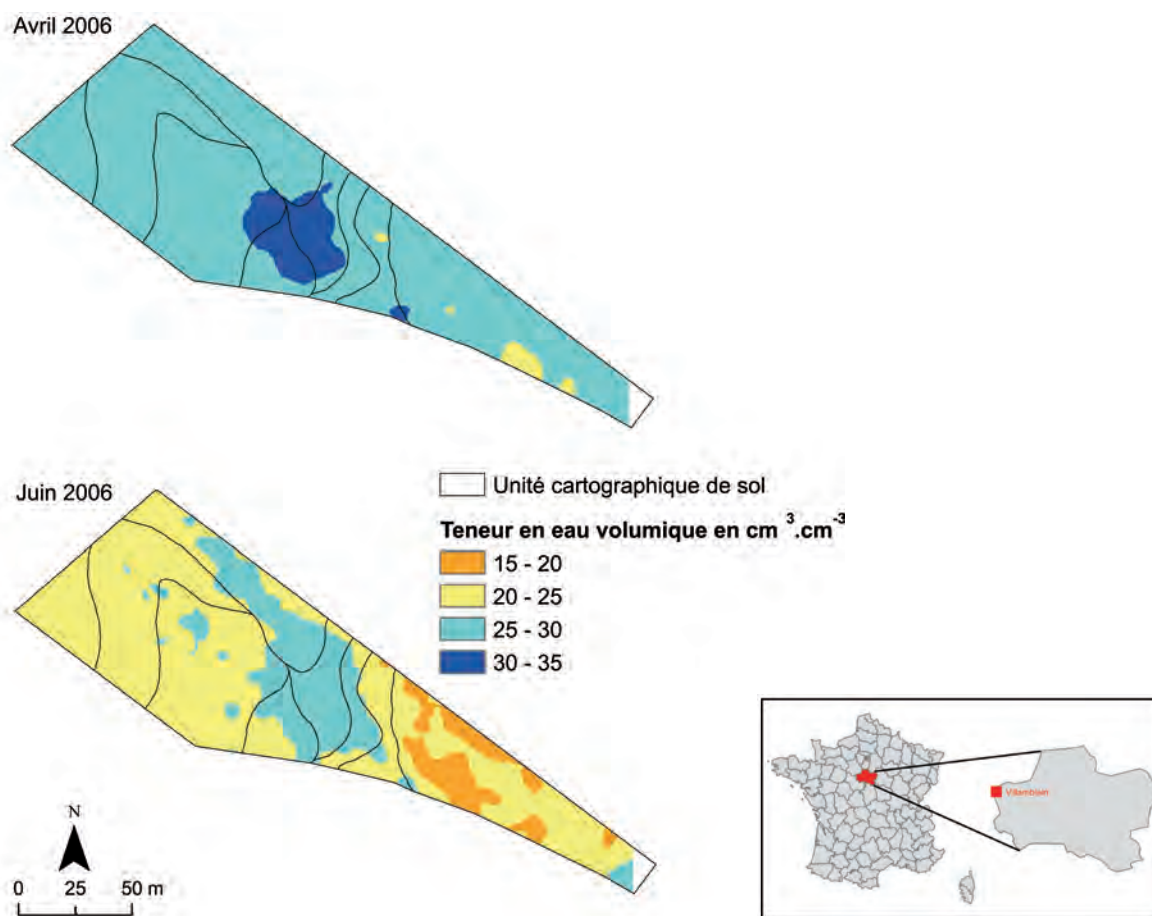
Dans certains sols, des obstacles en profondeur, comme la présence d'horizons plus argileux ou d'une nappe d'eau peuvent limiter l'écoulement de l'eau et provoquer l'apparition d'excès d'eau. Dans ces sols, l'eau stagne dans la macroporosité pendant de longues périodes. Le milieu devient asphyxiant par manque d'oxygène et est alors propice à des réactions chimiques spécifiques.

Les matières organiques jouent un rôle sur la porosité car elles renforcent la cohésion des particules et la formation d'agrégats. Elles augmentent la résistance des agrégats à la désagrégation sous l'effet des pluies. Elles favorisent ainsi l'infiltration de l'eau dans le sol et diminuent le ruissellement. La faune et la flore du sol jouent

également un rôle sur la porosité en favorisant la formation des agrégats et en créant des pores de grande taille (galeries de vers de terre, zone de pénétration des racines) qui favorisent l'écoulement de l'eau.

L'Homme peut également agir sur la capacité du sol à retenir l'eau via des techniques visant à défragmenter le sol (labour, sous-solage) ou par l'apport de matières organiques (compost, fumier). Par contre, l'utilisation d'engins lourds lors des travaux agricoles ou forestiers sur des sols très humides peut diminuer la porosité de manière parfois irréversible. Ceci affecte surtout les pores de taille moyenne à grande et diminue ainsi la capacité de réserve en eau utile et les vitesses d'écoulement.

L'évolution des teneurs en eau d'un sol d'une parcelle agricole de la commune de Villamblain en Beauce (Loiret) entre avril et juin 2006



Source : Cousin I., Besson A., Bourennane H., Pasquier C., Nicoulaud B., King D., Richard G., 2009. From spatial-continuous electrical resistivity measurements to the soil hydraulic functioning at the field scale. C. R. Geoscience. Volume 341. Pages 859–867.

Note : L'utilisation de la géophysique a permis de cartographier la teneur en eau sur une parcelle agricole en avril et en juin. Une carte de sols très détaillée a également été réalisée sur la parcelle. La teneur en eau a diminué entre les deux dates en réponse à la pression climatique mais pas de manière uniforme dans la parcelle. Cela a fait apparaître des structures spatiales montrant une variabilité des propriétés des sols dans la parcelle, y compris à l'intérieur des unités de sol définies par la carte des sols.

■ La minéralogie des sols

La minéralogie des sols s'intéresse à la nature des particules minérales dont la taille et la nature varient et qui représentent la matière dominante du sol tant en masse qu'en volume. Les sols renferment des minéraux reliques des roches préexistantes comme les feldspaths, les micas et le quartz, présents à divers degrés d'altération. Les sols contiennent aussi des minéraux issus de la transformation des minéraux préexistants ou de la néoformation de nouvelles entités minérales que sont les oxydes et les argiles.

Les propriétés physico-chimiques des minéraux régulent des mécanismes physiques et chimiques divers dans les sols. Les argiles en particulier, de très petite taille (inférieure à 2 micromètres), ont des surfaces très réactives, chargées négativement. Cela leur confère d'extraordinaires propriétés pour participer à une multitude de processus qui concernent des molécules diverses, des éléments minéraux, des polluants organiques, des éléments toxiques ou contaminants et des éléments traces.

Ainsi, les minéraux du sol et leur organisation dans l'espace sont responsables des réserves en eau et contribuent à l'offre d'éléments nutritifs pour les plantes. Avec les matières organiques, ils influent sur la régulation de la chimie des eaux naturelles, car ils peuvent immobiliser les excès d'engrais minéraux utilisés en agriculture, les pesticides, ainsi que divers polluants. Ils contribuent également à la neutralisation des effets des dépôts atmosphériques acides.

En France métropolitaine, le quartz est l'élément dominant dans de nombreux sols. Inerte, il s'altère très lentement. Il caractérise par exemple les sols sableux des Landes et de Sologne. Les roches cristallines, éruptives ou celles issues de transformations métamorphiques, se caractérisent lors de leur altération par la formation de sols

à texture sableuse selon les conditions locales dont l'intensité des processus d'argilisation varie (Massif armoricain, Massif central, Vosges). La plupart des sols métropolitains contiennent des minéraux résiduels des roches dont ils dérivent, en particulier des illites et des chlorites. Les sols peu épais développés sur des roches carbonatées montrent une minéralogie dominée par les carbonates hérités de la roche. Les minéraux néoformés sont également présents, principalement des vermiculites. À tous ces types se joignent les oxydes de fer, d'aluminium et de manganèse.

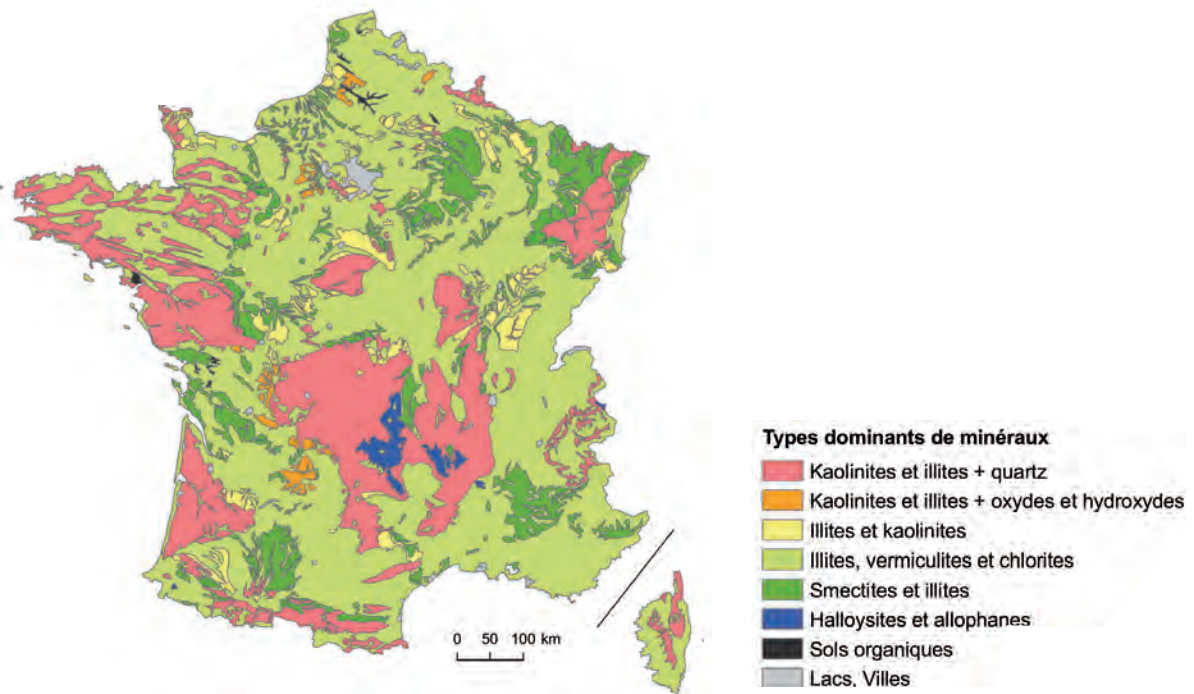
L'exemple de la Nouvelle-Calédonie illustre une empreinte des massifs à péridotites, fortement altérées par transformation des minéraux primaires en serpentine. Les roches contiennent des minéralisations en chrome, nickel, cobalt et plomb. Les sols sont des FERRALLITISOLS avec des accumulations spectaculaires de fer (en cuirasses, nodules, sols de type brunifié parfois vertiques sur serpentinites).

Les sols de la Guadeloupe, de la Martinique et de La Réunion sont jeunes, de 1 000 à 100 000 ans et d'origine volcanique. Ceux de Guyane sont vieux de quelques millions d'années et formés aux dépens de roches cristallines. Le climat tropical humide aux températures élevées et aux pluies intenses, altère les minéraux des roches tout en lessivant leur contenu initial en éléments nutritifs pour les plantes.

Les sols des Antilles sont divers dans la nature de leur matrice minérale, selon leur âge et la pluviométrie qui a affecté leur formation. Par ailleurs, après quelques milliers d'années d'évolution, ils contiennent tous des quantités notables de minéraux secondaires, car tous les minéraux des roches sont altérables. La nature du minéral secondaire détermine une grande partie des propriétés physico-chimiques de ces sols.

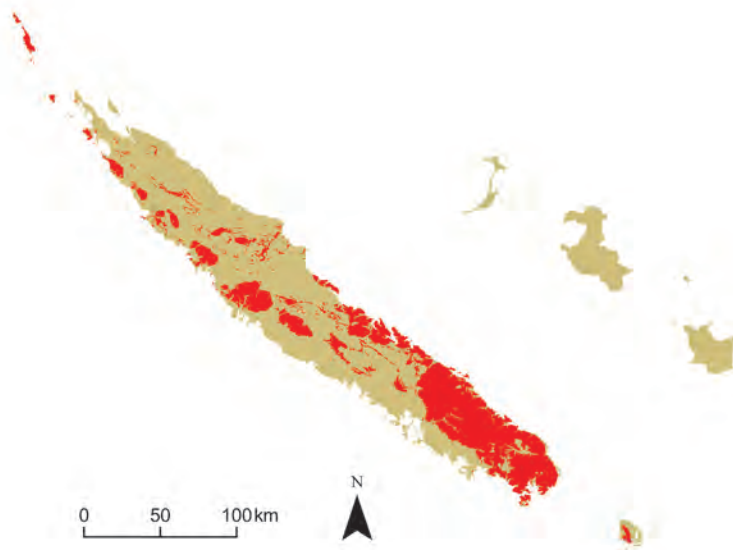
Nom	Type	Processus de formation	Propriétés
Allophane	Silicate d'aluminium amorphe, paracrystallin	Sols dérivés de dépôts volcaniques, horizons d'accumulation de podzols	Capacités fortes d'adsorption ioniques, importante teneur en eau et matières organiques
Calcite	Carbonate	Dissolution-précipitations de carbonates	Agent de cimentation, forte affinité avec les ions phosphate
Chlorite	Minéral argileux magnésien	Hérité des roches métamorphiques et magmatiques ou de l'évolution de vermiculites en milieu acide	Important précurseur des minéraux dans les sols
Feldspaths	Silicates	Présents dans une large gamme de roches magmatiques et métamorphisées, ils persistent dans les sols et les dépôts géologiques selon l'intensité de l'altération et la durée de l'exposition à l'altération. Leur altération en produits secondaires est fonction des micro-environnements, les produits des altérations peuvent être la kaolinite, les micas, la gibbsite, l'halloysite, les smectites, ou des produits amorphes	Altérables. Sources de calcium, sodium, potassium.
Gibbsite	Oxyde	Oxyde d'aluminium	Forte capacité d'adsorption des anions
Halloysite	Minéral argileux	Sols sur cendres volcaniques, horizons d'altérations de granites à feldspaths	Faible capacité d'échange cationique
Hématite et goëthite	Oxydes	Oxyde de fer des sols bien drainés	Faible capacité d'échange, adsorbent les anions
Illite	Minéral argileux hérité	Produit de la microdivision des micas	Pas de charge ionique
Kaolinite	Minéral argileux	Produit de néoformation de nombreux sols tropicaux	Faible capacité d'échange, capacité d'adsorption des anions en fonction du pH
Micas Muscovite Biotite	Minéraux argileux	Présente dans les granites et les roches métamorphisées, la muscovite est un élément hérité dans les sols. Selon les conditions d'altération, elle conduit à la formation de vermiculite ou de smectites. Présente dans les granites et les roches métamorphisées, la biotite est stable dans les sols jeunes ou les matériaux en cours d'altération. C'est un précurseur de minéraux argileux et d'oxydes de fer	Sources de potassium pour les sols
Quartz	Silicate	Minéral hérité des roches, présent dans tous les sols et les roches	Peu à pas de réactivité, concentré dans les fractions sableuses et limoneuses, peut être soluble dans la fraction argileuse
Smectites	Minéraux argileux	Produit de l'altération des micas ou des vermiculites, ce sont les principales argiles des vertisols des Antilles	Capacité d'échange cationique élevée, surface spécifique élevée, propriétés de retrait et gonflement importantes
Vermiculite	Minéral argileux	Produit de l'altération des micas dans les sols bien drainés	Capacité d'échange cationique élevée, forte capacité de rétention du potassium, forte affinité pour l'aluminium en solution

Les types dominants de minéraux des horizons supérieurs des sols de France métropolitaine

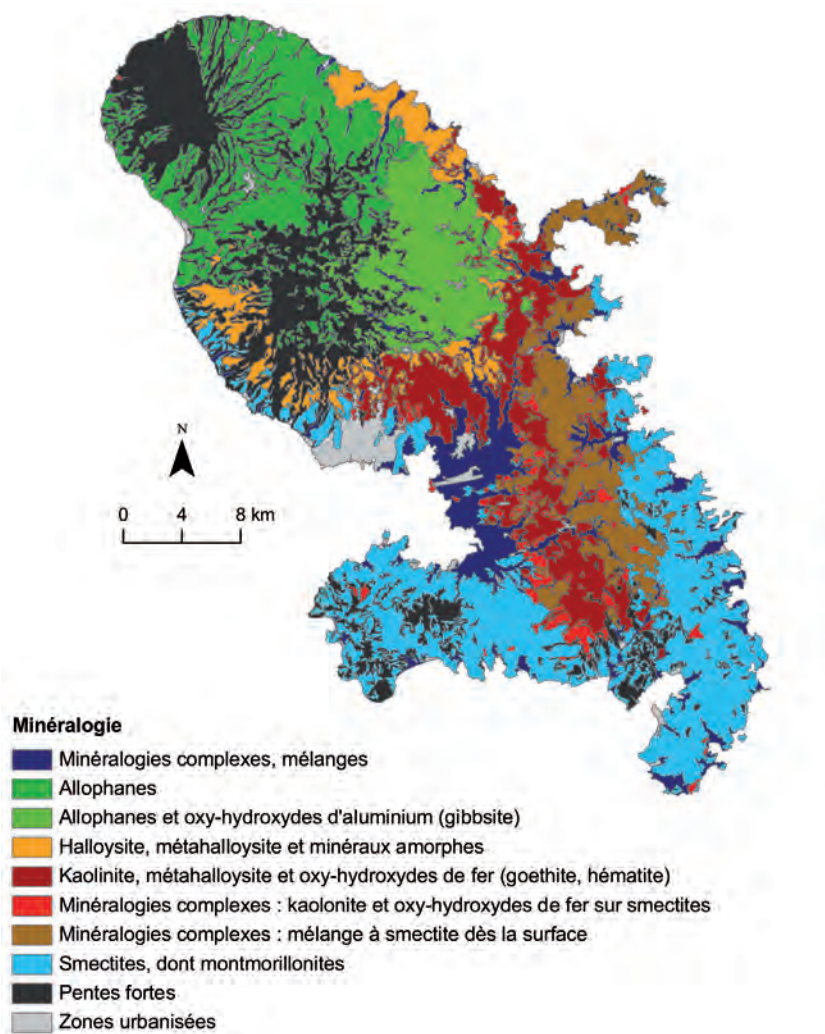


Source : Inra, Base de données Géographique des Sols de France à 1/1 000 000, 1998.

La localisation (en rouge) des massifs ultrabasiques (péridotites) de Nouvelle-Calédonie



Source : IRD, Base de données Valsol-MIRURAM de Nouvelle Calédonie, d'après Beaudou A. et Le Martret H. 2004. Étude morpho-pédologique au 1/200 000 du territoire de Nouvelle Calédonie, 2004.



Source : IRD, Base de données Valsol de la Martinique à 1/20 000, d'après Colmet-Daage. 1969. Carte des sols des Antilles : Guadeloupe volcanique et Martinique au 1/20 000. Orstom Antilles, 2006.

■ Les carbonates dans les sols

La calcite (carbonate de calcium) et la dolomite (carbonate double de calcium et de magnésium) sont les carbonates communs dans une grande variété de sols. Les carbonates précipitent dans les sols et sont également présents sous forme de débris de roches comme héritage des roches calcaires et des autres roches carbonatées.

Les carbonates sont normalement stables mais des processus de dissolution-précipitation se produisent en climat tempéré atlantique. La calcite peut alors précipiter dans l'espace poral du sol après sa dissolution. Par rapport aux minéraux silicatés et aux oxydes, les carbonates ont en général une solubilité plus importante et des cinétiques de réactions plus rapides. Leur origine est diverse : dans le sol carbonaté, le calcaire présent est un reliquat des processus de l'altération, ou bien le résultat de processus de précipitation, ou bien le mélange des deux mécanismes. Selon les approches d'analyses chimiques, on distingue les teneurs en calcaire total de celles en calcaire actif. Ce dernier représente la partie des carbonates finement fragmentés qui peuvent se solubiliser rapidement en bicarbonate. Les teneurs en calcium ou en magnésium échangeables correspondent à la part de l'élément adsorbé sur les particules argileuses.

À l'échelle du territoire, l'occurrence des sols carbonatés est à relier à la nature calcaire des roches. Ainsi, ils représentent des extensions importantes sur le territoire hexagonal, soit environ 160 000 km². La diversité des sols carbonatés peut être illustrée à l'échelle régionale par la teneur en calcaire total de l'horizon de surface du sol. Ainsi, en Charente-Maritime, une forte proportion de sols présente des teneurs en carbonates élevées pouvant dépasser les 50 %. La carte extraite de la Base de Données d'Analyses de Terre (BDAT) illustre bien la répartition du calcaire dans les sols agricoles, fortement liée aux régions de craie (Champagne), de marnes (Argonne, Woëvre), et aux calcaires durs jurassiques (Alpes, Berry, Bourgogne, Jura, Poitou et Provence).

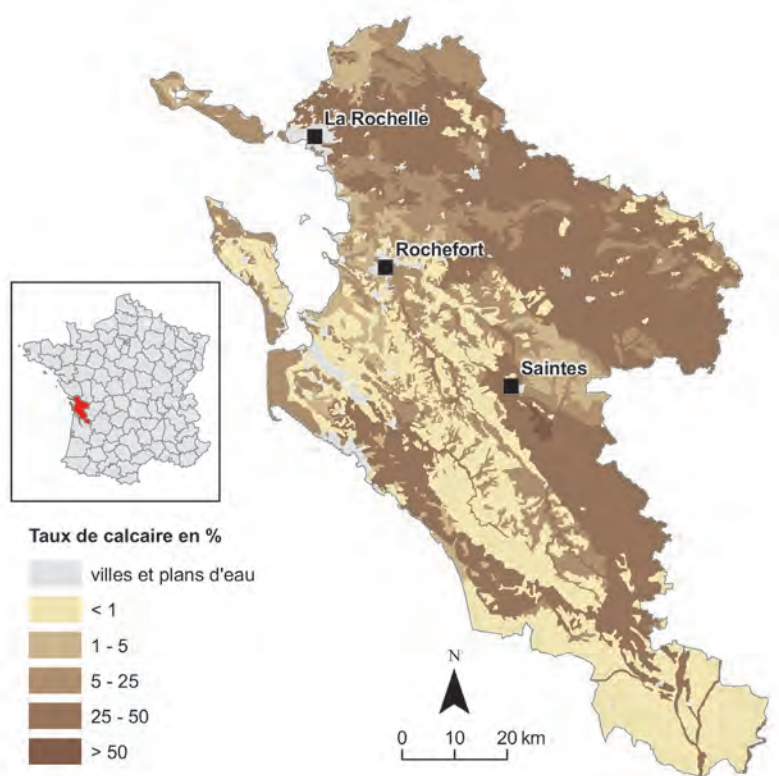
La surface d'échange développée sur les carbonates est importante et explique leur affinité pour l'ion phosphate (PO_4^{3-}), le cadmium, le manganèse et le zinc. À cette propriété s'ajoute la présence du calcaire actif. Dès lors, la forte teneur en calcium du milieu joue un rôle sur l'immobilisation des ions phosphate et de certains oligo-éléments. Ainsi, en milieu très carbonaté, le bore et le fer peuvent précipiter et rester sous des formes insolubles aux pas de temps nécessaires à l'alimentation des plantes, provoquant des carences.

L'importance des carbonates réside dans la régulation du pH, dans l'offre de l'élément calcium pour les organismes vivants, et dans le rôle structurant de l'agrégation des sols. En effet, le calcium a un rôle flocculant vis-à-vis des argiles et stabilise les composés organiques. Ces mécanismes participent à l'organisation et à la stabilité de la structure du sol.

La régulation du pH du sol s'effectue dans les mécanismes d'échange entre la calcite, le gaz carbonique (CO_2) contenu dans les solutions du sol et l'eau. Ainsi, les racines et l'activité microbienne par leur respiration alimentent la porosité du sol en CO_2 .

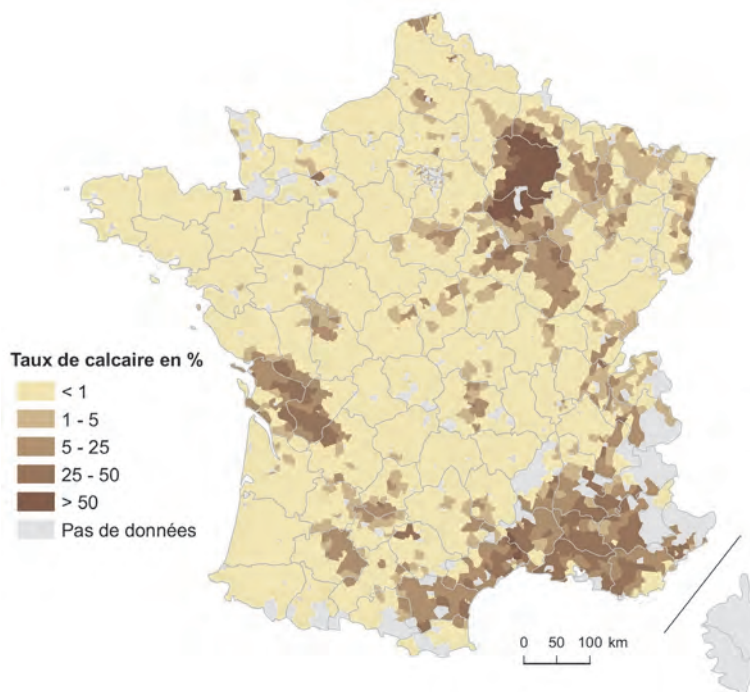
Dans les régions de sols carbonatés calciques ou calcimagnésiques issus de roches sédimentaires, le calcium est toujours abondant ou hyperabondant. Il peut représenter entre 75 et 90 % de la capacité d'échange cationique des sols. La quantité de magnésium est plus variable selon le contenu originel des roches. Le pH est supérieur à 7 lorsque que le taux de calcaire actif est élevé. Enfin, dans certains sols, lorsque le complexe d'échange cationique est saturé par le calcium, une carence en d'autres éléments comme le potassium peut survenir.

Le taux de calcaire total des sols pour le département de Charente-Maritime



Source : Inra – Chambre Départementale d'Agriculture de Charente-Maritime, Cam C., Salin R., Référentiel Régional Pédologique de Charente-Maritime, 1999.

Le taux de calcaire total par canton (médiane) des sols agricoles



Source : Gis Sol, Base de Données d'Analyse de Terre, 2011.

■ Les éléments majeurs totaux des sols

Les sols contiennent les éléments présents dans la lithosphère. Toutefois leurs teneurs sont variables suite aux processus de formation des sols se surimposant à la diversité naturelle des roches. Ces éléments sont classés en plusieurs ensembles selon leurs teneurs dans la croûte terrestre. Les éléments majeurs correspondent aux éléments dont la concentration est en général supérieure à 0,1 % et s'opposent donc aux éléments traces.

Dans les sols, les principaux éléments majeurs sont le fer (Fe), l'aluminium (Al), le manganèse (Mn), le calcium (Ca), le magnésium (Mg), le potassium (K) et le sodium (Na). Ils sont nécessaires à la physiologie des plantes. Connaître leurs teneurs dans les différents horizons du sol permet de comprendre comment le sol s'est formé et de comparer les sols entre eux.

Le fer (Fe) est très abondant dans les sols avec des teneurs allant de 0,05 à 19 % de fer total. Les différentes formes du fer correspondent au résultat de néoformations, selon les conditions physico-chimiques qui prévalent lors de leur formation. Les deux principaux oxydes de fer sont la goëthite et l'hématite. Cette dernière est associée avec la goëthite dans de nombreux sols tropicaux. Le fer apparaît dans les oxydes et les hydroxydes, dans les silicates argileux et dans les carbonates. Ses composés sont fortement colorés et interviennent pour une part importante dans la couleur des sols. Certaines de ces formes sont notamment indicatrices de la présence d'excès d'eau qui entraîne une réduction du fer et des couleurs gris-bleu à gris-vert. Le fer est assez facilement mobilisable et peut donc migrer au sein du sol et se reconcentrer ailleurs (concrétions, horizons d'accumulation).

L'aluminium étant intégré aux minéraux argileux des sols, il est présent dans tous les sols. La gibbsite est de loin le principal oxyde d'aluminium cristallisé dans les sols. Elle n'est pas rare dans les horizons d'altération des sols des régions tempérées humides, mais en faible quantité. Elle peut être présente dans certains ANDOSOLS (sols développés sur roches volcaniques) jeunes.

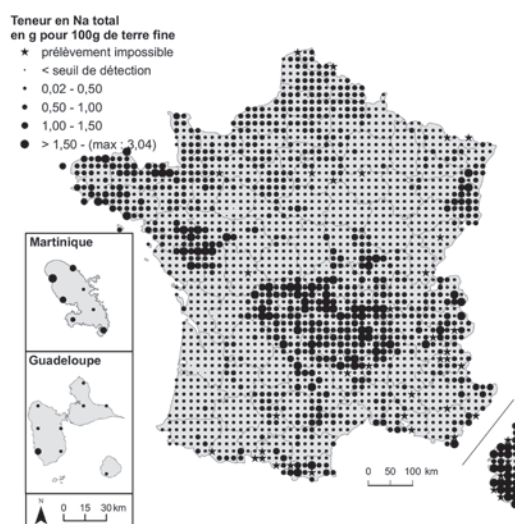
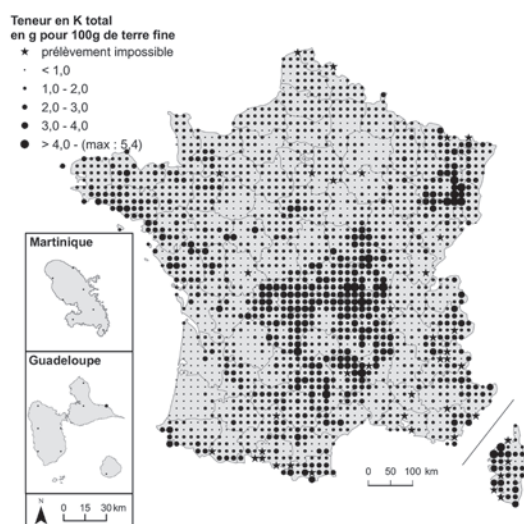
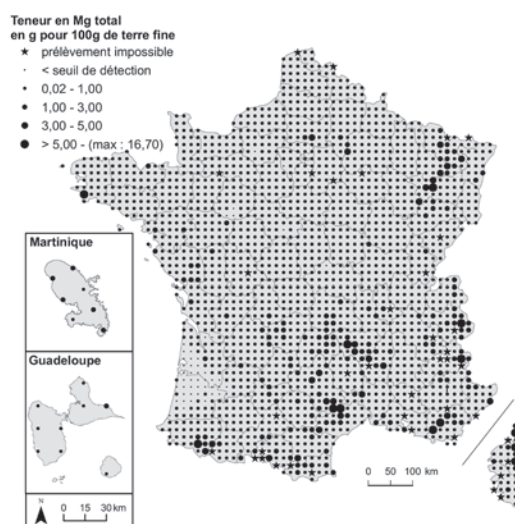
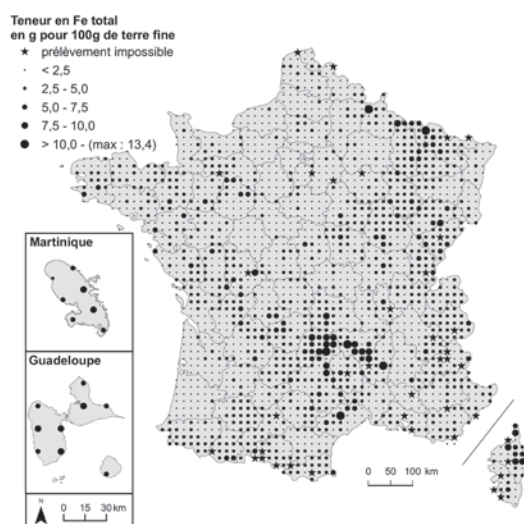
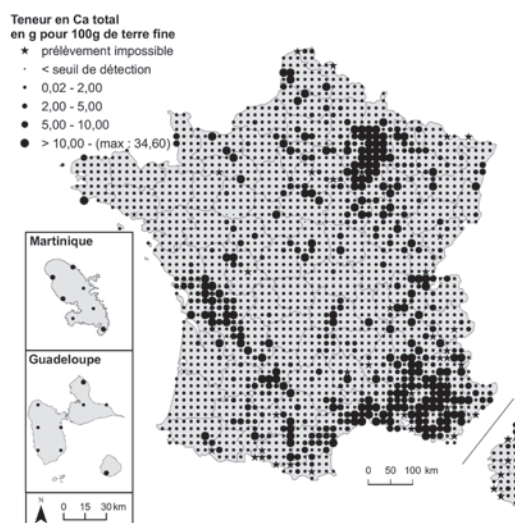
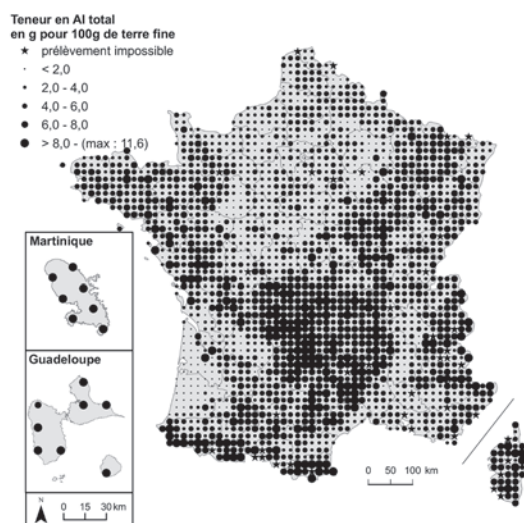
La forme amorphe de l'aluminium associée à la silice peu ou mal cristallisée constitue l'allophane. Celui-ci s'associe en général à d'importants contenus en matières organiques.

Ces minéraux andiques caractérisent les ANDOSOLS des îles volcaniques d'Outre-Mer et du Massif central.

La géochimie du manganèse (Mn) est comparable à celle du fer. Les concentrations en manganèse dans les sols sont très variables et peuvent aller de teneurs très faibles (moins de 5 mg.kg^{-1}) à des teneurs très élevées dans des horizons d'accumulation ferro-manganique (jusqu'à $25\,000 \text{ mg.kg}^{-1}$). Dans les sols acides, le manganèse est beaucoup plus mobile que le fer. Mais en milieu calcaire, il est insolubilisé sous la forme d'oxydes de manganèse ce qui peut générer des carences pour les plantes.

Dans les roches, le calcium est associé au sodium et au potassium, alors que le magnésium est associé au fer. Au cours des transformations des minéraux, le calcium participe à la formation des carbonates. Le magnésium, quant à lui, peut être intégré dans les silicates avec le potassium. Dans la formation des calcaires dolomitiques, il est associé au calcium. L'ensemble concourt à la présence de calcium et de magnésium dans les sols associés à des minéraux primaires ou secondaires dans le cas de carbonates et de silicates. Au final, les quantités de calcium et de magnésium présentes dans le sol découlent des conditions d'altération des minéraux primaires et de la lixiviation des éléments.

Le potassium et le sodium sont largement présents dans l'environnement. Leur teneur dans les sols dépend de la nature des roches dans lesquels les sols se développent. Les sels de potassium et de sodium sont très solubles. Le sodium apparaît en concentrations peu élevées sauf dans les sols salés. Le potassium, quant à lui, est toujours présent en fortes quantités dans les principaux minéraux primaires des sols, mais ses concentrations sont pourtant faibles dans les sols. Cependant, il est fixé plus ou moins énergiquement par certains minéraux secondaires argileux. Les sols des régions tropicales ne contiennent presque pas de potassium car la destruction des minéraux primaires y est intense et la formation de minéraux argileux riches en potassium est impossible sous certaines conditions climatiques.



Source : GIS Sol, RMQS, 2011.

- Afes, 2008. *Référentiel pédologique*. Versailles : Éditions Quæ. 435 p.
- Baize D., Jabiol B., 2011. *Guide pour la description des sols*. Versailles : Éditions Quæ. 432 p.
- Baize D., 2004. *Petit lexique de pédologie*. Versailles : Inra Éditions. 271 p.
- Calvet R., 2003. *Le Sol. Propriétés et fonctions. Tome 1 : Constitution et structure, phénomènes aux interfaces*. Paris : Édition France Agricole-Dunod. 456 p.
- Calvet R., 2003. *Le Sol. Propriétés et fonctions. Tome 2 : Phénomènes physiques et chimiques. Applications agronomiques et environnementales*. Paris : Édition France Agricole-Dunod. 512 p.
- Colmet-Daage F., 1969. *Carte des sols des Antilles : Guadeloupe volcanique et Martinique au 1/20 000*. ORSTOM Antilles.
- Davet P., 1996. *Vie microbienne du sol et production végétale*. Versailles : Inra Éditions. 383 p.
- Duchaufour P., 1983. *Pédologie. Tome 1 : Pédogenèse et classification* ; Masson, 491 p.
- Duchaufour P., 1997. *Abrégé de pédologie : sol, végétation, environnement*. Paris : Masson, 291 p.
- Duchaufour P., 2004. *Introduction à la science du sol. Sols, végétation, environnement*. 6^e édition. Paris : Dunod. 352 p.
- Duchaufour P., Bonneau M., Souchier B. 1994. Jamagne M., 2011. Legros J.-P., 1996. *Pédologie. Tome 2 : Constituants et propriétés du sol*. Paris : Masson. 692 p.
- Girard M.-C., Walter C., Rémy J.-C., Berthelin J., Morel J.-L., 2011. *Sols et environnement. Cours, exercices corrigés et études de cas*. 2^e édition. Paris : Dunod. 896 p.
- Gobat J.-M., Aragno M., Matthey W., 2010. *Le sol vivant. Bases de pédologie. Biologie des sols*. Lausanne : Presses Polytechniques et Universitaires Romandes. 817 p.
- Gras R., 1994. *Sols caillouteux et production végétale*. Versailles : Inra Éditions. 175 p.
- Legros J.-P. 1996. *Cartographies des sols : de l'analyse spatiale à la gestion des territoires*. Lausanne : Presses Polytechniques et Universitaires Romandes. 321 p.
- Jamagne M., 2011. *Grands paysages pédologiques de France*. Versailles : Éditions Quæ. À paraître.
- Mathieu C., Lozet J., 2011. *Dictionnaire encyclopédique de science du sol*. Paris : Éditions TEC&DOC. 733 p.
- Pansu M., Gautheyrou J., 2003. *L'analyse du sol, minéralogique, organique et minérale*. Springer-Verlag. 993 p.

- Robert M., 1996. Le sol : interface dans l'environnement ressource pour le développement. Paris : Masson. 244 p.
- Ruellan A., 2010. Des sols et des hommes. Un lien menacé. Marseille : IRD Éditions. 108 p.

Liens

- Base de données sols des régions méditerranéennes et tropicales de l'IRD :
<http://miruram.mpl.ird.fr/valpedo/miruram/index.html>
- Inventaire, Gestion et Conservation des Sols :
<http://www.gissol.fr/programme/igcs/igcs.php>
- Atlas minéralogique du BRGM :
<http://webmineral.brgm.fr:8003/mineraux/Main.html>
- Association Française pour l'Étude des Sols :
<http://www.afes.fr>
- Les sols européens :
<http://eusoils.jrc.ec.europa.eu/>

L'état des sols de France et son évolution



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.

L'état des sols et de leur dégradation peut être appréhendé par la mesure de différents paramètres ou de différents indicateurs fonctionnels : fertilité chimique, état physique et organique, quantité et diversité des organismes qu'ils abritent, stockage de carbone, perte en sol, degré de contamination en divers éléments indésirables, etc.

Le bilan de cet état des sols fait apparaître des situations préoccupantes pour la durabilité de leurs fonctions. Il souligne également les fortes incertitudes qui subsistent sur l'effet à long terme de certaines pressions, comme celles exercées par le changement climatique. La distribution et la dynamique temporelle de certains contaminants restent encore à ce jour peu connues, tout comme celles de plusieurs paramètres de la qualité physique des sols. La fertilité chimique des sols agricoles est globalement satisfaisante, mais son maintien à long terme nécessitera une meilleure gestion et un recyclage accru de certains éléments.

L'état des sols de France et son évolution

72 Les facteurs d'évolution des sols sous l'action de l'Homme

- 73 • La pression démographique et ses conséquences sur les sols
- 76 • La pression exercée par les activités humaines et ses conséquences
- 78 • L'impact du changement climatique et des événements extrêmes

80 L'évaluation de la fertilité chimique des sols de France

- 82 • L'azote, le phosphore et le potassium dans les sols de France métropolitaine
- 87 • Les risques de carence en oligo-éléments pour les cultures dans les sols agricoles métropolitains
- 92 • Les cations échangeables et l'acidification des sols

104 Le sol, acteur de la biodiversité terrestre

- 105 • Les caractéristiques des sols déterminent la diversité des espèces végétales et animales terrestres
- 107 • La diversité des communautés microbiennes des sols
- 109 • La diversité des communautés d'invertébrés des sols
- 110 • Les perspectives

112 Les sols et le changement climatique

- 113 • Le carbone et la matière organique dans les sols de France
- 118 • Les émissions par les sols de méthane et de protoxyde d'azote

122 Les pertes en sol

- 122 • L'érosion : un processus majeur de la dégradation des sols
- 127 • Les glissements de terrain
- 133 • L'artificialisation et l'imperméabilisation des sols

139 Les sols, la santé et les écosystèmes

- 139 • Les éléments traces métalliques dans les sols de France
- 160 • Les polluants organiques persistants et les pesticides dans les sols de France
- 171 • Les sols réservoirs de bactéries pathogènes de l'Homme

174 Le tassement dans les sols de France

L'état des sols de France et son évolution observée ou probable

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

Les sols fournissent les éléments indispensables à la production végétale. À ce titre, un indicateur de leur qualité est l'état de leur fertilité chimique, c'est-à-dire de leur capacité à soutenir une forte productivité végétale tout en minimisant les apports externes. Les indicateurs utilisés pour juger de cette fertilité reposent sur des analyses chimiques et physico-chimiques permettant d'approcher la capacité des sols à stocker et à rétrocéder aux végétaux les éléments nutritifs. Pour cette même fonction, les sols doivent également présenter des propriétés et des états physiques permettant le stockage et l'infiltration de l'eau, l'aération et la croissance racinaire. Le tassement des sols, encore peu étudié à l'échelle nationale, est à ce titre une des menaces concernant la qualité physique des sols.

Les sols sont le support de la biodiversité terrestre et abritent un très grand nombre d'organismes vivants. Ils contiennent une immense quantité de micro-organismes 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.

Certains de ces micro-organismes interviennent directement dans les grands cycles du carbone et de l'azote, influençant ainsi les échanges de gaz à effet de serre entre les écosystèmes terrestres et l'atmosphère. La capacité à stocker ou à émettre ces gaz dépend de facteurs externes, comme le climat ou les changements d'usage des sols, mais également de propriétés intrinsèques de ces derniers.

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. 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 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. Les indicateurs retenus ici sont les quantités de contaminants observées et, lorsque cela est possible, des indicateurs visant à approcher leur mobilité et leur disponibilité pour les plantes.



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

Les facteurs d'évolution des sols sous l'action de l'Homme

Les sols se forment et évoluent lentement sous l'action de phénomènes naturels, au contact de l'eau, de l'air, du sous-sol et des organismes vivants. Par contre, les sols peuvent se dégrader très rapidement sous l'action conjuguée 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.

L'attraction exercée par certaines régions, comme le Sud et les zones littorales, génère une pression démographique sur les sols de ces territoires. L'étalement urbain s'accélère autour des grandes villes, imperméabilisant des sols agricoles ou naturels. L'évolution des modes de vie favorise la périurbanisation. La mobilité est désormais nécessaire pour relier les lieux de résidence, de travail, de loisirs et de consommation, qui ne sont plus regroupés dans les centres urbains. De même, l'engouement pour les habitations individuelles en milieu rural augmente les déplacements et génère l'aménagement de voies de transport qui participent à l'imperméabilisation des sols.

Les activités agricoles ou industrielles et le transport 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. 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 et participer à l'émission de gaz à effet de serre (par exemple de N_2O par les sols).

Les activités touristiques favorisent, quant à elles, l'imperméabilisation des sols ou leur tassement, comme par exemple lors de la construction d'habitations et d'équipements touristiques dans les zones littorales, de l'aménagement de pistes de ski en zones montagneuses ou du piétinement sur les sentiers de randonnée.

Enfin, le changement climatique accéléré par les activités humaines peut intensifier les phénomènes d'érosion. En effet, l'accroissement des phénomènes pluviométriques extrêmes est susceptible d'accélérer les pertes en sol et la probabilité d'occurrences de coulées d'eau boueuse. Le changement climatique peut aussi 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.



La périurbanisation autour du bassin d'Arcachon (Gironde).

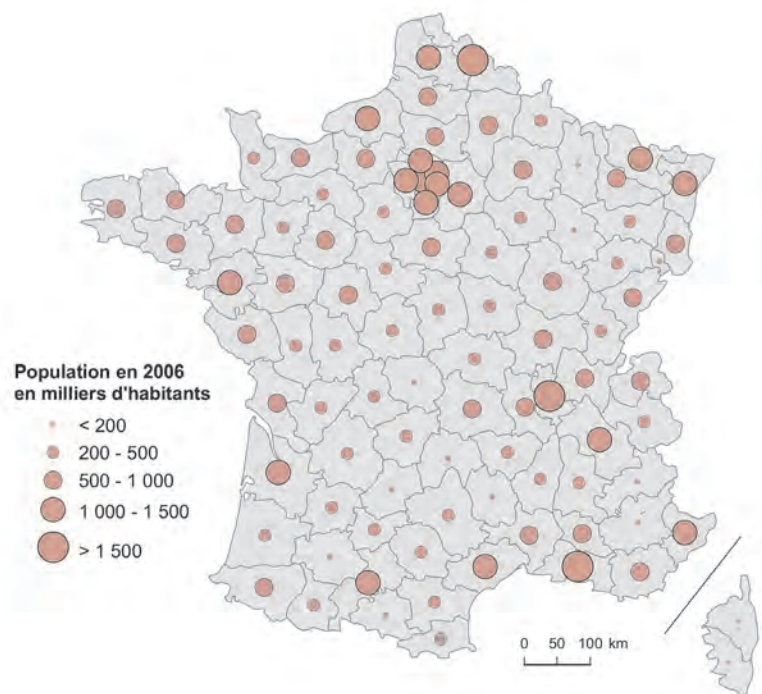
■ La pression démographique et ses conséquences sur les sols en termes de consommation d'espaces

L'évolution démographique est contrastée en France, opposant des départements ruraux en perte de vitesse et des départements littoraux et touristiques particulièrement attractifs. Les surfaces agricoles et naturelles diminuent ainsi au profit du développement urbain et de l'aménagement de nouveaux axes de transport.

Les régions les plus peuplées en France sont industrielles (Île-de-France, Nord-Pas-de-Calais, Rhône-Alpes) ou littorales et touristiques (Aquitaine, Bretagne, Languedoc-Roussillon, Midi-Pyrénées, Pays-de-la-Loire, Provence-Alpes-Côte d'Azur). Sur les 101 départements que compte la France, 61 ont moins de 100 habitants par kilomètre carré (hab./km²), 20 entre 100 et 200 hab./km², 16 entre 200 et 1 000 hab./km² et 4 plus de 1 000 hab./km². La région parisienne est la plus densément peuplée : près de 20 700 hab./km² à Paris et entre 5 300 et 8 800 hab./km² pour le Val-de-Marne, la Seine-Saint-Denis et les Hauts-de-Seine. Les départements les moins peuplés sont ruraux ou montagneux avec moins de 30 hab./km² (Alpes-de-Haute-Provence, Ariège, Cantal, Creuse, Gers, Hautes-Alpes, Haute-Marne, Lozère). Enfin, la Guyane se démarque des autres départements d'Outre-mer avec moins de 3 hab./km², alors que la Guadeloupe, la Martinique et La Réunion comptent entre 250 et 315 hab./km². La Guyane est en effet le plus grand département français, couvert à plus de 95 % de forêt et où seul le littoral est peuplé.

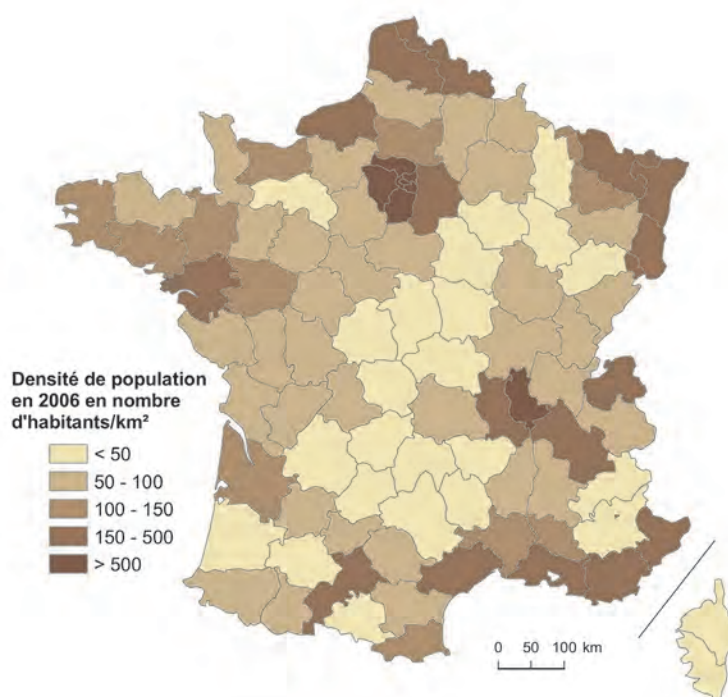
L'analyse de l'évolution de la population entre 1999 et 2006 montre que les départements dont la population diminue sont plutôt ruraux (Allier, Cantal, Creuse, Nièvre, etc.). La diminution moyenne annuelle de 0 à 0,5 % s'explique surtout par un solde migratoire négatif, notamment dans les Ardennes, la Haute-Marne et les Vosges. Dans les départements d'Outre-mer, l'évolution moyenne annuelle de la population est plus de deux fois plus importante (1,62 %) qu'en France métropolitaine (0,69 %). Ceci s'explique par un solde naturel (différence entre le nombre de naissances et de décès) élevé : 1,45 % contre 0,39 % en France métropolitaine et particulièrement en Guyane (2,63 %). Enfin, la population des départements littoraux ou touristiques s'accroît de plus de 1,40 % par an en moyenne (Alpes-de-Haute-Provence, Corse-du-Sud et Haute-Corse, Haute-Garonne, Haute-Savoie, Hérault, Landes, Vendée). Ces évolutions sont essentiellement dues à un solde migratoire élevé (0,76 %).

Le nombre d'habitants par département en 2006



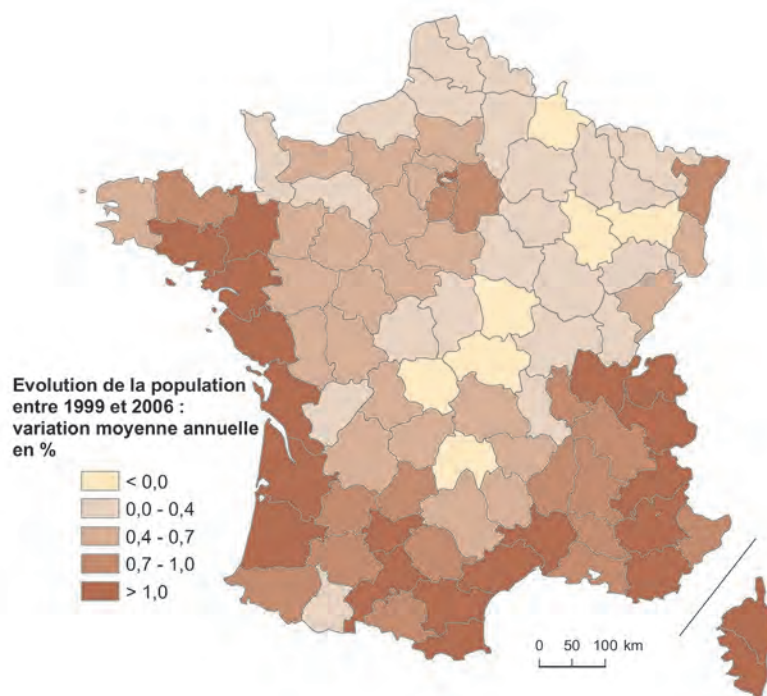
Source : Insee, 2010.

La densité de population par département en 2006 (en hab./km²)



Source : Insee, 2010.

L'évolution de la population (en %) de 1999 à 2006



Source : Insee, 2010.

Note : La **variation totale** de population correspond à la somme des variations annuelles moyennes dues au **solde naturel** (différence entre le nombre de naissances et de décès) et au **solde migratoire** (bilan des arrivées et des départs, concernant les migrations entre régions ou entre la France et le reste du monde).

Les projections de population à l'horizon 2030 (modèle Omphale de l'Insee) montrent que même si l'augmentation moyenne nationale devait être de l'ordre de 10 %, les populations des régions Auvergne, Bourgogne, Champagne-Ardenne et Lorraine devraient diminuer. Par contre, la population de la Guadeloupe et de la Réunion devraient augmenter de plus de 30 % et celle de la Guyane de plus de 100 %. En Alsace, Aquitaine, Bretagne, Midi-Pyrénées, Pays-de-la-Loire, Provence-Alpes-Côte d'Azur et Rhône-Alpes, la population devrait augmenter de 12 à 20 % et de plus de 30 % en Languedoc-Roussillon.

L'attraction exercée par certains territoires, associée à un engouement croissant pour la maison individuelle, suscite une extension des zones urbanisées. Elle se fait préférentiellement autour des grandes villes (Lille, Lyon, Nantes, Paris, etc.), le long des axes de transport (Midi-Pyrénées), du réseau hydrographique (couloir rhodanien) ou près du littoral (Languedoc-Roussillon, littoral atlantique et breton). Par contre, elle est plus diffuse en Bretagne et dans les Pays-de-la-Loire, où les territoires agricoles sont plus complexes. *In fine*, le tissu urbain discontinu représente les trois quarts des espaces artificialisés, augmentant de plus de 2 % entre 2000 et 2006 (le tissu urbain est dit continu quand la végétation non linéaire et le sol nu sont rares, et discontinu lorsqu'ils occupent des surfaces non négligeables). Enfin, les réseaux routiers et ferroviaires ont progressé de près de 20 % durant la même période. La consommation d'espace par la progression des grands réseaux est évaluée à 13 km² par an. On note ainsi la construction de l'autoroute A89 reliant Bordeaux et Clermont-Ferrand, l'autoroute A19 entre Courtenay et Orléans, ou la ligne

ferroviaire à grande vitesse reliant Paris et Strasbourg. La consommation d'espace par la périurbanisation et la construction d'axes de transport s'effectue 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. En effet, la surface agricole utilisée (SAU) occupe environ 30 millions d'hectares en 2008, soit 53 % du territoire métropolitain, mais diminue chaque année. L'utilisation agricole a ainsi disparu sur une superficie équivalente à la taille de la Lozère en l'espace de 10 ans. Le dernier inventaire CORINE Land Cover montre ainsi que près de 10 000 hectares de forêts et milieux semi-naturels et près de 76 000 hectares (0,2 %) de terres agricoles ont été artificialisés entre 2000 et 2006. Cette évolution s'accompagne d'une diminution des surfaces herbagères au profit notamment des grandes cultures. Ces dernières représentent 11,9 millions d'hectares en 2008, soit plus de 65 % du total des terres arables.

Le phénomène d'artificialisation des sols s'est accéléré lors de la dernière décennie. Pourtant des solutions existent pour le limiter, comme par exemple la réutilisation des friches industrielles, la reconstruction de la ville dans la ville, le maintien des fonctions des sols par des revêtements poreux, la conservation de sols végétalisés dans les parcs et jardins urbains, etc.

Pour en savoir plus

- Chevery C. et Gascuel C., 2009. *Sous les pavés, la terre : connaître et gérer les sols urbains*. Montreuil : Omniscience. 208 p. (coll. Écrin).
- European Commission, 2011. *Overview of best practices for limiting soil sealing or mitigating its effects in EU-27*. 220 p. Téléchargeable : <http://ec.europa.eu/environment/soil/sealing.htm>
- Ifen, 2006. *L'environnement en France*. Collection *les synthèses*. 499 p.
- Service de l'Observation et des Statistiques (SOeS), 2010. *L'environnement en France*. Collection *les synthèses*. 138 p.

Liens

Institut national de la statistique et des études économiques (INSEE) : www.insee.fr/

■ La pression exercée par les activités humaines et ses conséquences en termes de dégradation des sols

Premiers supports du développement de nos villes, les sols sont également l'objet d'autres enjeux comme la production alimentaire ou énergétique, la valorisation des déchets, la lutte contre le changement climatique et la préservation 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.

La croissance démographique et économique génère un besoin accru d'espaces et donc de sol, que ce soit pour les productions alimentaire, de matériaux ou d'énergie, ou pour la valorisation des déchets ou des eaux usées. Si, au niveau national, les besoins alimentaires sont couverts, en partie grâce à l'abondance et à la fertilité des sols, les besoins en matériaux et en énergie vont croître. En effet, l'utilisation de la biomasse constitue une voie importante de substitution aux produits pétroliers. Les objectifs à atteindre à l'horizon 2020 sont très ambitieux, car 50 % de l'objectif portant sur l'énergie renouvelable repose sur la biomasse (Loi ENE portant Engagement national pour l'environnement, dite Grenelle). La valorisation de la matière organique des déchets et des effluents d'élevage est également un enjeu important, que ce soit en termes de traitement ou d'entretien de la fertilité des sols.

La pression exercée par les activités humaines se matérialise donc sous différentes formes suivant les usages et les sols concernés. Le retournement des prairies permanentes au profit de cultures alimentaires ou énergétiques par exemple se traduit par un déstockage important de carbone et souvent une perte de la biodiversité. En 2010, les estimations publiées par Agreste (service statistique agricole) sur la période 2006-2009 montraient une diminution significative des surfaces toujours en herbe de 415 000 hectares au profit de l'urbanisation d'une part, mais également pour plus de 60 % pour une mise en culture. Cette tendance s'est poursuivie entre 2009 et 2010. Si les surfaces diminuent, la qualité physique ou chimique des sols peut également être modifiée. Ainsi, l'utilisation d'engins agricoles et forestiers plus lourds qu'auparavant peut favoriser le tassement des sols. L'exploitation plus poussée de la biomasse forestière ou la progression de cultures énergétiques dédiées pourrait également contribuer à la diminution de la fertilité des sols.

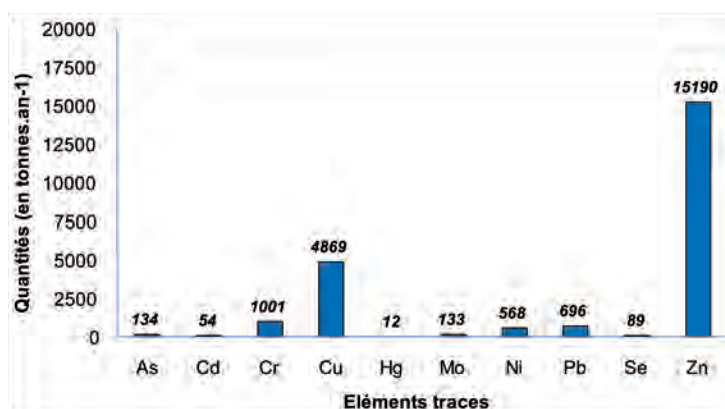
L'épandage des déchets comme les boues de stations d'épuration (Step) et les composts urbains, la valorisation des déjections animales et l'apport des engrais ou de produits de traitement phytosanitaires augmentent les

risques de contamination diffuse des sols et notamment en éléments traces métalliques (ETM). Les fertilisants minéraux peuvent contaminer les sols en cadmium *via* les engrais phosphatés. Les produits phytosanitaires peuvent augmenter la teneur des sols en cuivre (« bouillie bordelaise » utilisée comme antifongique en particulier par l'agriculture biologique), ou en arsenic et en mercure (utilisés notamment par le passé en arboriculture), et en polluants organiques persistants. L'épandage de lisiers de porcs enrichit les sols en zinc et en cuivre présents dans l'alimentation animale. L'utilisation de ces métaux comme additifs alimentaires est toutefois en diminution, pour des raisons environnementales et économiques. Enfin, les déchets organiques comme les boues de Step sont source de micropolluants organiques et minéraux ou d'organismes pathogènes. Les effluents d'élevage sont aussi des sources d'organismes pathogènes et de résidus médicamenteux. Toutefois, selon l'agence nationale du médicament vétérinaire, les ventes d'antibiotiques ont diminué de 13 % en 2009 par rapport à 2008, et de 19,3 % par rapport à 1999.

D'autres sources de contamination existent, comme les retombées atmosphériques d'aérosols d'origine anthropique (activités industrielles, circulation automobile, incinération d'ordures ménagères), qui s'ajoutent aux retombées d'origine naturelle (éruption volcanique, feux de forêts).

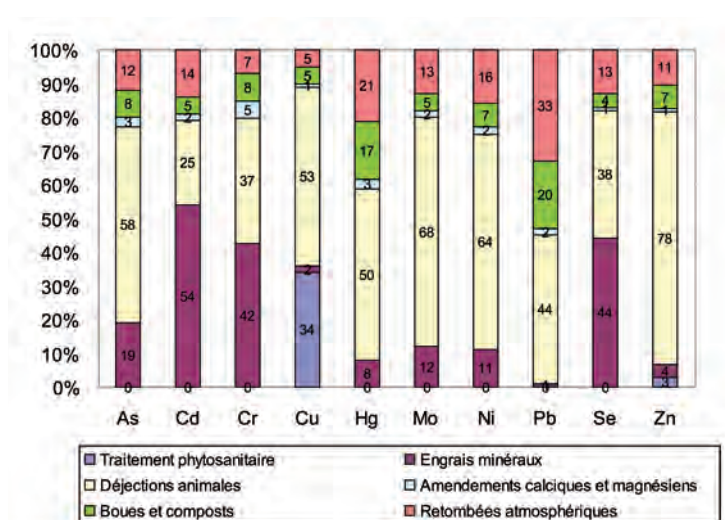
Le bilan réalisé en 2007 par la Sogreah à la demande de l'Ademe a permis d'identifier et de quantifier ces flux en ETM aux échelles départementale et nationale. D'un point de vue quantitatif global, les déjections animales, les engrais minéraux, les traitements phytosanitaires et les retombées atmosphériques sont les sources majeures d'apport en ETM. Par contre, lorsque les flux sont rapportés aux surfaces, les risques de contamination sont plus élevés lorsque les sources ont des teneurs potentiellement élevées en certains ETM, comme l'apport de déjections animales, de boues résiduaires urbaines, de composts de déchets verts et les retombées des cendres de chaufferies à bois.

Les quantités totales d'éléments traces métalliques entrant sur les sols agricoles



Source : Sogreah-Ademe, 2007.

La part des différentes sources contribuant aux apports d'éléments traces métalliques



Source : Sogreah-Ademe, 2007.

Ponctuellement, en fonction des activités industrielles passées ou actuelles, la pollution des sols peut être beaucoup plus importante. L'origine des pollutions peut être très variée : rejet dans les panaches des cheminées

d'usines, accident de manutention ou de transport de matières polluantes, stockage ou confinement défectueux de produits chimiques et de déchets, extraction et traitement de minerais.

Pour en savoir plus

- 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>

Lien

Agence nationale du médicament vétérinaire : <http://www.anmv.afssa.fr/>

■ L'impact du changement climatique et des événements extrêmes

La modification des régimes hydrique et thermique et l'augmentation de la fréquence de certains événements extrêmes sont les principaux impacts induits par le changement climatique sur les sols.

Les résultats présentés dans les rapports du GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) suggèrent de fortes évolutions climatiques et un réchauffement important en France métropolitaine et sur la région des Caraïbes au cours du XXI^e siècle, avec une plus forte augmentation des températures estivales, en particulier en ce qui concerne le sud de la France. Les précipitations estivales diminueraient sur tout le territoire, et plus fortement dans le Sud.

L'augmentation de la température agit directement sur l'activité microbienne des sols. Elle peut donc être à l'origine de l'accélération de certains processus, comme par exemple la minéralisation de la matière organique. Cette question est centrale pour la conservation des stocks de carbone organique accumulés dans les sols des régions froides du territoire, comme par exemple dans les pelouses d'altitude. Inversement, en favorisant la productivité végétale dans certaines régions, cette augmentation de la température, ainsi que l'augmentation de la concentration de CO₂ dans l'atmosphère, pourraient être à l'origine d'entrées de carbone plus importantes dans les sols. Il est actuellement très difficile de prévoir dans quel sens global jouera le changement climatique. Il est fort probable que les évolutions seront différenciées sur le territoire, en fonction de la structure spatiale de ces changements et des stocks de carbone présents aujourd'hui.

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. Même en milieu tempéré, certains processus, comme l'entraînement des particules les plus fines du sol (les argiles) en profondeur, ou les phénomènes d'oxydoréduction du fer et du manganèse, pourraient être accélérés. Une augmentation des précipitations hivernales devrait accélérer les processus de lessivage des particules fines et des cations (calcium, magnésium, potassium, sodium, etc.) en profondeur. La capacité des sols à stabiliser le carbone organique pourrait en être modifiée. Compte tenu du fort pouvoir tampon de la plupart des sols, un changement rapide de leur pH sous l'effet du lessivage des cations n'est pas attendu. Il est toutefois possible que suite à un appauvrissement

très progressif en cations, certains sols finissent par atteindre des seuils critiques en dessous desquels des baisses du pH, accompagnées de carences ou de toxicités pour les plantes, pourraient apparaître.

L'augmentation de la fréquence des sécheresses devrait influencer la dynamique de la structure des sols et l'intensité et la profondeur de la fissuration estivale, en particulier 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. Il est aussi probable que certains processus liés à cette dynamique particulière de la structure, comme par exemple le brassage des horizons des sols vertiques (sols composés d'argiles gonflantes de la famille des smectites, qui gonflent par humectation et se rétractent au séchage) soient accélérés. Enfin, il n'est pas exclu que sous l'effet de contraintes plus fortes, certaines propriétés physiques des horizons profonds des sols puissent être modifiées (compacité, densité, rétention en eau). Certains changements de pH pourraient apparaître très localement dans certains sols issus d'alluvions marines ou fluviomarines et contenant des sulfures (par exemple dans l'estuaire de la Gironde ou dans le delta du Rhône). Dans ces milieux naturellement engorgés, un assèchement déclenche des processus d'oxydation des sulfures conduisant à la formation d'acide sulfurique. Ce phénomène de libération d'acide conduit à des pH très bas (de l'ordre de 2). Ils provoquent alors des toxicités empêchant l'implantation de toute culture pendant plusieurs années, voire plusieurs décennies.



Un chablis causé par la tempête de 2009.

L'augmentation de la fréquence de certains événements extrêmes pourrait également avoir des conséquences sur l'évolution des sols. Une augmentation de la fréquence des incendies de forêt liés aux périodes de sécheresse est susceptible de modifier très fortement le cycle des éléments minéraux et du carbone organique. Une élévation de la fréquence des pluies de forte intensité devrait se traduire par une augmentation de l'aléa d'érosion des sols et des pertes en sol accrues liées à ce phénomène. 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. Dans certains milieux côtiers, l'augmentation de la fréquence des tempêtes

exceptionnelles, allée à une remontée progressive du niveau des océans, pourrait provoquer des inondations marines plus fréquentes (cas, par exemple, de la tempête Xynthia) affectant les propriétés des sols (augmentation du pH, de la salinité ou de la sodicité, diminution de la stabilité de la structure) de façon plus ou moins durable. De façon plus générale, l'augmentation du niveau des mers menacera directement les sols côtiers lorsqu'ils ne sont pas protégés par des bandes côtières surélevées, qu'elles soient naturelles (dunes, etc.) ou artificielles (digues, etc.).

La plupart des effets directs attendus du changement climatique sur les sols sont très inférieurs aux effets liés aux actions volontaires de l'Homme. Toutefois, certaines évolutions lentes pourraient amener à franchir des seuils de fonctionnement des sols et certains événements extrêmes sont susceptibles de les y aider.



Le 27 février 2010, la tempête Xynthia touchait très durement le littoral atlantique. En Charente-Maritime, l'eau salée a inondé des terres agricoles. Après assèchement, les sols sont abîmés, compactés et salés, inaptes à la culture.

L'évaluation de la fertilité chimique des sols de France

La notion de fertilité des sols est souvent ambiguë, car elle présente plusieurs composantes. Aux sens agronomique et agro-environnemental, elle est définie comme la capacité des sols à soutenir une forte productivité végétale tout en minimisant les apports de matières fertilisantes procurant des éléments nutritifs indispensables aux cultures, les amendements organiques ou minéraux, ou les autres actions correctives. La diminution des apports de certains engrais minéraux (potassiques ou phosphatés) pose la question du maintien de la fertilité des sols à long terme au regard des pratiques agricoles actuelles. En revanche, certaines situations excédentaires sont préjudiciables à la qualité des eaux. Les carences en certains oligo-éléments apparaissent relativement fréquentes. Enfin, l'acidification se manifeste surtout en sols forestiers peu pourvus en carbonates et en silicates. En milieu tropical, de très nombreux sols sont naturellement acides.

Les plantes prélèvent dans le sol les éléments minéraux pour leur croissance et leur développement. Trois éléments majeurs, l'azote (N), le potassium (K) et le phosphore (P) sont indispensables à leur croissance. Les végétaux prélèvent également du calcium (Ca), du soufre (S), du fer (Fe) et du magnésium (Mg), ainsi que divers oligo-éléments comme le cuivre (Cu) ou le zinc (Zn). La source naturelle principale de ces éléments est l'altération des roches dans lesquelles le sol se forme. Un certain nombre de ces éléments sont susceptibles d'être entraînés en profondeur par les eaux de percolation, ou bien latéralement via les eaux de ruissellement ou l'érosion. Cela provoque un appauvrissement à long terme des sols en ces éléments. En sols cultivés et en l'absence d'apport externe ou de recyclage, les exportations de ces éléments par les récoltes sont très largement supérieures à leur fourniture par l'altération et par les apports atmosphériques, et augmentent donc fortement cette tendance générale. Cet appauvrissement concerne également les sols non cultivés, où les apports externes sont généralement limités aux retombées atmosphériques. Celles-ci peuvent cependant représenter une part significative des prélèvements par la végétation naturelle. Les retombées d'azote, dont celles dues aux émissions d'ammoniac par l'élevage, sont une source d'azote importante participant ainsi à l'accroissement d'environ 50 % de la productivité des forêts françaises. À condition climatique comparable, la productivité des sols est alors contrainte par la fourniture et la disponibilité des éléments les plus limitants pour la croissance des végétaux. Dans les sols dont le pH n'est pas tamponné par la présence de carbonates ou de silicates, l'appauvrissement des sols peut être accentué par les dépôts atmosphériques acides (« pluies acides »), qui favorisent les transferts de cations hors des profondeurs exploitées par les racines. Les retombées azotées constituent ainsi un important facteur d'acidification des sols forestiers.

La caractérisation chimique des sols permet de diagnostiquer leur fertilité. Forts de ce diagnostic, les agriculteurs peuvent apporter aux sols des éléments nutritifs ou corriger leur acidité. Environ 250 000 analyses de terre sont réalisées chaque année en France, majoritairement à la demande des agriculteurs, afin de gérer au mieux la fertilité de leurs sols. Pour les sols agricoles de la France métropolitaine, la Base de Données d'Analyses de Terre (BDAT) a permis de regrouper ces analyses. Cette base donne ainsi la possibilité de cartographier les résultats de ces analyses et de détecter les évolutions temporelles les plus marquées. La BDAT est la seule source d'informations nombreuses sur la fertilité des sols. Elle présente toutefois des limites, dans la mesure où les agriculteurs ne font pas tous réaliser des analyses. Les données peuvent donc comporter des biais qu'il n'est pas possible d'estimer. Les données du Réseau de Mesures de la Qualité des Sols (RMQS) fournissent également une vision spatialisée de la distribution de ces éléments.



Détermination de la granulométrie d'un échantillon de sol par sédimentation selon la norme NF X 31-107.

1 Comment diagnostiquer la fertilité d'un sol ?



Le prélèvement d'une carotte de sol.

Pour un diagnostic de la fertilité et le conseil agronomique associé, la caractérisation chimique des sols s'effectue sur des échantillons prélevés dans les 15 à 30 premiers centimètres du sol. De 8 à 15 carottes de sol sont récoltées au sein d'une parcelle ou d'une zone considérée comme homogène. Elles sont ensuite mélangées afin d'obtenir un échantillon représentatif du sol à caractériser. Les procédures de prélèvement, de préparation et d'analyse sont normalisées.

L'échantillon est ensuite le plus souvent séché à l'air. Comme on considère généralement que les éléments grossiers ne contiennent pas d'éléments utiles pour les plantes, le sol est tamisé à 2 mm, pour en conserver la terre fine sur laquelle sont effectués les extractions et les dosages des éléments chimiques.

Les éléments nécessaires aux plantes doivent être disponibles dans la solution du sol pour être absorbés par les racines. Ces éléments sont présents dans le sol sous différentes formes dont certaines, retenues avec plus ou moins d'énergie par ses constituants, peuvent faire l'objet de transferts entre le sol et sa phase liquide (la solution du sol), ainsi qu'entre la solution du sol et les racines. Des analyses autres que les teneurs totales sont donc utilisées pour essayer d'approcher la fertilité des sols. Ces analyses sont cependant complexes à interpréter et nécessitent de connaître en détail le protocole utilisé. L'interprétation d'une teneur mesurée en un élément doit se faire au regard de la disponibilité de l'élément pour les plantes, de ses capacités de fixation dans le sol et de la capacité des plantes à le prélever. En terme de préconisation de fertilisation, il faut également tenir compte des exigences des plantes cultivées et des objectifs de rendement attendus.

Il est nécessaire d'utiliser des référentiels reposant sur la connaissance d'autres caractéristiques physico-chimiques des sols comme la teneur en argiles (voire leur nature), la capacité d'échange des cations, le pH ou la teneur en matières organiques.

Les analyses de terre permettent de réaliser un bilan des éléments fertilisants du sol et d'estimer la fertilisation nécessaire pour la croissance des plantes tout en évitant des apports excessifs pouvant contaminer l'environnement. À plus long terme, ces analyses permettent de porter un diagnostic sur l'enrichissement ou les risques d'appauvrissement des sols en éléments nutritifs. Ce diagnostic peut être réalisé à l'échelle du territoire métropolitain grâce aux bases de données nationales sur les sols constituées dans le cadre du Gis Sol.

■ L'azote, le phosphore et le potassium dans les sols de France métropolitaine

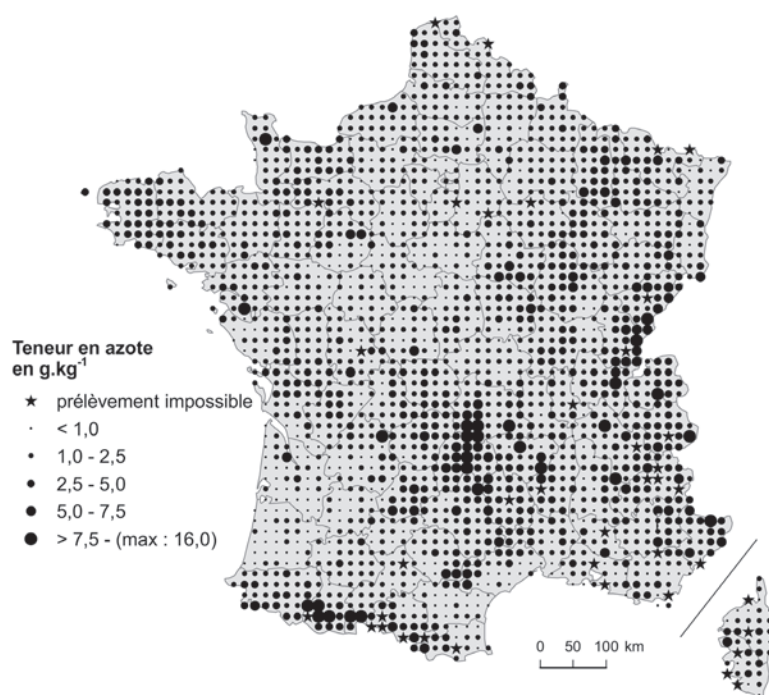
L'azote (N), le phosphore (P) et le potassium (K) sont les trois éléments nutritifs majeurs indispensables à la croissance des plantes (les trois plus importants, quantitativement). Ils constituent l'essentiel des ventes d'engrais minéraux en France. Selon l'Union des industries de la fertilisation (Unifa), ces ventes sont en baisse constante depuis les années 1970 en ce qui concerne P et K. Cette diminution est due aux progrès de la fertilisation raisonnée, à l'augmentation du coût des engrais et à une meilleure gestion des déjections animales. Il est probable également que certains sols historiquement à teneurs très faibles ont été très largement fertilisés entre 1950 et 1980 pour améliorer leur fertilité, alors qu'aujourd'hui ils ne sont plus fertilisés que sur la base d'un bilan « entrées-sorties ». Le phosphore et le potassium ont la particularité d'être fortement retenus par les constituants des sols, voire d'être présents dans certains minéraux (par exemple, pour le potassium dans les feldspaths potassiques, les micas, certaines argiles), ou dans des matières organiques (cas du phosphore et de l'azote). Les ventes nationales d'azote minéral sont, quant à elles, restées relativement stables au cours des dernières années.

L'azote dans les sols de France

L'azote est prélevé par les racines à l'état d'ion dissous dans la solution du sol sous forme ammoniacale (NH_4^+) ou nitrique (NO_3^-). Ces deux formes (ainsi que d'autres : urée, NH_3 ...) peuvent être apportées par la fertilisation minérale. La minéralisation des composés organiques (résidus de culture, apports d'amendements organiques, effluents d'élevage, matière organique du sol) libère également de l'azote sous ces mêmes formes. Les formes de l'azote disponibles dans le sol dépendent de mécanismes complexes (minéralisation, nitrification, dénitrification) sous la dépendance de l'activité des microorganismes.

L'azote nitrique en excès peut avoir des conséquences sur d'autres milieux comme les eaux superficielles et souterraines *via* les transferts de nitrates, ou l'air *via* les émissions de N_2O ou de NH_3 . Ces flux d'azote dans l'environnement s'exercent sur de courtes périodes, liées à des fluctuations climatiques ou aux périodes d'épandage des engrais. Il résulte de la complexité et de la rapidité de ces mécanismes qu'il est extrêmement difficile de faire un état global de l'azote – et de la fertilité azotée – dans les sols de France. On peut tout au plus cartographier l'azote total afin d'avoir une vision de la distribution de l'azote sous une forme moins labile dans les sols.

Les teneurs en azote total des horizons de surface (0-30 cm) des sols de France



Source : Gis Sol, RMQS, 201 ; IGN, Geofla®, 2006.

La distribution des teneurs en azote total dans les sols de la métropole reflète principalement l'influence des teneurs en matières organiques des sols. On observe ainsi des teneurs élevées dans les massifs montagneux et les zones prairiales ou bocagères du territoire. On note également des teneurs très importantes dans les sols développés dans des cendres volcaniques (ANDOSOLS du Massif central). Elles sont liées à la forte teneur en matières organiques et aussi probablement à une affinité particulière des nitrates avec les minéraux spécifiques de ces sols (allophanes). Les sols des Landes de Gascogne, bien que relativement riches en matières organiques, présentent des teneurs en azote relativement faibles car les matières organiques y sont peu riches en azote.

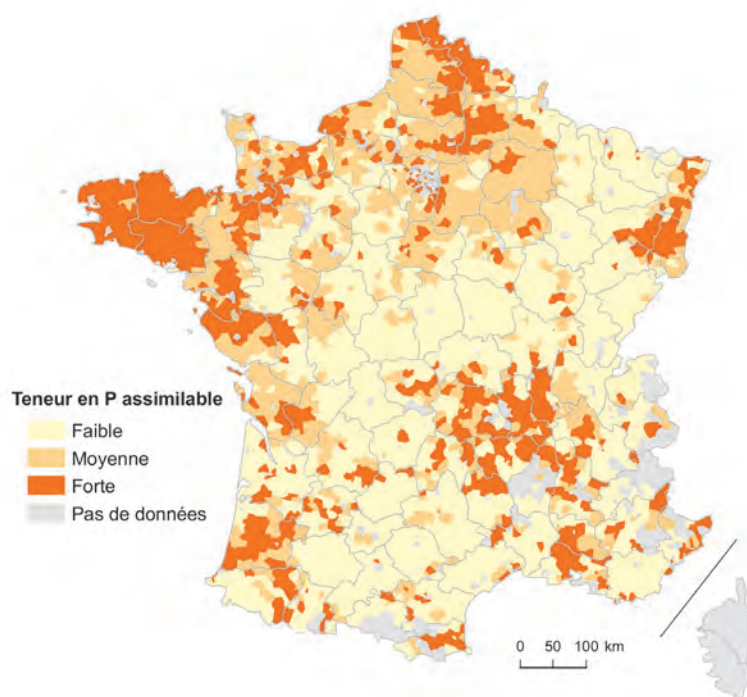
Le phosphore dans les sols de France

Le phosphore (P) est présent dans les sols sous forme minérale (environ 2/3 du P total) et organique. Le phosphore minéral naturel des sols est principalement retenu sous forme de phosphates calciques dans les sols carbonatés et sous des formes liées au fer et à l'aluminium dans les autres sols. Le phosphore organique est un des constituants des matières organiques des sols, elles-mêmes issues de la décomposition des résidus végétaux et animaux dans le sol. La fertilisation phosphatée des sols comprend une large gamme de produits le plus souvent dérivés des phosphates naturels (en totalité

en ce qui concerne les engrais minéraux). En France, les apports de phosphate minéral au sol sont en constante diminution depuis les années 1970 en raison, d'une part, des progrès réalisés en matière de raisonnement de la fertilisation, et, d'autre part, de l'augmentation du coût des engrais. Plusieurs études, donnant lieu à des controverses, tendent à montrer que les gisements de phosphates naturels mondiaux pourraient être épuisés dans trois siècles ou que les difficultés de leur extraction en feront très fortement augmenter le coût. L'apport de phosphore sur les sols français métropolitains était estimé à 775 000 tonnes en 2001, sous forme d'engrais minéraux (environ 50 %), de déjections animales (environ 40 %), d'effluents domestiques ou industriels (environ 10 %).

La distribution des teneurs en phosphore assimilable par les plantes dans les sols de France montre très clairement des effets régionaux. Les régions d'élevage intensif, comme la Bretagne, sont très largement excédentaires. Il s'agit de phosphore essentiellement d'origine organique, lié aux épandages d'effluents. Cette situation excédentaire provient principalement du fait qu'une part importante des aliments d'élevage – et donc du phosphore qu'ils contiennent – est importée de l'extérieur de la région. Cette part de phosphore contenue dans l'alimentation et dans les effluents qui en résultent n'a donc pas été préalablement prélevée dans les sols sur lesquels elle est apportée. Les données historiques de la

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



Source : Gis Sol, BDAT, 2011 ; IGN, Geofla®, 2006.

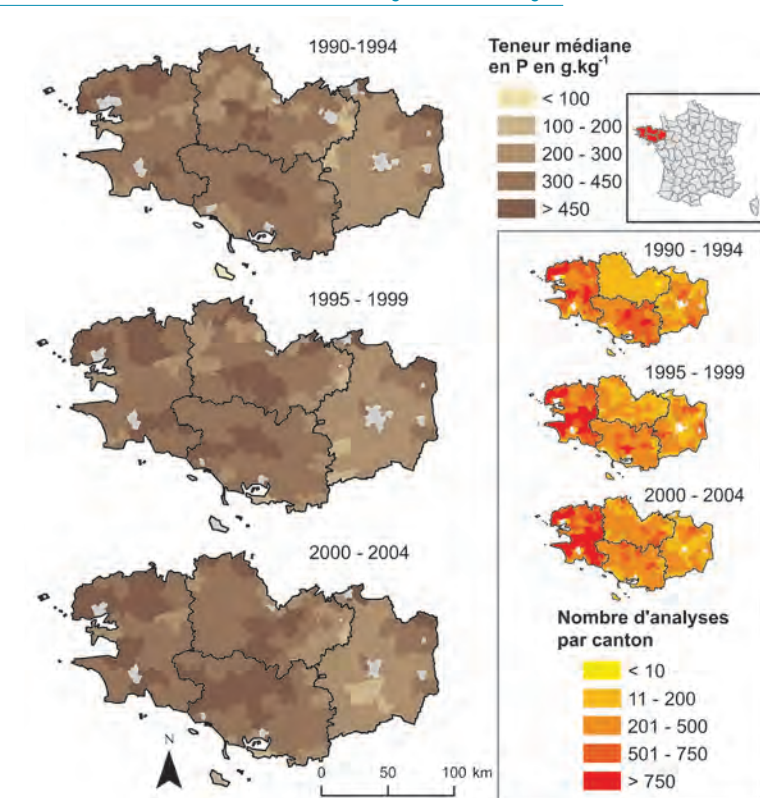
BDAT montrent que cette tendance à l'excédent se poursuit actuellement. C'est dans les zones où les teneurs en phosphore des sols sont les plus fortes que celles-ci augmentent le plus. Le phosphore en excès peut rejoindre les milieux aquatiques soit sous forme dissoute dans l'eau du sol, soit fixé sur des particules du sol arrachées par ruissellement et érosion. Conjointement aux excès de nitrates, cet afflux a contribué au développement, à partir des années 1960, des phénomènes d'eutrophisation des eaux de surface. D'importantes proliférations végétales apparaissent ainsi régulièrement : les « blooms algaux » en milieu lacustre, fluvial et estuarien.

Les autres secteurs où le phosphore apparaît en excédent sont principalement l'Alsace et le Nord-Pas-de-Calais. Dans ces régions, la craie phosphatée du Nord et les scories issues de l'activité sidérurgique ont été utilisées à partir de 1860. Les apports d'engrais phosphatés en agriculture se sont généralisés dans les années 1950 pour culminer dans les années 1970, entraînant un recours accru aux phosphates « industriels ». Les usages anciens ont ainsi contribué aux teneurs en phosphore mesurées aujourd'hui dans les sols. À l'inverse de la tendance observée en Bretagne, ces teneurs sont actuellement en baisse dans ces régions.

Dans de nombreuses régions, la majorité des sols présente des teneurs faibles en phosphore : Aquitaine, Bourgogne, Centre, Franche-Comté, Languedoc-Roussillon, Lorraine, Limousin et Midi-Pyrénées. Dans certains sols cultivés de façon relativement intensive, la pratique « d'impasses » de fertilisation phosphatée a pu s'effectuer sans perte de rendement dans un premier temps, mais sa poursuite entraînerait inévitablement au regard des mutations actuelles une réduction de la fertilité des sols. À l'inverse, de nombreuses teneurs plutôt faibles pourraient être liées à des besoins limités des cultures, comme par exemple dans le cadre de productions fourragères prairiales peu intensives.

Face à ces situations contrastées entre régions excédentaires et déficitaires, et compte tenu de la raréfaction à long terme de la ressource minérale en phosphore, l'enjeu de la gestion du phosphore en France passe par une meilleure gestion des apports et un recyclage accru des sources organiques de phosphore.

L'évolution des teneurs médianes cantonales en phosphore assimilable des horizons de surface des sols agricoles de Bretagne



Source : Gis Sol, BDAT, 2011 ; IGN, Geofla®, 2006.

Le potassium dans les sols de France

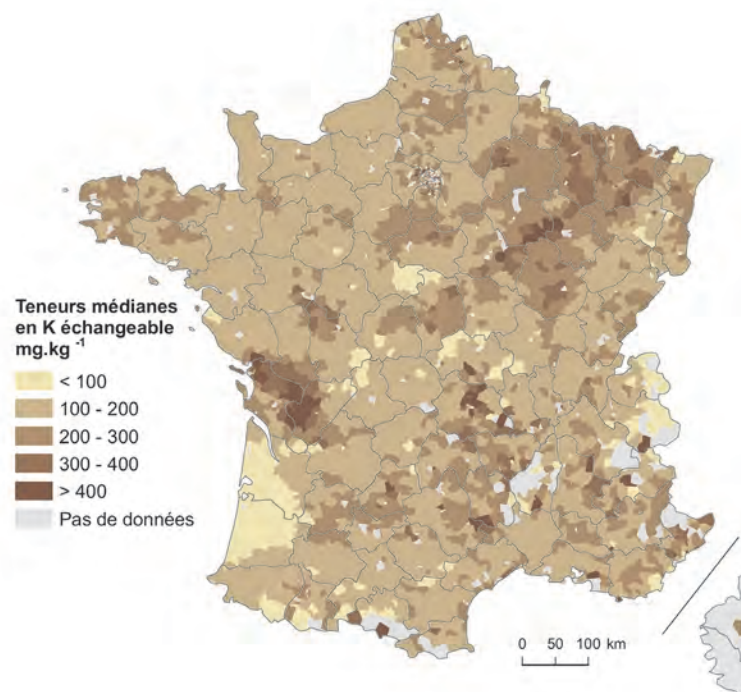
Contrairement au phosphore, le potassium (K) n'est pas présent dans les matières organiques du sol. Il est plus mobile et plus facilement entraîné en profondeur par la percolation des eaux de pluies. Il ne présente pas de risque identifié d'eutrophisation des milieux aquatiques ni de risque sanitaire connu, même si réglementairement les eaux de boisson ne doivent pas dépasser une valeur limite. Le potassium entre dans la composition de nombreux minéraux naturellement présents dans les sols (feldspaths potassiques, micas). L'altération des roches est donc une source de potassium significative, en particulier dans les écosystèmes non fertilisés, tels les systèmes forestiers. Toutefois, dans les systèmes cultivés, la fourniture de potassium par l'altération des minéraux est très inférieure aux exportations par les cultures, à de notables exceptions près, comme par exemple les sols argilo-caillouteux – les « groies » – des Charentes. C'est la raison pour laquelle des engrais potassiques sont généralement apportés aux cultures, sous forme d'engrais simples, ou en mélange avec d'autres fertilisants. Des apports de potassium sont également réalisés sous forme d'effluents d'élevage, principalement dans leurs formes liquides, la majorité du potassium rejeté étant dans les urines. Les ventes d'engrais potassiques en France sont en forte baisse depuis le début des années 1990, rejoignant en cela, avec un léger décalage,

la tendance observée pour les phosphates. Cette baisse peut être attribuée au développement de la fertilisation raisonnée et à l'augmentation du coût des engrais.

La teneur mesurée en potassium échangeable dans le sol (potassium retenu par le sol et susceptible de passer dans la solution du sol) ne peut pas à elle seule fournir un indicateur certain de la nécessité de fertiliser. D'autres critères doivent être pris en compte dans le raisonnement de la fertilisation, dont le niveau d'exigence en potassium des cultures et l'état de disponibilité pour les plantes de cet élément nutritif dans le sol (biodisponibilité). La capacité d'échange des cations (potentiel d'un sol à retenir des cations susceptibles d'être échangés avec la solution du sol) et la teneur en matière organique sont généralement les principaux déterminants de cette biodisponibilité.

Les valeurs médianes cantonales extraites de la Base de Données d'Analyses de Terre (BDAT) pour la période 2000-2004 montrent des diversités régionales bien marquées. Elles coïncident avec la diversité des textures des sols (composition en argile, limon et sable). Les régions dans lesquelles les teneurs en potassium échangeable sont les plus élevées sont, dans l'ensemble, celles dont les sols sont les plus argileux. Les teneurs les plus basses se rencontrent dans les sols les plus sableux.

Les teneurs médianes en potassium échangeable des horizons de surface des sols agricoles de France par canton pour la période 2000-2004



Source : Gis Sol, BDAT, 2011 ; IGN, Geofla®, 2006.

Ainsi, les sols sableux des Landes de Gascogne présentent des teneurs faibles, avec des valeurs médianes par canton souvent inférieures à 100 mg.kg⁻¹. Dans ces sols presque exclusivement quartzeux, il n'y a plus de minéraux altérables. La seule source de potassium est alors la fertilisation. En Bretagne et dans le Nord, les valeurs sont élevées et plus variables. Des valeurs très élevées sont observées dans les sols argileux de l'est de la France et des Charentes. Ces valeurs médianes cachent cependant une très grande disparité locale. De nombreux sols peuvent ainsi être considérés comme ayant des teneurs en potassium relativement faibles. Toutefois, ces statistiques correspondent à des valeurs saisonnières minimales, dans la mesure où les analyses sont réalisées avant la fertilisation de la culture suivante.

Malgré la diminution très importante des ventes de potassium en France depuis le début des années 1990, l'analyse des séries temporelles de 1990 à 2004 ne fait pas encore apparaître de baisse sensible du potassium échangeable dans les sols. Ce constat peut cependant être en partie biaisé, car les agriculteurs ayant recours aux analyses de sol sont probablement plus préoccupés de la fertilité de leurs sols que ceux qui n'en font pas.

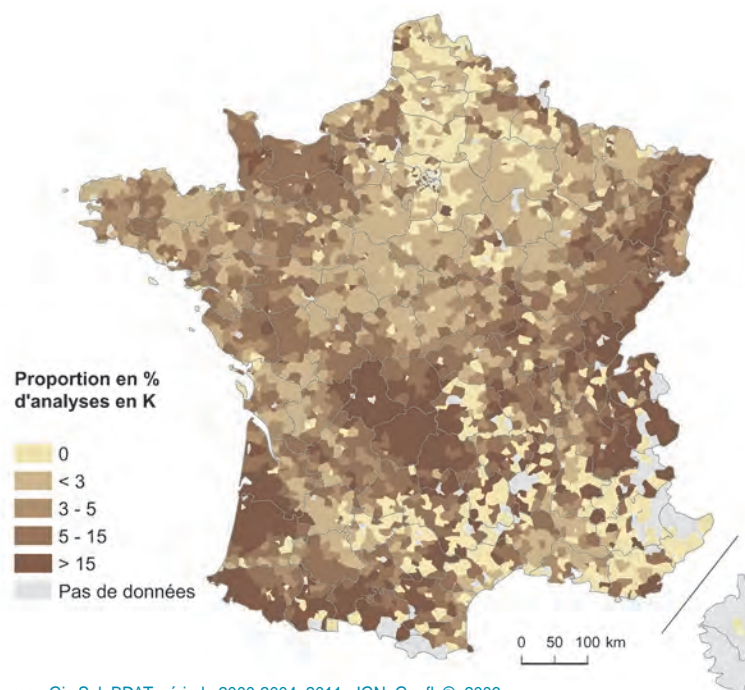
Par ailleurs, les exportations en potassium des grains récoltés sont faibles par rapport à celles en phosphore et certains sols libèrent naturellement du potassium par altération des minéraux présents dans les sols. Dans les zones d'élevage, le recyclage du potassium par les effluents d'élevage est important. Des carences pourraient

toutefois apparaître dans les contextes de fortes exportations de fourrage sans recyclage des effluents d'élevage, comme par exemple dans les prairies de fauche éloignées du siège de l'exploitation.

Pour diagnostiquer un risque de carence en potassium, la seule analyse du potassium échangeable du sol (potassium plus ou moins retenu par le sol et susceptible d'échanges avec la solution du sol) n'est pas suffisante. Il faut considérer la sensibilité des cultures (par exemple, les cultures de la betterave sucrière, du maïs fourrage, de la pomme de terre et du sorgho fourrage sont considérées comme exigeantes) et le pouvoir fixateur du sol pour le potassium. Une évaluation approximative du risque de carence en potassium des sols peut être réalisée en calculant un seuil au-dessous duquel les besoins d'une culture peu exigeante risquent de ne pas être satisfaits. Le calcul de ce seuil est fait en première approximation en prenant en compte la teneur en potassium échangeable et la capacité d'échange des cations (potentiel d'un sol à retenir des cations susceptibles d'être échangés avec la solution du sol).

La plupart des zones de grande culture sont assez bien pourvues en potassium échangeable. On note de faibles teneurs en potassium échangeable dans certains sols sableux peu pourvus en minéraux altérables (Landes, Vosges) ainsi qu'en Normandie. De nombreuses zones à dominante prairiale sont également pauvres en potassium : Franche-Comté, Limousin, massifs montagneux.

La proportion d'analyses du potassium échangeable indiquant une carence possible en cet élément pour une culture peu exigeante par canton



Source : Gis Sol, BDAT, période 2000-2004, 2011 ; IGN, Geofla®, 2006.

Le potassium étant un élément relativement mobile dans les sols, une meilleure gestion passe par un raisonnement de la fertilisation fondé sur des analyses de sol, sur

les exigences des cultures, mais également sur la biodisponibilité et la capacité de fixation du potassium dans les sols.

■ Les risques de carence en oligo-éléments pour les cultures dans les sols agricoles métropolitains

Un certain nombre d'oligo-éléments sont indispensables à la croissance des plantes. Cependant, à fortes doses, ils deviennent toxiques pour les plantes ainsi que pour l'Homme et les animaux. Les oligo-éléments suivants ont été analysés dans les sols de France et collectés dans les bases de données du Gis Sol : le bore, le cuivre, le manganèse et le zinc. Ils sont examinés ici sous l'angle des risques de carence pour les plantes, l'aspect contamination étant traité plus loin.

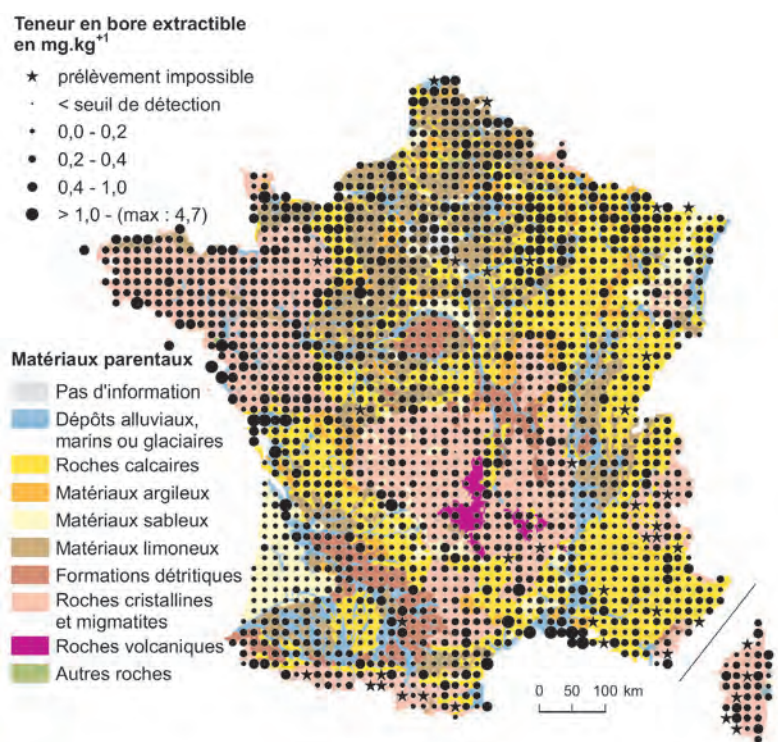
Le risque de carence en bore pour les cultures dans les sols de France

Le bore est un oligo-élément dont la déficience peut être critique pour un grand nombre de cultures (colza, maïs, tournesol, vigne, etc.). Les risques de carence en bore sont les plus fréquents dans les sols sableux et les sols calcaires. Les sécheresses estivales peuvent accentuer le risque de carence. Par contre, la toxicité en bore est exceptionnelle chez les végétaux, généralement due à un excès de fertilisation en bore.

L'une des principales sources naturelle de bore dans l'environnement et les sols est liée aux apports sous forme de dépôts atmosphériques en provenance de l'océan.

En France, les teneurs en bore mesurées dans les sols du RMQS présentent une valeur médiane de $0,21 \text{ mg.kg}^{-1}$ de sol avec 95 % des valeurs inférieures à $0,49 \text{ mg.kg}^{-1}$. Les plus fortes concentrations en bore sont mesurées dans les sols côtiers issus de sédiments marins avec des teneurs comprises entre 1 et 5 mg.kg^{-1} : Camargue, marais Poitevin, estuaire de la Loire ou de la Gironde, certains sols du littoral. Quelques fortes teneurs en bore, représentant de rares anomalies d'origine anthropique, ont été détectées, en lien possible avec des apports d'effluents de distillerie riches en bore ou des apports de sel marin utilisé comme fondant routier pour le salage en période hivernale.

Les teneurs en bore extractible des horizons de surface (0-30 cm) des sols de France



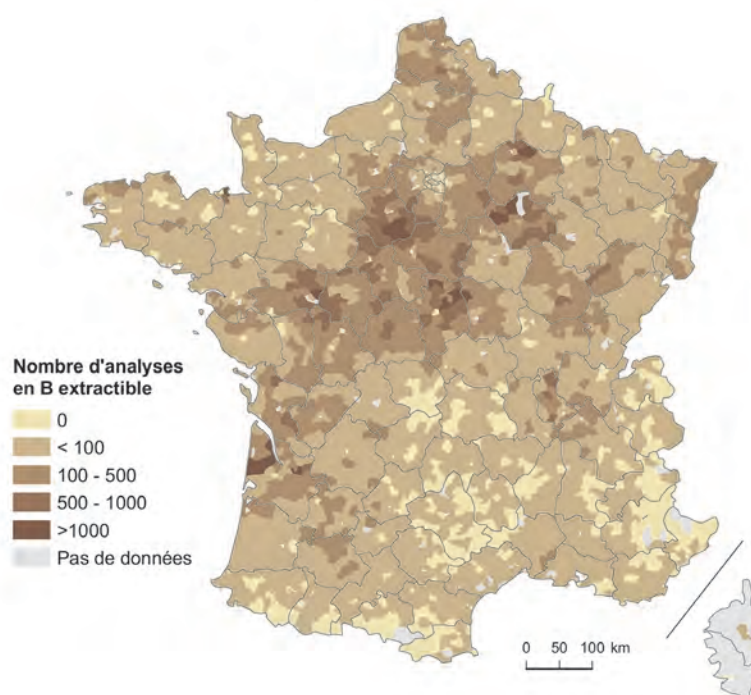
Source : Gis Sol, RMQS, 2011 ; Inra, BDGSF, 1998.

La teneur en bore issue de l'altération des roches puis de l'évolution des sols, et formant le fond pédogéochimique naturel en cet élément, est relativement variable. En dehors des sols issus de matériaux d'origine marine, les sols développés dans les formations argileuses comme les sols argileux de Lorraine (teneur médiane de $0,36 \text{ mg.kg}^{-1}$ de sol) et dans les matériaux crayeux comme en Champagne crayeuse (teneur médiane de $0,33 \text{ mg.kg}^{-1}$ de sol) contiennent les teneurs en bore les plus élevées. À l'inverse, les sols développés dans des roches calcaires dures comme dans le Jura, la bordure méridionale et orientale du Bassin parisien, ou la bordure orientale du Bassin aquitain (teneur médiane de $0,17 \text{ mg.kg}^{-1}$), les sols volcaniques du Massif central (teneur médiane de $0,13 \text{ mg.kg}^{-1}$ de sol) et les ARENOSOLS et PODZOSOLS issus de sables éoliens des Landes de Gascogne (teneur médiane de $0,12 \text{ mg.kg}^{-1}$

de sol) contiennent les teneurs en bore les plus faibles. L'influence des dépôts atmosphériques d'origine marine s'observe sur toute la façade nord-ouest de la France sur une distance de quelques dizaines à une centaine de kilomètres vers l'intérieur des terres depuis la côte. Cependant, le bore étant un élément très mobile dans les sols, les apports atmosphériques d'origine marine ne s'accumulent pas dans les sols sableux. Ceci explique que l'on n'observe pas d'influence de ces dépôts atmosphériques dans les sols sableux du littoral aquitain.

Comme l'essentiel des analyses de terre en bore est réalisé dans le cadre de la suspicion d'un risque de carence, le nombre total d'analyses des teneurs en bore répertoriées par canton durant la période 1990-2004 de la BDAT semble être un indicateur pertinent de ce risque.

Le nombre total d'analyses du bore extractible réalisées pour la période 1990-2004 par canton



Source : Gis Sol, BDAT, 2011 ; IGN, Geofla®, 2006.

Il permet d'estimer la co-occurrence de cultures exigeantes en bore et de facteurs limitant sa présence ou sa biodisponibilité. Les sols crayeux de Champagne-Ardenne sont fréquemment analysés, malgré des teneurs fortes. Il faut y voir l'influence des fortes teneurs en carbonate de calcium sur la disponibilité du bore, ainsi que la présence de cultures particulièrement exigeantes (betteraves, vignes). Le suivi du bore dans les sols agricoles est également important dans certaines régions de grande culture intensive où le maïs ou la vigne sont

fortement présents (Alsace, Centre, Île-de-France, Poitou-Charentes).

Le risque de carence en cuivre pour les cultures dans les sols de France

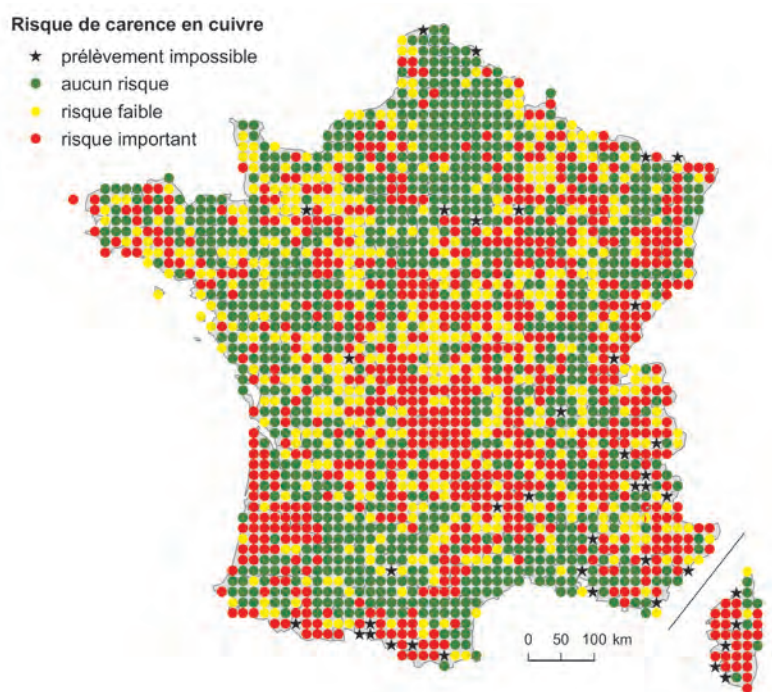
Le cuivre est présent dans les roches et les sols sous forme naturelle, mais en quantités assez faibles. En effet, la valeur médiane de la teneur en cuivre total dans les sols du RMQS est d'environ 14 mg.kg^{-1} et 95 % des valeurs sont

inférieures à 54 mg.kg⁻¹. Le cuivre est un oligo-élément indispensable à la croissance des plantes et des animaux. Deux types de carences sont classiquement distinguées : des carences absolues, liées à de très faibles teneurs naturelles dans les sols (cas, par exemple, des Landes de Gascogne) et des carences relatives, ou induites, liées à la très forte immobilisation – et en conséquence la faible biodisponibilité – de cet élément dans le sol. En règle générale, le cuivre est fortement fixé dans les sols à pH élevé (calcaires, salins et sodiques), ainsi que dans les sols très riches en matières organiques. Les principales sources externes de cuivre sont liées aux traitements

phytosanitaires (notamment la « bouillie bordelaise »), ainsi qu'aux épandages d'effluents d'élevage (lisiers de porcs, fientes de volailles, etc.), et, de façon localisée, à des rejets atmosphériques industriels et aux épandages de boues de stations d'épuration. Ce sont en effet surtout les produits phytosanitaires et les effluents d'élevage qui sont les principales sources de cuivre pour les sols agricoles français.

Le rapport entre la teneur en cuivre extrait à l'EDTA (part considérée comme plus disponible pour les plantes) et la teneur en matières organiques des sols permet d'estimer les risques de carence en cuivre des sols.

Le risque de carence en cuivre pour une culture exigeante



Source : Gis Sol, RMQS, 2011.

Les zones théoriquement déficitaires en cuivre disponible pour les plantes sont très étendues. Certaines d'entre elles correspondent à une pauvreté « naturelle » des sols en cuivre (les Landes de Gascogne, les Vosges, une grande partie du Massif central, la Sologne, le sud de la Bretagne). La richesse relative en cuivre disponible pour les plantes est forte dans les sols de la plupart des régions cultivées de manière intensive, comme dans le nord du Bassin parisien, le grand Sud-Ouest, la Beauce et l'ensemble des régions viticoles et arboricoles (Bordelais, Languedoc-Roussillon, pourtours des vallées de la Saône et du Rhône). Dans les régions viticoles, le cuivre en excès provient de son utilisation dans les produits phytosanitaires. Les parties nord et ouest de la Bretagne contiennent aussi d'importantes quantités de cuivre car certains effluents d'élevage sont riches en cet élément (lisiers de porc, notamment). Par contre,

à l'exception des sols viticoles, les teneurs en cuivre sont nettement déficitaires dans les sols de Champagne (Aube, Haute-Saône).

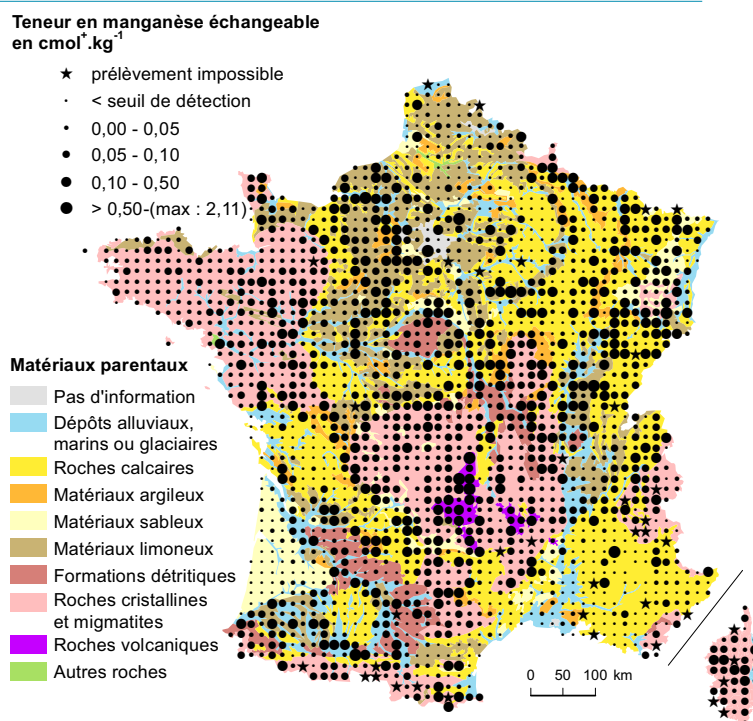
Le risque de carence en manganèse pour les cultures dans les sols de France

Les tests chimiques simples (manganèse échangeable) ne permettent pas une bonne estimation du risque réel de carence en manganèse encouru par une culture. Parmi les principaux facteurs intervenant dans ce risque, on peut distinguer des facteurs aggravant (culture à forte sensibilité, sécheresse) ou diminuant ce risque (excès d'eau, mauvaise aération du sol). La toxicité en manganèse peut également se manifester dans certaines conditions culturales et climatiques, lorsque des teneurs très élevées sont associées à des pH faibles.

L'interprétation des valeurs mesurées dépendant de phénomènes conjoncturels, la complexité de ce fonctionnement ne permet pas en l'état actuel de dégager des règles simples permettant de cartographier ces risques sur le territoire français. Tout au plus peut-on cartographier les teneurs observées.

Les très faibles valeurs en manganèse sont liées à la présence de certains matériaux, comme les sables des Landes de Gascogne, les craies de Champagne et, en règle générale, beaucoup de sols calcaires. Par contre, les sols développés sur matériau volcanique montrent de très fortes valeurs.

Les teneurs en manganèse échangeable des horizons de surface des sols de France



Source : Gis Sol, RMQS, 2011 ; Inra, BDGSF, 1998.

Le risque de carence en zinc pour les cultures dans les sols de France

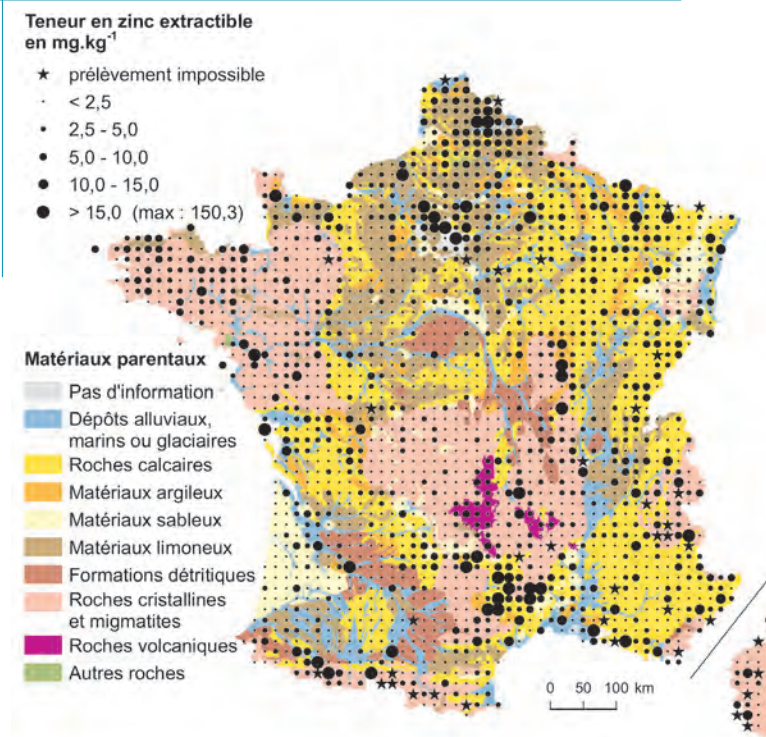
Les quantités de zinc existant dans les sols sont faibles, bien qu'elles soient en moyenne les plus élevées de la gamme des oligo-éléments métalliques mesurés dans le cadre du RMQS. En effet, la valeur médiane des teneurs en zinc est d'environ $64 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ de sol et 95 % des teneurs mesurées sont inférieures à $155 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$.

Les simples tests chimiques (par exemple extraction du zinc à l'EDTA) ne permettent pas une bonne estimation du risque réel encouru par une culture. Parmi les principaux facteurs intervenant dans ce risque, on peut distinguer des facteurs aggravant (culture à forte sensibilité, chaulage récent ou à venir, excès d'eau en période froide, fortes teneurs en phosphore) et des facteurs réduisant ce risque (apports d'amendements organiques).

L'interprétation des valeurs mesurées dépendant de phénomènes conjoncturels, la complexité de ce fonctionnement ne permet pas en l'état actuel de dégager des règles simples de cartographie de ce risque sur le territoire français.

Il existe de fortes anomalies en zinc-EDTA. Elles correspondent soit à des contaminations d'origine industrielle (nord de la France, région parisienne), soit à des anomalies pédo-géochimiques naturelles (Causses, Jura, sud du Massif central). Les sols des Landes de Gascogne sont particulièrement pauvres en zinc. Dans cette région, les quelques valeurs élevées correspondent à des sols agricoles où la carence en zinc a été corrigée.

Les teneurs en zinc extrait à l'EDTA des horizons de surface des sols de France



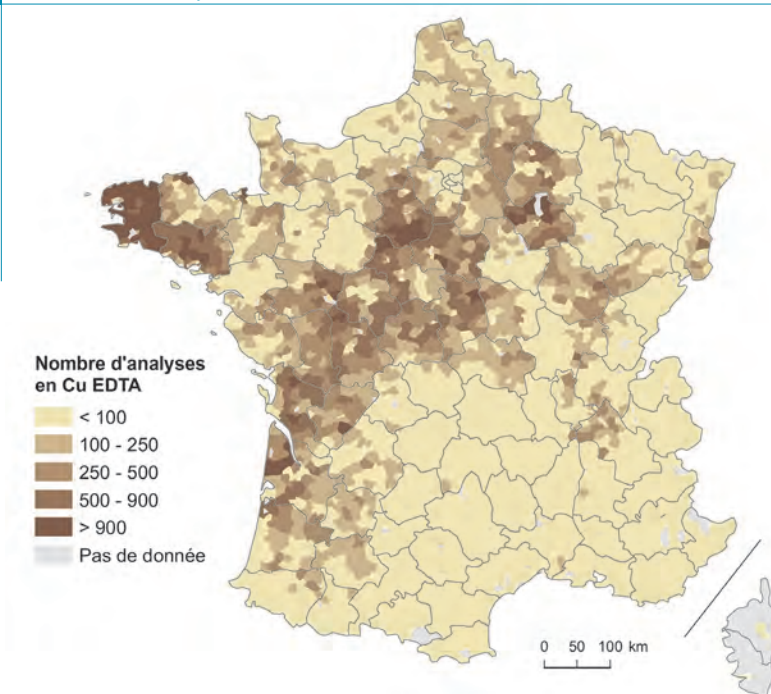
Source : Gis Sol, RMQS, 2011 ; Inra, BDGSF, 1998.

Les demandes d'analyse en oligo-éléments métalliques dans les sols de France

Comme la grande majorité des analyses en oligo-éléments métalliques sont demandées par les agriculteurs lorsqu'ils suspectent une carence, la fréquence de cette carence peut être estimée par le nombre d'analyses de cuivre, de manganèse et de zinc agrégé par canton entre 1990 et 2004 (BDAT). En pratique, comme les analyses sont généralement réalisées sous forme d'un menu analytique,

ces trois éléments sont le plus souvent analysés ensemble. Seule l'une des cartes, concernant le nombre d'analyses en cuivre extrait à l'EDTA, est présentée. Si elle ne permet pas de distinguer quel type exact de carence était visé par l'analyse, elle constitue cependant un assez bon indicateur global du risque de carence en l'un ou l'autre de ces trois éléments.

Le nombre total d'analyses en cuivre extrait à l'EDTA des horizons de surface des sols de France par canton



Source : Gis Sol, BDAT, période 1990-2004, 2011 ; IGN, Geofla®, 2006.

La carte du nombre d'analyses demandées présente à la fois des cohérences (sud de la Bretagne, Landes de Gascogne, Champagne) et de relatives contradictions avec les précédentes. Il faut y voir en partie le caractère imparfait des cartes présentées précédemment pour illustrer les risques de carence. Par ailleurs, les indicateurs exclusivement fondés sur des critères sol ne prennent pas en compte la fréquence de la présence de cultures très exigeantes (comme le blé pour le cuivre, la

betterave pour le manganèse, ou le maïs pour le zinc par exemple), ni l'influence de très nombreux autres facteurs sur la disponibilité de ces éléments pour les plantes, comme les conditions climatiques, le pH et certaines pratiques comme le chaulage.

Cette carte suggère que les risques de carence en métaux sont très largement répandus sur les sols de France.

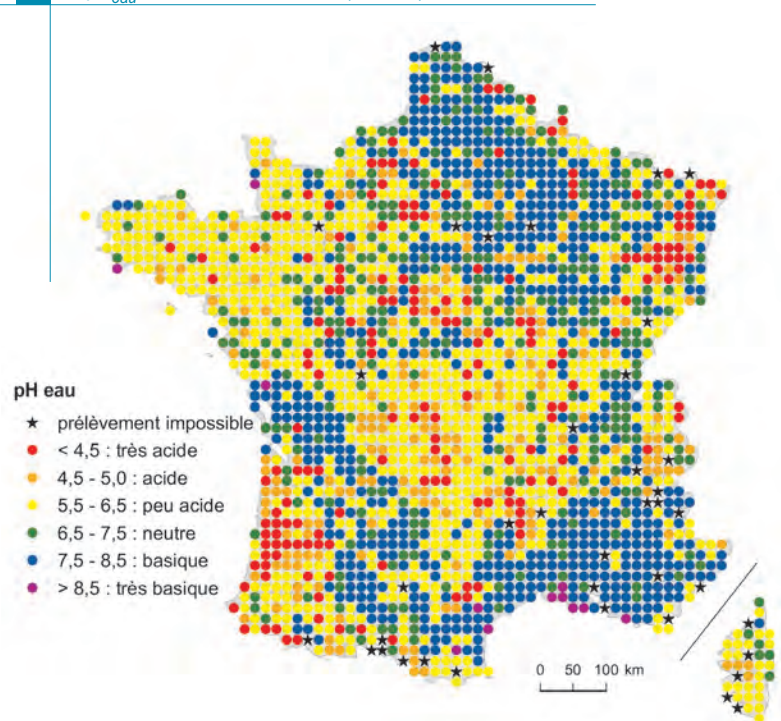
■ Les cations échangeables et l'acidification des sols

Les éléments chimiques mobiles du sol peuvent en être exportés par les récoltes, ou par entraînement vertical ou latéral par les eaux. L'exportation par les récoltes est en règle générale très supérieure à la fourniture par l'altération des roches. À l'inverse, les pratiques agricoles, voire dans certains cas forestières, peuvent contribuer à modifier la teneur du sol en certains éléments échangeables. Sous l'effet des processus naturels, les sols perdent progressivement une partie de leur stocks de cations : calcium (Ca), magnésium (Mg), potassium (K), sodium (Na). Cette perte progressive affecte tout d'abord les carbonates puis concerne les cations présents à la surface des argiles. Sous l'effet de ce processus mettant aussi en mouvement des protons, le sol s'acidifie. Lorsque cette acidité devient très importante ($\text{pH} < 5$), les constituants minéraux du sol peuvent être partiellement dissous, de l'aluminium (Al) libre peut être libéré dans les sols et dans les eaux et les rendre potentiellement toxiques pour certaines espèces. L'évolution chimique globale des sols est classiquement estimée par leur pH, leur capacité d'échange cationique et leur taux de saturation.

Le pH des sols de France

En France, cinq grands types de milieux se distinguent. Les milieux à acidification intense correspondent à des matériaux parentaux filtrants favorables à l'entraînement des cations et faiblement pourvus en minéraux altérables susceptibles de réapprovisionner le sol. C'est principalement le cas des sols sableux des Landes de Gascogne et des sols développés dans les grès des Vosges et certaines zones granitiques. Le domaine des sols où l'acidification reste modérée couvre principalement le Massif armoricain et le Massif central, ainsi que l'ouest du piémont pyrénéen. De nombreux sols des grandes plaines cultivées ont des pH neutres à basiques : le pH « naturel » des sols y est très souvent augmenté par l'emploi d'amendements minéraux. Les domaines des sols saturés par du calcium correspondent aux grandes régions calcaires ou marneuses du territoire. Enfin, dans les sols développés dans un environnement salé ou sodique (Camargue, marais Poitevin), les pH sont très élevés.

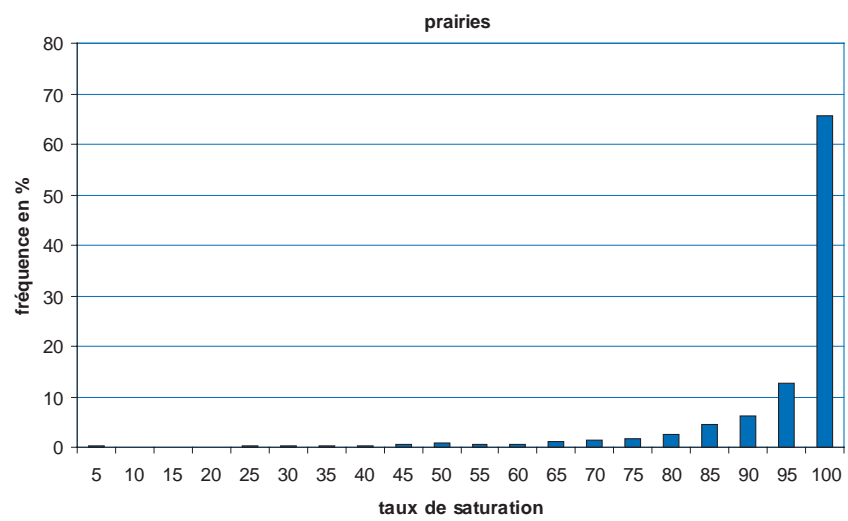
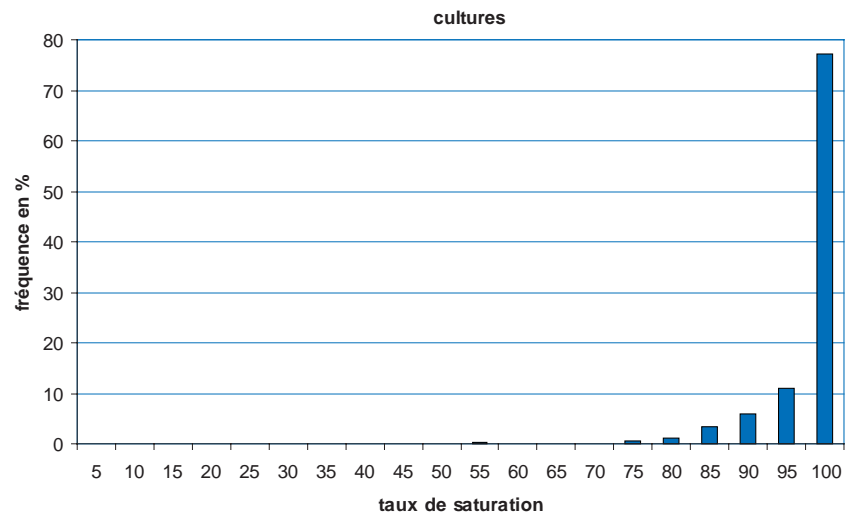
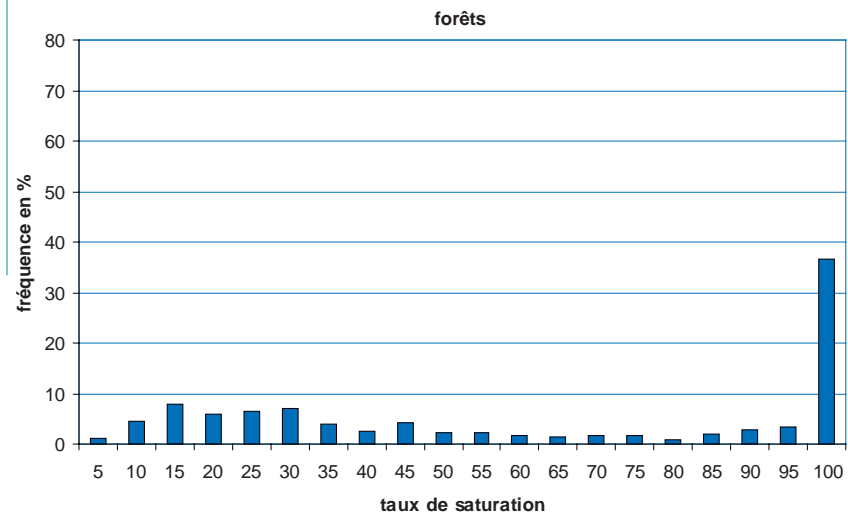
Le pH_{eau} des horizons de surface (0-30 cm) des sols de France



Source : Gis Sol, RMQS, 2011.

Note : Le pH du sol se mesure dans une suspension d'un échantillon de sol. La mesure la plus courante s'effectue dans une suspension aqueuse (pH_{eau}). Les valeurs faibles ($\text{pH} < 5$) sont caractéristiques des sols acides et les valeurs fortes ($\text{pH} > 7,5$) des sols basiques.

La distribution des pH dans les sols de France selon les occupations du sol



Source : Gis Sol, RMQS, 2010.

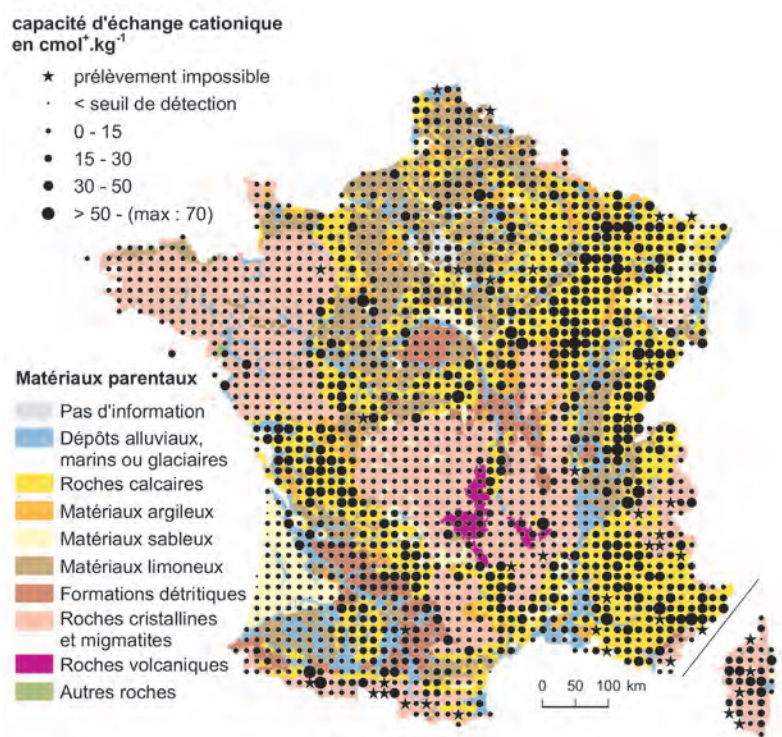
La comparaison de la distribution des pH par grand type d'occupation des sols montre qu'elles sont toutes bimodales. Le pic autour de pH 8 correspond aux grands domaines calcaires du territoire et toutes les occupations y sont présentes. Les modes plus faibles correspondent à des situations où le phénomène d'acidification est présent. Les sols cultivés présentent en moyenne des pH plus élevés que les autres occupations. Ces pH sont rarement inférieurs à 5,5. Il faut y voir l'influence de la pratique du chaulage. Les prairies permanentes, sur lesquelles la pratique du chaulage est moins systématique, peuvent présenter des pH plus faibles. Les sols forestiers sont caractérisés par une très faible proportion de pH neutres, ce qui traduit le fait qu'ils sont soit naturellement dans une ambiance alcaline (sols ou substrats carbonatés), soit dans une ambiance plutôt acide.

La capacité d'échange cationique des sols de France

La capacité d'échange cationique (CEC) des sols peut être définie comme le potentiel d'un sol à retenir des cations susceptibles d'être échangés avec la solution

du sol : Ca^{++} , Mg^{++} , K^+ , Na^+ , H^+ (protons), Al^{+++} . Ce sont principalement les argiles et des matières organiques qui constituent ces supports de cations potentiellement mobiles. Des échanges permanents se réalisent entre ce stock de cations présents en phase solide mais mobiles, et ceux de la solution du sol. Très schématiquement, plus un sol possède une CEC importante, plus il est naturellement « fertile » au plan chimique, la réserve des cations utiles pour la plante étant importante. À l'inverse, plus la CEC d'un sol est faible, moins le réservoir de cations disponibles est important et plus le risque d'entraînement en profondeur de cations apportés par la fertilisation est grand. La distribution des CEC sur le territoire français est très bien corrélée à la distribution des textures. Les sols argileux (Jura, Lorraine, terres argileuses de Poitou-Charentes) montrent les CEC les plus élevées. À l'inverse, les sols issus de matériaux sableux ou cristallins montrent les CEC les plus faibles (Landes de Gascogne, Massif armoricain et une grande partie du Massif central, Sologne, Vosges). Quelques CEC très fortes en montagne correspondent à des teneurs très élevées en matières organiques ou en allophanes (minéraux propres aux sols volcaniques).

La capacité d'échange cationique des horizons de surface (0-30 cm) des sols de France



Source : Gis Sol, RMQS, 2011 ; Inra, BDGSF, 1998.

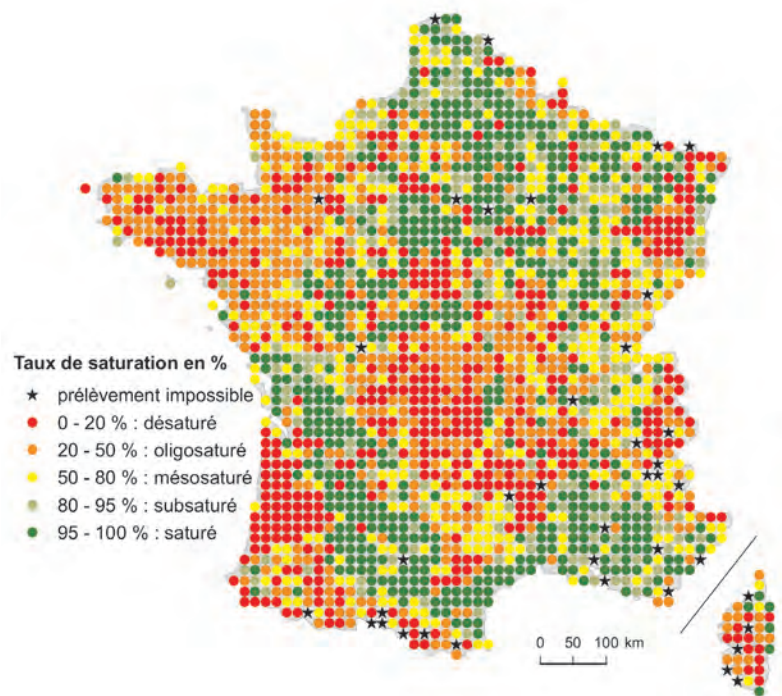
Le taux de saturation des sols de France

La CEC représente un potentiel de fixation et de libération de cations dans les sols. Le taux de saturation indique le pourcentage de ce potentiel occupé par les cations Ca^{++} , Mg^{++} , K^+ et Na^+ . Il s'agit donc d'un indicateur de saturation ou de désaturation de ce potentiel

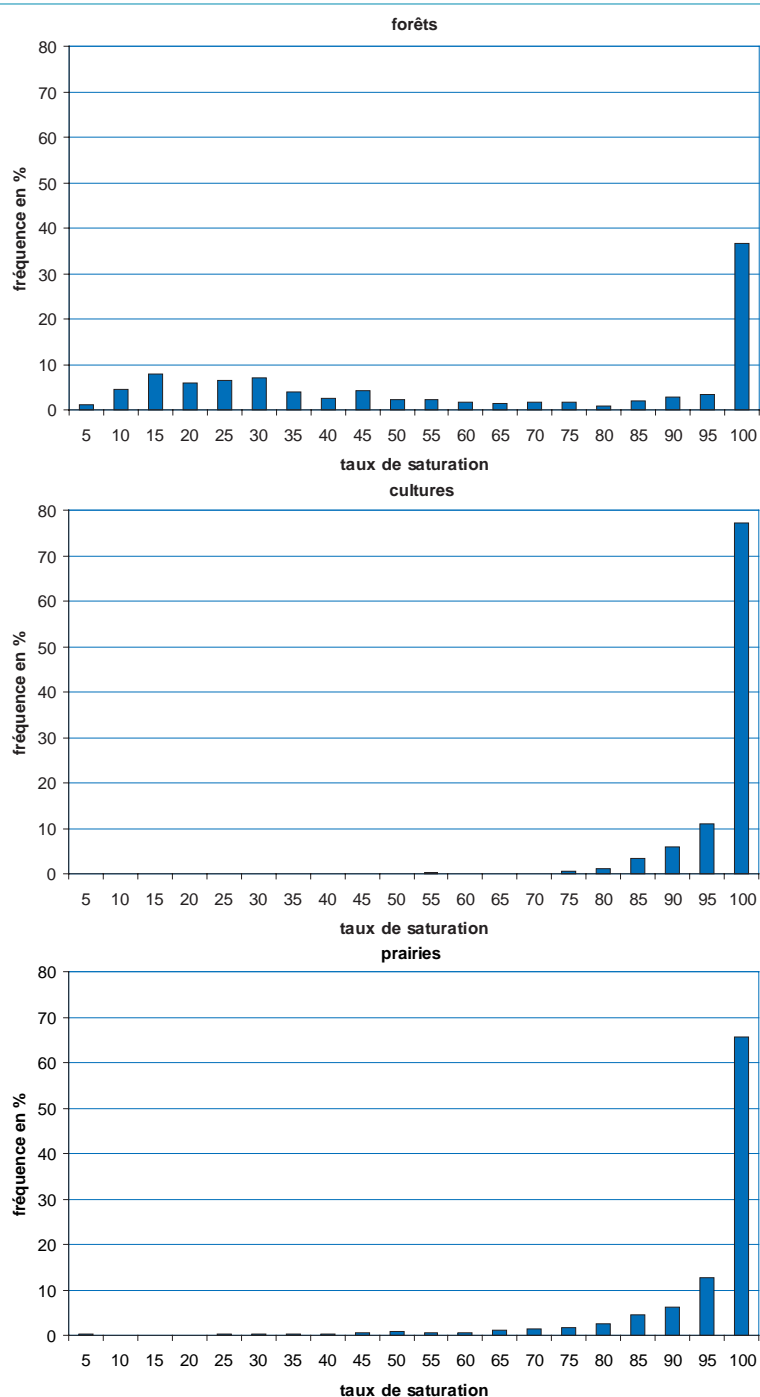
La quasi-totalité des sols cultivés sont saturés ou subsaturés. La répartition des valeurs faibles illustre bien la distribution des sols très acides et pauvres en minéraux altérables (Landes, Vosges).

Les sols cultivés présentent presque tous des taux de saturation élevés. Une faible proportion des sols de prairies permanentes présente des taux de saturation plus faibles, alors que de nombreux sols forestiers ont des taux de saturation faibles à très faibles. Pour ces derniers, la distribution bimodale des taux de saturation est à rapprocher de celle des pH.

Le taux de saturation des sols de France



Source : Gis Sol, RMQS, 2010.



Source : Gis Sol, RMQS, 2011.

La distribution des cations échangeables des sols de France

• Le calcium échangeable dans les sols de France

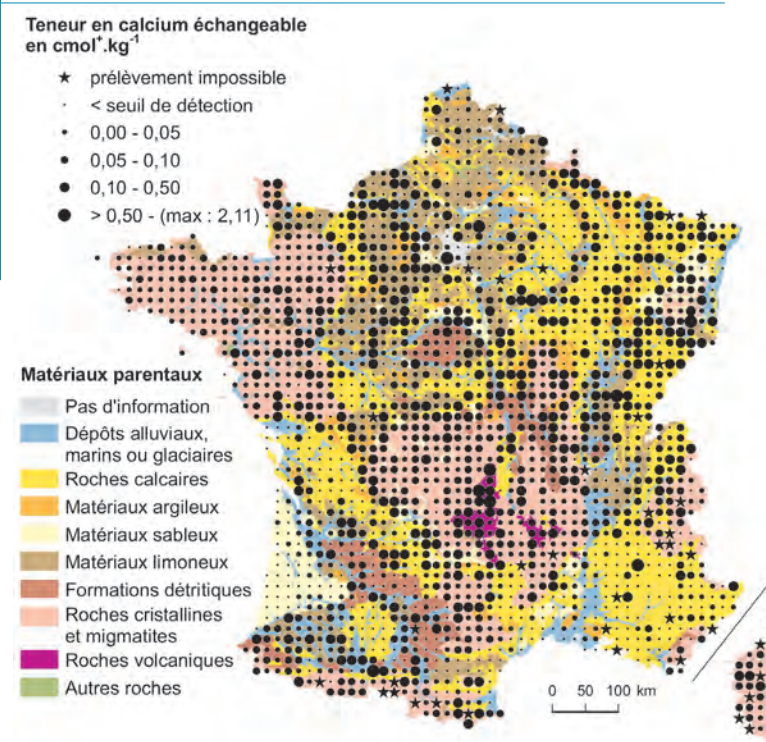
La distribution du calcium échangeable est fortement corrélée à la présence de matériaux calcaires ou argileux (Berry, Charente, Jura, Lorraine, sols argileux (« terre-forts ») du toulousain, sud-est de la France). À l'inverse, les faibles teneurs en calcium échangeable s'observent dans des sols issus de matériaux sableux ou de roches contenant relativement peu de minéraux altérables et caractérisés par des pH plutôt acides (Landes de Gascogne,

Massif armoricain et une grande partie du Massif central, Sologne, Vosges). En situation de textures intermédiaires, les variations observées sont principalement liées au mode d'occupation du sol. Destiné à augmenter les teneurs en calcium des sols, le chaulage consiste en l'apport d'amendements minéraux basiques, essentiellement des calcaires ou des produits calco-magnésiens, mais aussi des apports directs de chaux, sur les sols afin de compenser les exportations et les pertes par entraînement profond. Le pH du sol est ainsi augmenté pour les

maintenir dans une gamme optimale visant à favoriser la disponibilité des éléments nutritifs pour les cultures.

Lorsque le pH est très faible, le chaulage peut parfois (mais en pratique assez rarement) être réalisé sous forêt.

Les teneurs en calcium échangeable dans les horizons de surface des sols de France



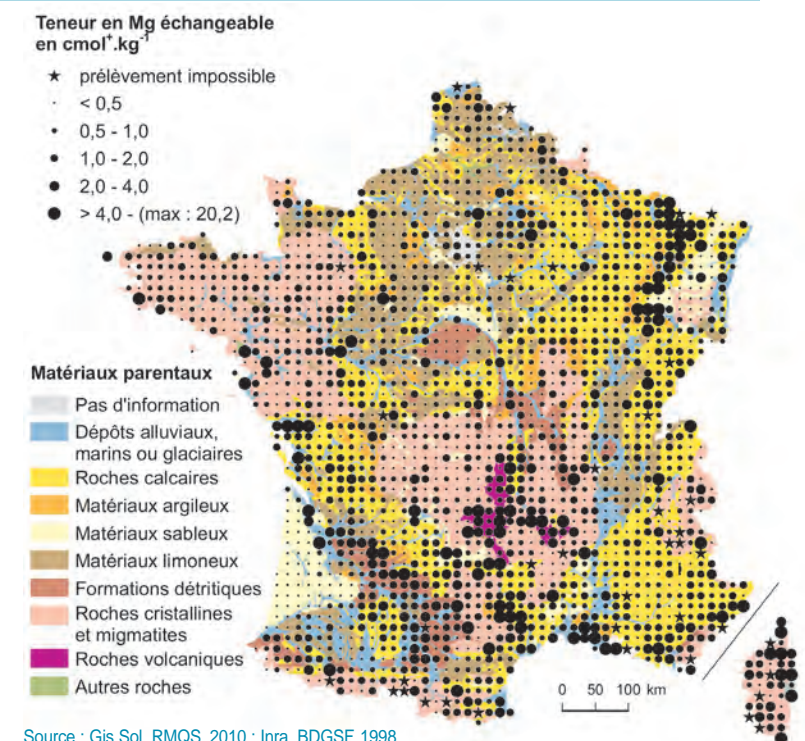
Source : Gis Sol, RMQS, 2010 ; Inra, BDGSF, 1998.

● **Le magnésium échangeable dans les sols de France**

Le magnésium est présent naturellement dans certains minéraux : amphiboles, dolomie, micas, pyroxènes. Il entre dans la constitution de certaines

argiles (chlorite, glauconite, vermiculite). Sous sa forme de cation Mg^{++} , il est retenu plus ou moins fortement par le sol.

Les teneurs en magnésium échangeable dans les horizons de surface des sols de France



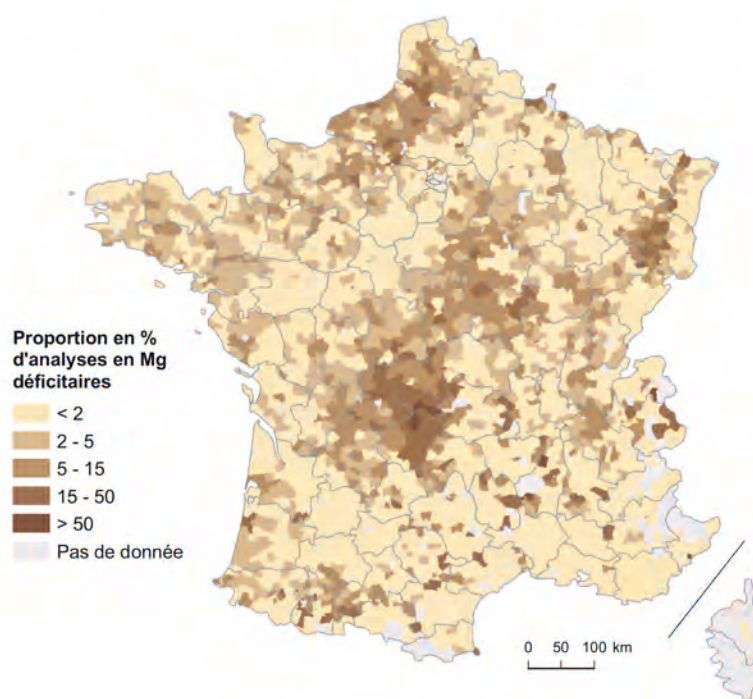
Source : Gis Sol, RMQS, 2010 ; Inra, BDGSF, 1998.

Les fortes teneurs en magnésium échangeable sont localisées dans les sols développés dans les matériaux issus d'alluvions marines ou fluvio-marines (Camargue, marais Poitevin et Vendéen), des roches dolomitiques (arc est de la Lorraine, Causses du Massif central, Corse, Sud-Est) et des matériaux volcaniques.

Pour diagnostiquer un risque de carence en magnésium des sols, les résultats d'analyses du magnésium échangeable ne sont pas suffisants. Il faut en premier lieu considérer la sensibilité des cultures : par exemple, les cultures de la betterave sucrière, de la pomme de terre et

du maïs sont considérées comme exigeantes en magnésium. Il faut également considérer la part de magnésium au sein de la CEC et des facteurs aggravants tels qu'un excès d'ions H^+ ou Al^{+++} (cas des sols acides), ou un rapport élevé entre le potassium échangeable et le magnésium échangeable. Une évaluation approximative et maximaliste du risque de carence en magnésium des sols peut être réalisée en calculant un seuil au-dessous duquel les besoins d'une culture peu exigeante risquent de ne pas être satisfaits. Le calcul de ce seuil est une approximation qui prend en compte la teneur en Mg^{++} échangeable et le pouvoir de rétention du sol via sa CEC.

La proportion par canton d'analyses du magnésium échangeable indiquant une carence possible en cet élément pour une culture peu exigeante

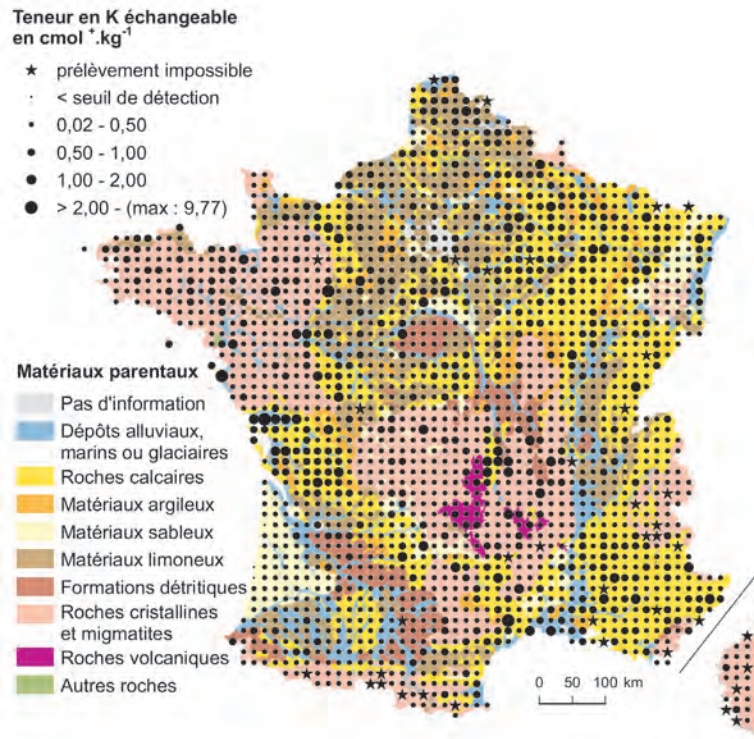


Source : Gis Sol, BDAT, période 2000-2004, 2011 ; IGN, Geofla®, 2006.

Il existe une assez forte disparité régionale dans la distribution des sols pour lesquels les besoins en magnésium d'une culture peu exigeante risquent de ne pas être satisfaits. Pour certains secteurs, il semble exister un risque de carence en magnésium, comme par exemple en Limousin, Pas-de-Calais, Seine-Maritime, Somme et dans les Vosges. On note un effet de bordure maritime en Bretagne, avec des teneurs en magnésium des sols plus élevées, sans doute accentuées par les pratiques agricoles dans la partie nord de cette région (amendements dans les sols maraîchers).

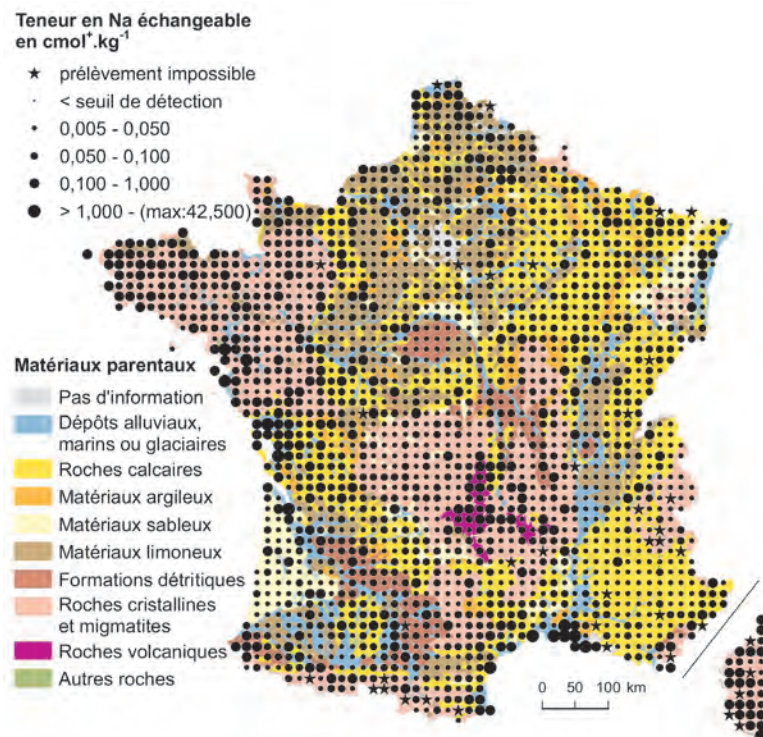
• Le potassium échangeable dans les sols de France

Les sols des régions à dominante forestière et acide présentent des teneurs en potassium échangeable très basses, notamment dans les Landes de Gascogne, en Sologne et dans les Vosges.



Source : Gis Sol, RMQS, 2010 ; Inra, BDGSF, 1998.

• Le sodium échangeable dans les sols de France



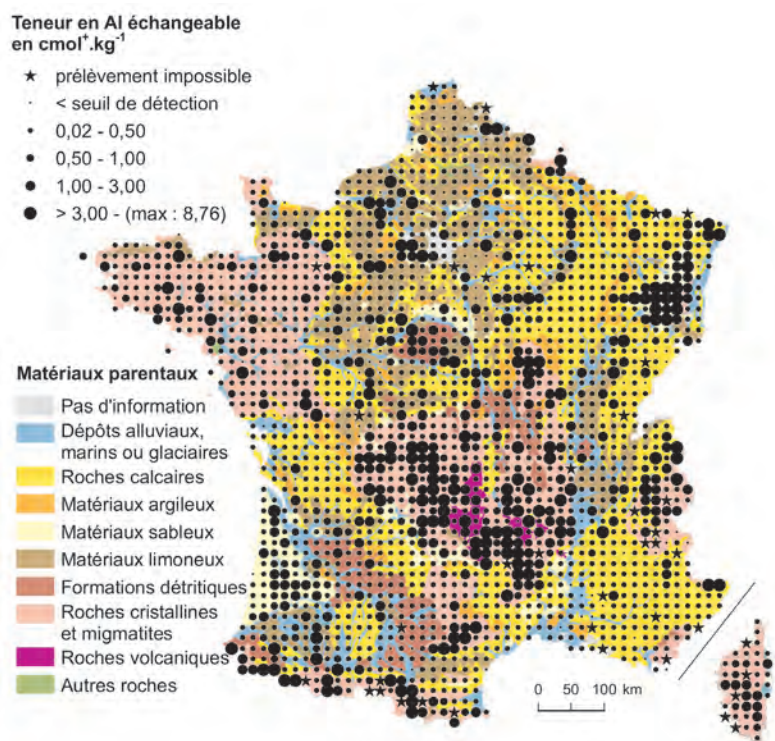
Source : Gis Sol, RMQS, 2010 ; Inra, BDGSF, 1998.

La distribution du sodium échangeable dans les sols de France montre une nette influence maritime. Les sols sous influence directe marine (nappe phréatique salée, sols sous influence des marées) présentent les teneurs les plus fortes. L'influence maritime semble plus modérée en Bretagne, mais s'exprime sur une distance plus longue le long du littoral. Des teneurs assez élevées sont observées en milieu volcanique. Lorsque les sols ne sont pas à proprement parler salés, mais qu'ils présentent une proportion importante de sodium sur leur complexe adsorbant, ils sont qualifiés de « sodiques ». Ils peuvent alors se compacter et limiter l'infiltration de l'eau et de l'air. On peut y remédier par des amendements en gypse.

• L'aluminium échangeable dans les sols de France

L'aluminium est un élément très abondant dans les sols. Il entre en particulier dans la composition de très nombreux silicates. Sa forme échangeable Al^{+++} est présente dans les sols acides suite à l'altération des minéraux de la famille des silicates. Sous cette forme acide, il peut être prélevé par les plantes et se révéler particulièrement toxique pour les végétaux.

L'aluminium échangeable dans les horizons de surface des sols de France



Source : Gis Sol, RMQS, 2010 ; Inra, BDGSF, 1998.

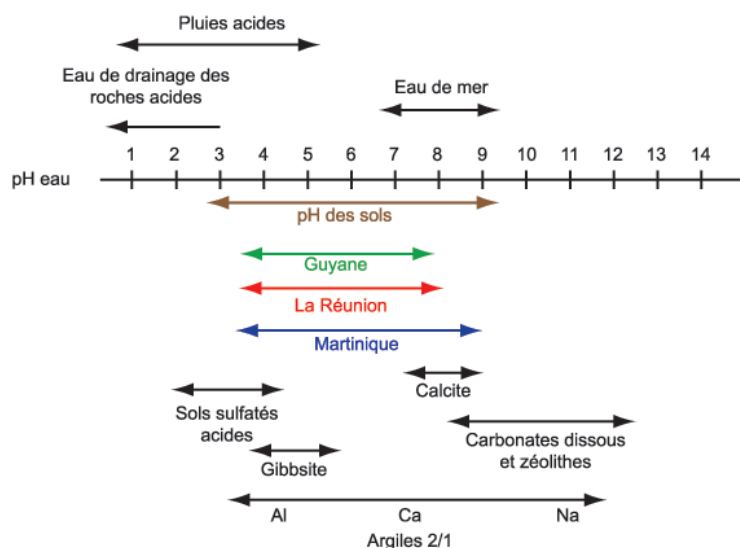
L'aluminium échangeable est révélateur de milieux très acides. Il marque en particulier les évolutions podzoliques ultimes (Landes de Gascogne, Vosges) ou la présence d'autres sols très acides (Ardennes, Bretagne, Massif central, Pyrénées, Sologne). Il est le signe d'une

évolution intense des sols, pouvant entraîner la dissolution irréversible de certains composés minéraux. En sols cultivés, l'apport d'amendements minéraux basiques permet de remédier à la toxicité de l'aluminium.

1 L'acidité des sols tropicaux

Les valeurs de pH des sols tropicaux se situent dans la gamme habituellement observée pour les sols. En Guyane, l'acidité est principalement le résultat de l'intense altération des roches, conduisant à une absence presque totale de cations échangeables (Ca^{++} et Mg^{++}). Par exemple, les valeurs de pH des sols ferrallitiques guyanais varient entre 3,5 et 5,5 (moyenne de 4,5 environ). Les pH supérieurs à 6 sont exceptionnels. Les valeurs sont plus faibles en surface et croissent en profondeur. Le pH est plus élevé dans les horizons en cours d'altération, sauf lorsque la kaolinite est déstabilisée et libère de l'aluminium échangeable. Les valeurs de pH dépendent également de la teneur en matières organiques. Dans les sols ferrallitiques humifères, elles peuvent atteindre des valeurs proches de 3,7 en surface.

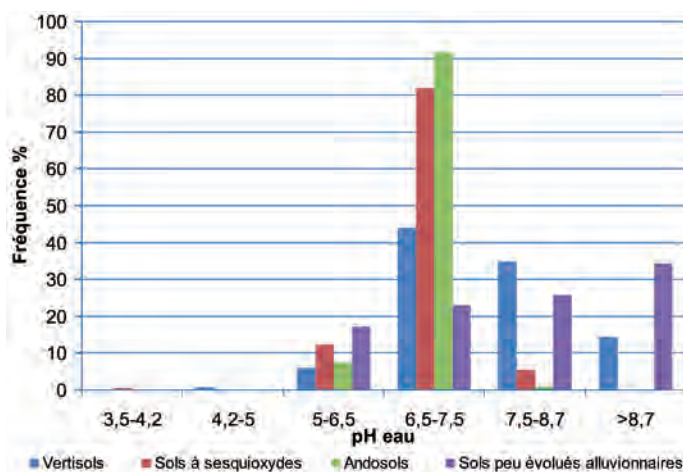
L'étendue des valeurs de pH des sols tropicaux et des principaux matériaux associés



Source : Gis Sol-IRD, IGCS, 2006.

À la Martinique, le pH moyen de l'horizon de surface des sols est de 5,8 ; il est compris entre 3,8 et 8,5. La plage étendue des valeurs pour la Martinique est uniquement due à l'existence de sols développés sur quelques formations carbonatées et aux sols alluvionnaires salés.

La distribution des valeurs de pH_{eau} de 400 horizons de sols martiniquais



Source : Gis Sol-IRD, IGCS, 2006.

▶▶ suite

▶▶ suite

Les sols sulfatés acides, dont le pH est inférieur à 3,5, sont uniquement localisés dans des zones associées aux espaces de mangroves et arrières-mangroves (l'oxydation de la pyrite, sulfure de fer, libère des sulfates ce qui induit le développement de l'acidité).

Occasionnellement, des dépôts volcaniques actuels peuvent entraîner des phénomènes d'acidification des sols. Ce fut le cas à la Guadeloupe où une acidification des ANDOSOLS fut observée en 1976-1977 suite au dépôt des cendres du volcan La Soufrière. Les mécanismes de l'acidification étaient liés à la composition des cendres. De l'aluminium était libéré par les argiles et les pyrites s'oxydaient au cours du temps. Bien que ce risque soit bien réel, rien ne permet de dire qu'il va se produire à chaque éruption de cendres et ponces car il dépend de la nature des dépôts volcaniques, qui est très variable.

Pour en savoir plus

- Alloway B.-J., 2005. *Copper deficient soils in Europe*. International copper association, Ltd. New York, USA, 129 p.
- Baize D., Saby N. et Walter C., 2006. « Le cuivre extrait à l'EDTA dans les sols de France : Probabilités de carences et de toxicités selon la BDAT. », *Étude et Gestion des Sols*, Vol.13, n°4, décembre 2006. pp. 259-268.
- 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*).
- Follain S., Schwartz C., Denoroy P., Vilette C., Arrouays D., Walter C., Lemerrier 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.
- Lemerrier B., Gaudin L., Walter C., Aurousseau P., Arrouays D., Schwartz 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.
- Schwartz 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), 2009. « Le phosphore dans les sols, nécessité agronomique, préoccupation environnementale. » *Le Point Sur*, n°14, Juin 2009. 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>

Liens

- BDAT : Base de Données d'Analyses de Terre :
<http://www.gissol.fr/programme/bdat/bdat.php>
- INDIQUASOL : Base de Données de la Qualité des Sols :
<http://www.gissol.fr/programme/bdiqs/bdiqs.php>
- UNIFA, La fertilisation en France :
<http://www.unifa.fr/e-marche-en-chiffres/la-fertilisation-en-france.html>

Le sol, acteur de la biodiversité terrestre

Le sol est le support de la biodiversité terrestre, qu'elle soit bien visible à nos yeux ou au contraire cachée, sous nos pieds. S'il est connu que la nature du sol détermine les paysages et donc la diversité des espèces végétales et animales s'y développant, il est encore peu connu qu'une biodiversité bien plus importante réside également dans les sols eux-mêmes. Cette fraction oubliée pourrait représenter, selon certaines estimations, un quart de la biodiversité mondiale. Une meilleure connaissance de ces organismes et de leurs rôles devrait également contribuer au développement d'une agriculture moins consommatrice d'intrants.

L'environnement physique, le climat et les interactions biologiques entre organismes, affectent la distribution et la quantité des espèces végétales et animales. Les caractéristiques physiques (texture) et chimiques (acidité, fertilité, présence de contaminants) des sols sont parmi les facteurs importants du milieu qui orientent la diversité biologique (ou biodiversité) terrestre. Ces relations entre le sol et les plantes ou les animaux sont bien connues. Certaines espèces végétales sont par exemple utilisées pour indiquer le caractère acide, calcaire ou encore riche en azote d'un sol.

Cependant, et c'est beaucoup moins connu, les sols constituent également l'un des habitats les plus complexes, les plus peuplés et les moins bien compris des écosystèmes terrestres. Les communautés qui s'y développent présentent une profusion de formes de vie et de fonctions : elles constituent une part importante de la biomasse terrestre (200 kg à 4 tonnes de vers de terre par hectare) et de sa biodiversité (de 100 000 à un million d'espèces de bactéries différentes par gramme de sol). Classiquement, les organismes du sol sont regroupés suivant leurs tailles : visibles à l'œil nu (méga ou macrofaune), à la loupe binoculaire (mésafaune) et au microscope (microfaune et microflore). Ce regroupement par taille renseigne sur l'échelle de vie des organismes, mais peu sur leurs rôles, alors même que cette biodiversité est le « moteur » du fonctionnement des sols.

Les organismes du sol sont tout à la fois des « chimistes » en charge de la décomposition et de la transformation des matières organiques en éléments assimilables par les plantes (rôle exercé principalement, mais pas exclusivement, par les micro-organismes), des « régulateurs », contrôlant l'activité des décomposeurs, mais également des bioagresseurs (rôle rempli par les petits invertébrés comme les collemboles, les acariens et les nématodes) et des « ingénieurs », entretenant la structure du sol (action assurée par les vers de terre et les fourmis). Certains micro-organismes du sol sont également des pathogènes des plantes, des animaux ou de l'Homme.

Malgré ces rôles fondamentaux, les organismes du sol n'ont été l'objet que de peu d'attention en comparaison d'autres groupes tels que les végétaux supérieurs et les vertébrés. La question du nombre d'espèces d'organismes existant à l'échelle globale reste toujours sans réponse précise, et il n'existe probablement aucun sol dans lequel il est possible d'identifier ou même de quantifier la totalité des espèces d'invertébrés ou de micro-organismes qui y vivent.

L'amélioration des connaissances de ce patrimoine biologique peut permettre de mieux le protéger et de l'utiliser d'une part pour une agriculture moins consommatrice d'intrants (la diversité des nématodes libres du sol permet de réguler la pression parasitaire sans utiliser de pesticides et la diversité microbienne entretient la fertilité chimique des sols) mais également pour des usages nouveaux, encore inconnus (ex : production de médicaments, de matériaux). De très nombreux antibiotiques présents sur le marché sont en effet à l'origine issus de bactéries du sol. Comme ils ne proviennent que d'une petite partie de la population bactérienne, le reste, encore inexploré, constitue donc un réservoir potentiel immense.

Deux programmes de recherche basés sur le Réseau de Mesure de la Qualité des Sols (RMQS) ont défriché cette *terra incognita* qu'est la biodiversité des sols. Si beaucoup de questions se posent encore, les premiers résultats nous éclairent sur la diversité des organismes du sol et ses liens avec la nature et l'usage des sols ou avec les pratiques culturales.

1 L'énigme de la biodiversité de la faune du sol

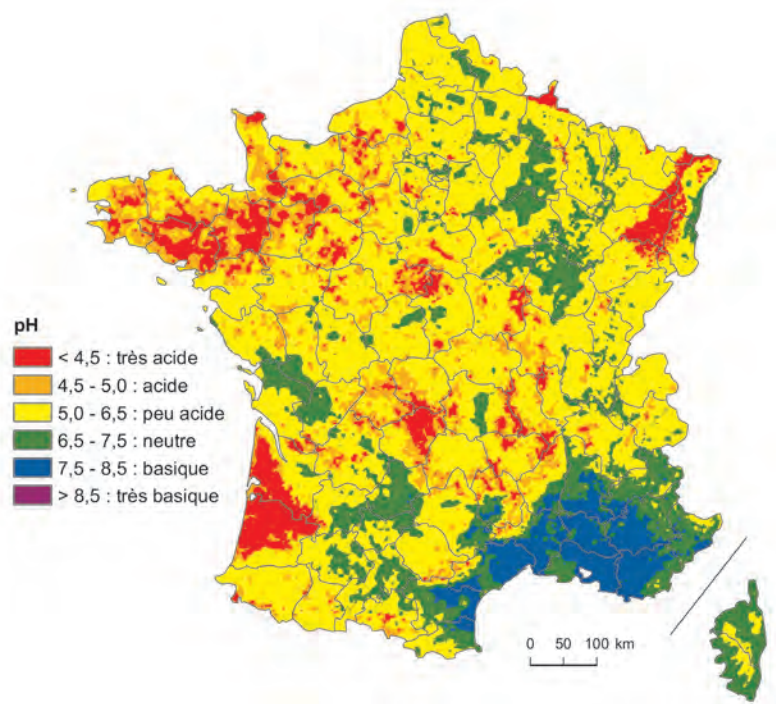
Comment expliquer qu'un si grand nombre d'espèces animales parviennent à coexister dans le sol, alors que la majorité d'entre elles consomme les mêmes ressources ? Pour la faune du sol, si la compétition au sein d'une même espèce semble réguler sa diversité, la compétition entre les espèces paraît ne pas intervenir. Plusieurs hypothèses ont été avancées pour expliquer ce phénomène.

La distribution des ressources organiques est particulièrement hétérogène dans le sol, milieu compact et tridimensionnel. Les communautés d'organismes se répartissent donc en fonction des ressources nutritives disponibles et se subdivisent en niches écologiques, dans des habitats fortement spécialisés. Ceci limite la compétition entre espèces, tout en permettant au plus grand nombre d'entre elles de coexister dans un volume réduit. Ce phénomène est, par ailleurs, favorisé par l'activité de la macrofaune du sol et de la végétation qui conditionnent fortement la répartition spatiale et temporelle des ressources nutritives utilisées par l'ensemble des organismes du sol. D'autres hypothèses s'appuient sur la capacité d'un grand nombre d'entre eux à entrer en vie léthargique pour s'adapter rapidement à des modifications défavorables du milieu. De nombreuses espèces sont ainsi temporairement inactives ou alors leur nombre est suffisamment faible pour éviter la compétition. La coexistence de nombreuses espèces est dès lors possible. Les interactions mutualistes, comme par exemple les associations bénéfiques entre la microflore et les macro-invertébrés du sol, favorisent l'accès à un spectre plus large de ressources alimentaires (l'intestin des termites abrite par exemple une grande quantité de bactéries dont certaines sont capables de dégrader des éléments très difficilement biodégradables). Enfin, la forte biodiversité du sol est également favorisée par la nature très diverse des ressources nutritives issues soit de la biomasse végétale, soit d'autres invertébrés consommés par divers prédateurs, constituant ainsi des chaînes alimentaires longues et complexes.

■ Les caractéristiques des sols déterminent la diversité des espèces végétales et animales terrestres

La diversité floristique de la forêt française est liée à une multitude de facteurs naturels, tels que le climat ou le relief, mais également les sols. L'acidité des sols du massif landais, par exemple, a imposé la plantation de pins maritimes, lors des travaux d'assainissement des marais au XIX^e siècle. Pour améliorer la prédiction de la répartition et de la croissance des espèces végétales, on utilise ainsi des données décrivant les caractéristiques du sol. Il s'agit par exemple des propriétés acido-basiques (pH) ou

du degré d'évolution des matières organiques (rapport carbone sur azote ou C/N) du sol. Inversement, le lien entre le sol et la végétation spontanée est si étroit en forêt qu'il est fréquemment utilisé pour estimer les paramètres du sol à partir de la présence ou de l'absence de certaines espèces dites indicatrices. Il est alors possible, en dehors de toute analyse physico-chimique, de déduire le pH, voire le C/N des sols des végétaux spontanément présents sur une placette forestière.



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

Cette liaison entre la biodiversité végétale et les caractéristiques des sols peut être mise en évidence dans d'autres situations. Les sols de prairies calcaires et

sèches, par exemple, abritent des Orchidées, les sols de tourbières favorisent la croissance des Droseras, etc.



© Antonio Bispo

Fritillaire, typique des milieux humides.



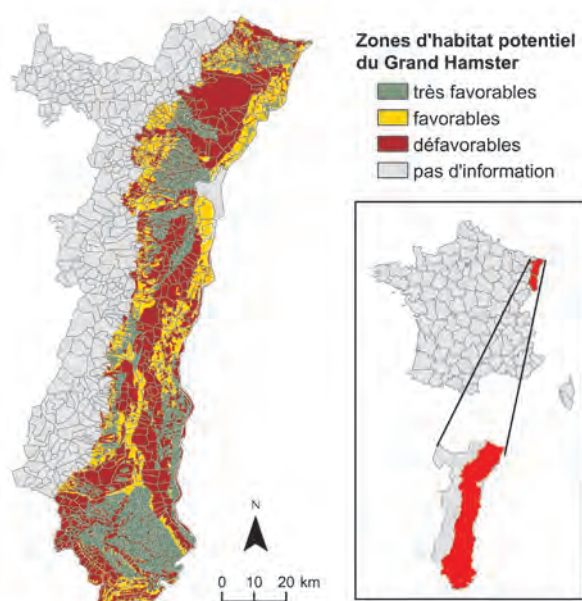
© Sébastien Colas

Anémone pulsatille (Pulsatilla vulgaris), typique des pelouses calcaricoles.

Les caractéristiques des sols influencent également les habitats des vertébrés terrestres. La Taupe (*Talpa europaea*) est le plus connu des vertébrés vivant dans les sols. Certaines espèces sont inféodées à certains types de sol. C'est notamment le cas de certaines espèces protégées car menacées d'extinction en France. Ainsi, la combinaison de paramètres du sol, tels que la texture,

la pierrosité et la réserve en eau, et de caractéristiques d'habitat, a permis de délimiter des aires propices à la réintroduction ou à la préservation du Grand Hamster d'Alsace (*Cricetus cricetus*) ou du Pélobate brun (*Pelobates fuscus*) dans l'Indre.

Les zones d'habitat potentiel du Grand Hamster d'Alsace



Source : ARAA-DREAL Alsace-ONCFS, 2005.



Le Grand Hamster (*Cricetus cricetus*) dans un champ de luzerne.

© I. Josinger, ONCFS

Si les liens entre la biodiversité terrestre « visible » et les sols sont évidents et parfois caractérisés depuis longtemps, la biodiversité résidant dans les sols, bien que plus abondante, est peu connue. Cette fraction oubliée de

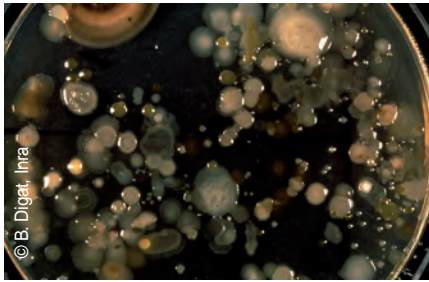
la biodiversité, qui selon les estimations représente environ un quart de la biodiversité mondiale (Decaëns, 2010), commence seulement à être étudiée.

■ La diversité des communautés microbiennes des sols

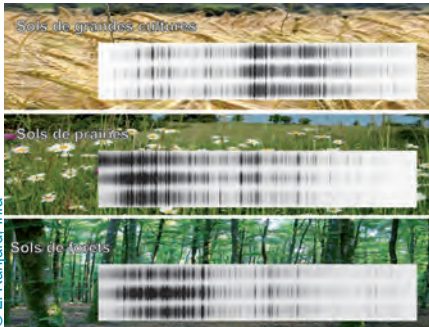
L'abondance et la biodiversité des communautés microbiennes du sol ont été mesurées sur l'ensemble des échantillons de sols métropolitains de la première campagne de prélèvement du RMQS (2000-2010) à l'aide d'outils moléculaires. Cette première biogéographie microbienne montre une distribution spatiale hétérogène de l'abondance et de la composition des communautés

bactériennes du sol. La distribution des micro-organismes du sol n'est pas aléatoire et semble soumise aux conditions environnementales. En effet, des régions pauvres en biomasse et en diversité microbienne, telles que les Landes, se distinguent des régions riches, comme le Sud-Est.

2 Comment mesurer la biodiversité microbienne d'un sol ?



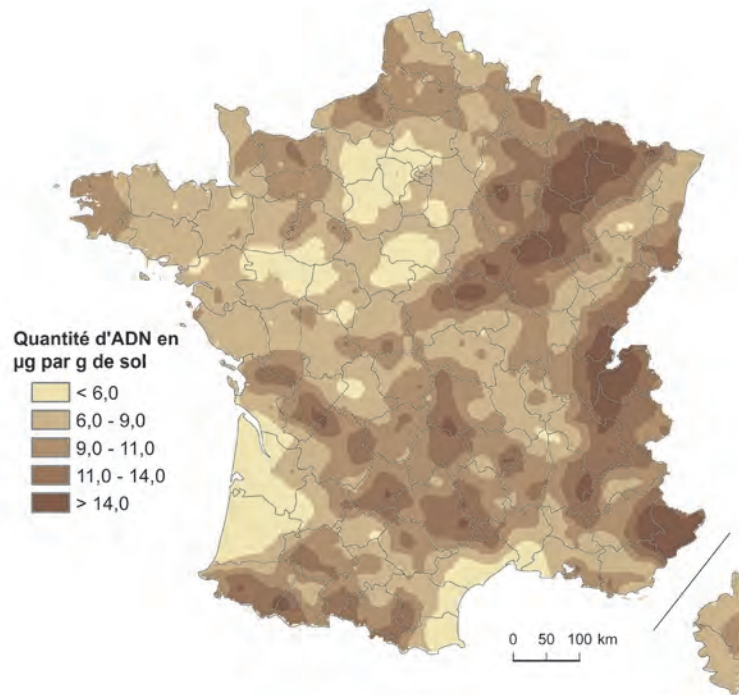
Isolément bactérien à partir d'un gramme de terre. On détecte jusqu'à 1 milliard de germes.



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).

La diversité microbienne d'un sol est difficile à caractériser. Cela s'explique en partie par la difficulté d'accès aux micro-organismes (algues, bactéries, champignons) présents dans la matrice hétérogène et structurée du sol. Par ailleurs, la biodiversité du sol, constituée de 100 000 à un million d'espèces différentes par gramme de sol, est particulièrement complexe à étudier. Toutefois, les importantes avancées en biologie moléculaire de ces quinze dernières années permettent d'étudier désormais la diversité des communautés microbiennes du sol *in situ* et sans *a priori*. Ces techniques sont basées sur l'extraction de l'information génétique de la flore du sol, autrement dit des molécules d'ADN présentes dans les cellules des micro-organismes vivants du sol. La caractérisation des séquences de gènes des bactéries et des champignons s'effectue directement à partir des acides nucléiques. Ces méthodes ont l'avantage de s'affranchir des méthodes classiques, dites « Pasteuriennes », et des biais liés à la culture des micro-organismes du sol. En effet, on estime souvent que seulement 0,1 à 10 % d'entre eux sont cultivables sur des milieux synthétiques. Les techniques moléculaires offrent ainsi de nouvelles perspectives pour résoudre et comprendre la distribution de la diversité microbienne dans le sol et son rôle dans le fonctionnement biologique des écosystèmes.

La répartition géographique de la biomasse microbienne des sols de France métropolitaine



Source : Gis Sol-programme ANR Ecomic-RMQS, 2010 ; IGN, Geofla®, 2006 ; Dequiedt *et al.*, 2010.

Note : La biomasse mesurée correspond à la quantité d'ADN extrait des échantillons de sols du RMQS.

Les paramètres locaux, comme le type et l'occupation du sol, influencent plus fortement la biodiversité que les paramètres globaux, comme le climat et la géomorphologie. Ainsi, les sols à texture fine (argileuse ou limoneuse) et à pH alcalins (pH>7) avec des teneurs importantes en carbone organique sont plus favorables à la vie microbienne que les sols sableux acides. On observe par exemple des quantités d'ADN élevées dans les sols argileux de Lorraine, alors qu'elles sont faibles dans les sols sableux acides des Landes de Gascogne.

L'influence du mode d'occupation des sols peut également être observée et plus particulièrement l'impact de certains systèmes de culture. Les sols de vigne semblent renfermer une faible biomasse microbienne, tout comme les sols de grande culture en comparaison des sols sous couvert forestier ou sous prairie. Les monocultures montrent également des niveaux de biomasse plus faibles par rapport aux rotations culturales ou aux alternances entre les prairies et les grandes cultures.

■ La diversité des communautés d'invertébrés des sols

L'abondance et la biodiversité des communautés d'invertébrés du sol ont été mesurées dans le cadre du RMQS dans plus d'une centaine de sols bretons. La macrofaune, la mésofaune et la microfaune ont ainsi été identifiées sur tous ces sites. Si, comme dans le cas des communautés microbiennes, le type et l'occupation des sols jouent sur la diversité et l'abondance, les invertébrés des sols sont aussi sensibles à la gestion des sols et notamment aux pratiques culturales. L'occupation des sols agit essentiellement sur l'abondance (le nombre d'individus) et un peu moins sur la diversité (le nombre d'espèces) de la faune du sol. Le nombre d'espèces, bien que généralement plus important sous prairie, reste du même ordre de

grandeur sous culture. Par contre, l'abondance des individus est significativement plus faible sous culture. Pour une même occupation du sol, les pratiques culturales influencent également la diversité et l'abondance moyenne de la faune du sol, voire sa biomasse dans le cas des vers de terre. Ainsi, l'abondance et la diversité des communautés de nématodes et de vers de terre (moins 50 % sur la biomasse des vers de terre par exemple) sont particulièrement influencées par le labour. Par contre, l'impact de l'usage des produits phytosanitaires ou de la fertilisation sur ces deux communautés est moindre (moins 20 % maximum).

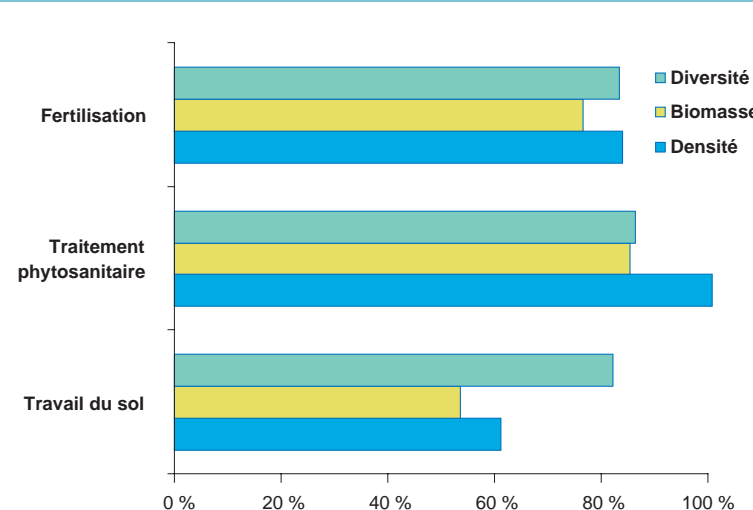
L'abondance et la diversité des nématodes et des vers de terre dans les sols du RMQS en Bretagne

		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

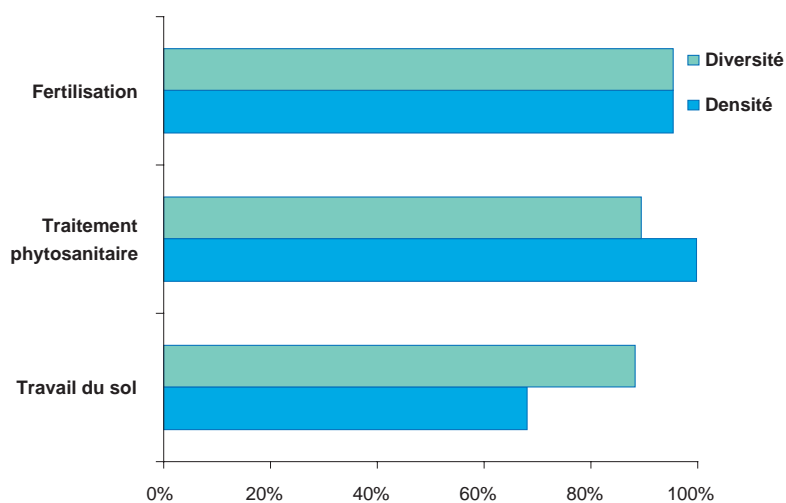
Source : Université Rennes 1, RMQS-Biodiv, 2009.

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

L'effet des différentes pratiques de gestion (travail du sol, fertilisation et traitement phytosanitaire) sur la densité et la diversité d'invertébrés du sol (en relatif par rapport au non travail du sol, à une fertilisation réduite et au non usage de produits phytosanitaires)



Effet sur la population de vers de terre.



Effet sur la population de nématodes.

Source données : Université Rennes 1, RMQS-Biodiv, 2005.

Les perspectives

Les données pédologiques sont précieuses pour définir les caractéristiques optimales des habitats des espèces végétales et terrestres supportées par les sols mais les sols abritent également une importante biodiversité terrestre encore largement méconnue. Les résultats obtenus dans le cadre du Gis Sol montrent l'intérêt et la pertinence de caractériser les communautés microbiennes

et d'invertébrés du sol aux échelles nationales et régionales. Les réponses apportées concernent des questions fondamentales portant sur la biogéographie des micro-organismes et des invertébrés du sol. Elles répondent aussi à des questions opérationnelles, permettant d'évaluer par exemple l'effet des modes d'occupation et de gestion des sols sur leur biodiversité.

Pour en savoir plus

- Amber Dance. 2008. « What lies beneath. », *Nature*, Vol 455, Issue 7214, Octobre 2008. 724-725 p.
- Bispo A. et Arrouays D. (Éditeurs), 2009. « Programme ADEME : bioindicateurs de la qualité des sols », *Étude et Gestion des Sols*, Vol. 16, Numéro 3/4. 145-378 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.-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 p.
- Decaëns T., 2010. « Macroecological patterns in soil communities. », *Global Ecology and Biogeography*, 19, 287-302 p.
- Dequiedt S., Thioulouse J., Jolivet C., Saby N.-P.-A., 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.
- Dequiedt S., Saby N.-P.-A., Lelievre M., Jolivet C., Thioulouse J., Toutain B., Arrouays D., Bispo A., Lemanceau P. et Ranjard L., 2011. « Biogeographical patterns of soil molecular microbial biomass as influenced by soil characteristics and management. », *Global Ecology and Biogeography*, 20, 641-652 p.

Liens

- Atlas Européen de la Biodiversité des Sols :
http://eussoils.jrc.ec.europa.eu/library/maps/biodiversity_atlas/
- La vie cachée des sols :
<http://www2.ademe.fr/servlet/getDoc?cid=96&m=3&id=72480&p1=30&ref=12441>
- Carte du pH de surface des sols forestiers français :
<http://www.ifn.fr/spip/spip.php?rubrique182&rub=cat>

Les sols et le changement climatique

L'effet de serre est un phénomène naturel par lequel certains gaz présents dans l'atmosphère (dits gaz à effet de serre) absorbent une partie du rayonnement émis par la surface de la Terre et le renvoient vers celle-ci, contribuant à la réchauffer. Ce phénomène a permis le développement de la vie sur Terre en y maintenant une température moyenne favorable. Néanmoins, il est amplifié depuis deux siècles et demi avec le développement industriel, en raison de l'émission vers l'atmosphère de gaz à effet de serre, responsables d'un effet de serre additionnel d'origine anthropique.

Le groupe intergouvernemental sur le changement climatique (GIEC) a estimé que le principal gaz à effet de serre, le dioxyde de carbone (CO_2), contribuerait à 60 % environ de cet effet de serre additionnel. En ce qui concerne le méthane (CH_4) et le protoxyde d'azote (N_2O), on estime ainsi que leur contribution à l'effet de serre additionnel serait respectivement de 20 % et 6 %.

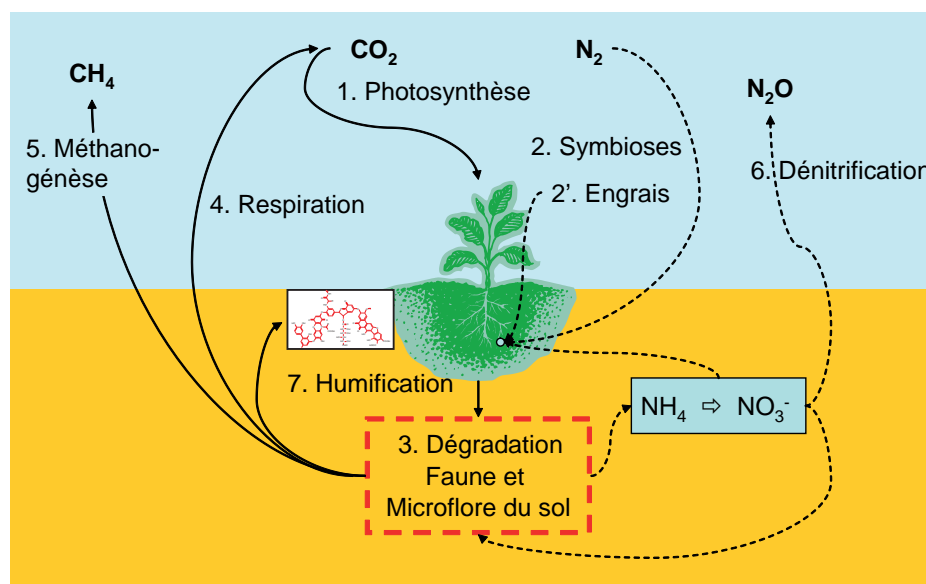
En échangeant en permanence ces gaz à effet de serre (CH_4 , CO_2 , N_2O) avec l'atmosphère, les sols représentent un compartiment majeur des cycles globaux du carbone et de l'azote.

Ils constituent le plus grand réservoir terrestre de carbone organique, constituant principal des matières organiques contenues dans les sols. Toute modification, positive ou négative, des stocks de carbone organique des sols peut ainsi représenter un puits ou une source de CO_2 atmosphérique. Outre son effet d'atténuation du changement climatique, le maintien d'une teneur importante en matières organiques dans les sols est essentiel vis-à-vis

d'un grand nombre de propriétés des sols (stabilité de leur structure et limitation de l'érosion, rétention en eau et en certains éléments nutritifs, activité biologique, etc.), ainsi que vis-à-vis des services écosystémiques qu'ils rendent : adaptation au changement climatique des secteurs agricoles et forestiers, limitation des inondations et des coulées boueuses, etc.

À l'échelle mondiale, les sols contribuent très fortement aux émissions de N_2O et de CH_4 . En France métropolitaine, ce sont principalement des émissions de N_2O qui sont observées. Elles sont contrôlées par l'activité des micro-organismes du sol. L'intensité des émissions de N_2O dépend fortement du mode d'occupation des sols et des pratiques culturales. Ces flux vers l'atmosphère s'exercent sur de courtes périodes, liées à des fluctuations climatiques ou aux périodes d'épandage des engrais. Ces mécanismes sont complexes et encore mal connus. Il est donc extrêmement difficile de faire un bilan exact de ces émissions en France.

Représentation simplifiée des gaz à effet de serre dans les sols



Source : Gis Sol, 2011, d'après Balesdent *et al.*, 2011, 2^e édition. Chapitre 5. Stockage et recyclage du carbone. Dans : M.-C. Girard, C. Walter, J.-C. Rémy, J. Berthelin, J.-L. Morel. Sols et environnement. Paris : Dunod. 881 pages. (coll. Sciences sup).

■ Le carbone et la matière organique dans les sols de France

Les stocks de carbone organique des sols de France métropolitaine sont évalués à environ 3,2 milliards de tonnes dans les 30 premiers centimètres. Toute modification, positive ou négative, des stocks de carbone organique des sols constitue un puits ou une source de CO₂ atmosphérique. Ces stocks peuvent être fortement modifiés par des changements d'usages ou de pratiques. Ils sont également très dépendants du climat. Le stockage de carbone organique dans les sols constitue un moyen temporaire d'atténuation du changement climatique. L'impact à long terme du changement climatique sur les stocks de carbone des sols reste cependant très incertain.

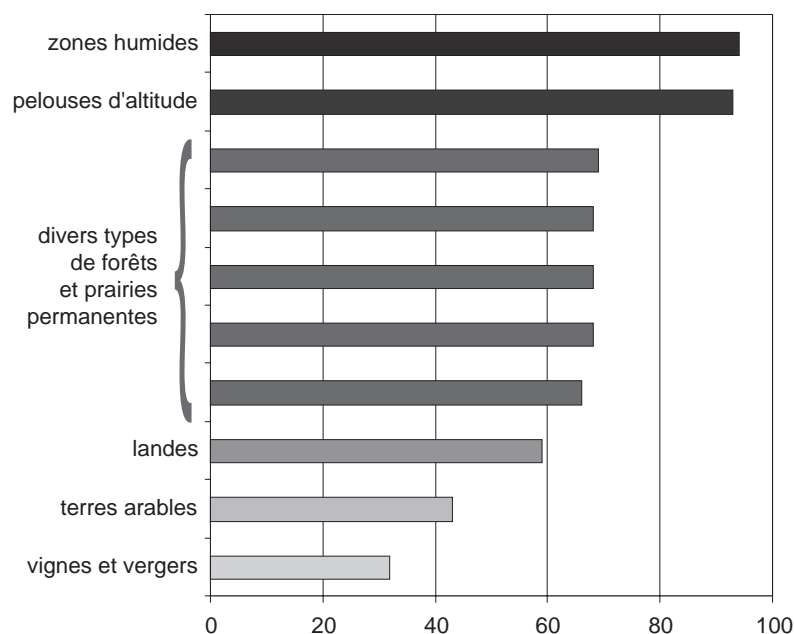
À l'échelle mondiale, les sols sont le plus grand réservoir terrestre de carbone organique. Ce dernier est le constituant principal de la matière organique. Celle-ci provient essentiellement de la décomposition des résidus végétaux. Lors de la photosynthèse, les végétaux absorbent pour leur croissance du CO₂ atmosphérique qui enrichit ainsi le sol en carbone après leur mort. La matière organique est ensuite biodégradée plus ou moins rapidement sous l'action des micro-organismes du sol et en fonction des conditions du milieu. Cette dégradation produit à son tour du CO₂ qui retourne vers l'atmosphère.

En échangeant en permanence du carbone avec l'atmosphère, les sols représentent donc un compartiment majeur du cycle global de cet élément. Ainsi, toute modification, positive ou négative, des stocks de carbone organique des sols constitue un puits ou une source de CO₂ atmosphérique.

Le stock de carbone organique des sols est fonction d'une part des flux entrant dans le sol et d'autre part des vitesses de biodégradation – ou de minéralisation – des matières organiques dans le sol. Les flux entrants reposent principalement sur la production végétale et sa gestion (récoltes, gestion des résidus, etc.). Les vitesses de minéralisation dépendent de la nature des matières organiques et des conditions du milieu qui influencent l'activité des micro-organismes (aération, humidité, localisation de la matière organique dans le sol, température, etc.).

Les stocks de carbone organique des sols de France sont évalués à environ 3,2 milliards de tonnes dans les 30 premiers centimètres. C'est généralement cette partie la plus superficielle du sol qui contient le stock le plus important et pouvant être sujet à des changements notables. On constate un effet majeur des types d'occupation sur les stocks de carbone organique du sol.

Les stocks de carbone organique (en t.ha⁻¹) des trente premiers centimètres des sols de France en fonction du type d'occupation du sol

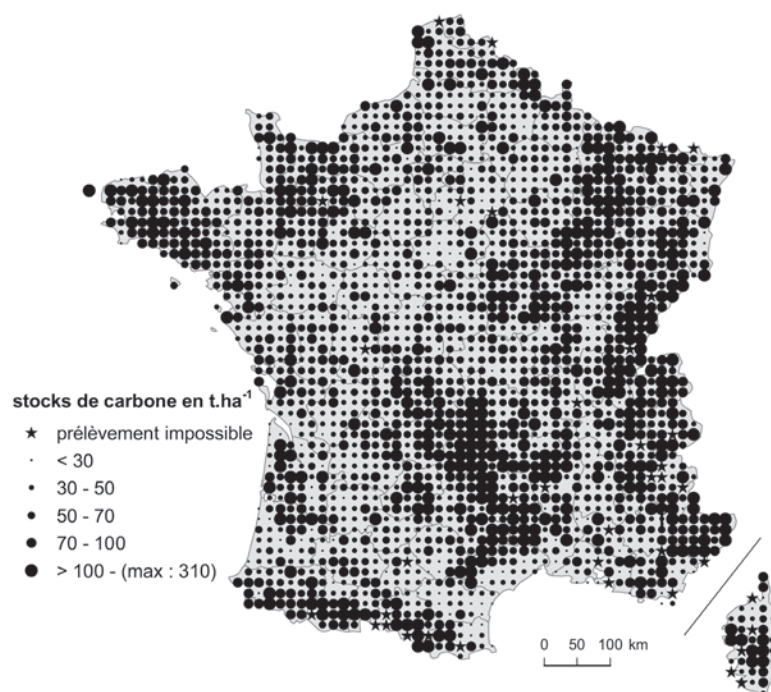


Source : Inra, expertise scientifique collective, 2002.

Les sols des vignes et des vergers se distinguent nettement par des stocks de carbone plus faibles que sous les autres occupations. Les terres arables sont caractérisées par des stocks relativement faibles également. Les prairies et les forêts présentent des stocks voisins, proches

de 70 t/ha. Enfin, les stocks les plus importants sont présents dans les pelouses d'altitude et les zones humides, et peuvent dépasser 300 t/ha dans certains sols tourbeux.

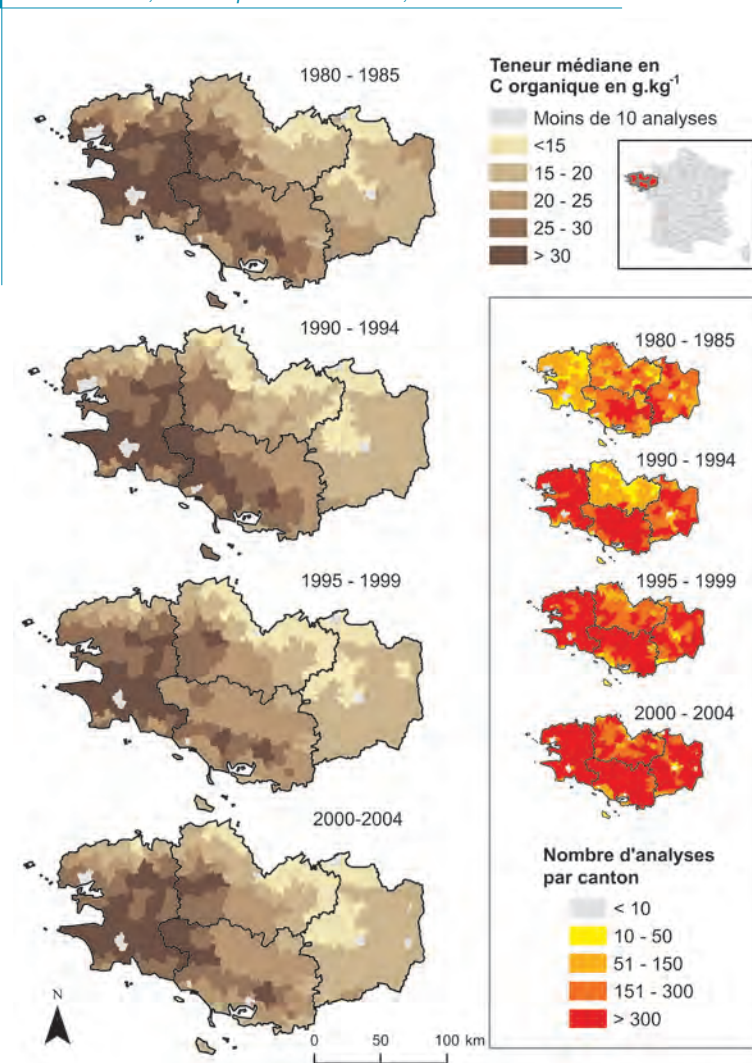
Le stock de carbone organique dans les 30 premiers centimètres des sols de France métropolitaine



Source : Gis Sol, RMQS, 2010 ; IGN, Geofla®, 2006.

Les stocks les plus faibles sont observés en Languedoc-Roussillon, région fortement viticole et caractérisée par un climat chaud et des sols peu épais. On observe également des stocks faibles dans quelques zones de culture très intensive (Beauce Chartraine, Nord). Les stocks de carbone faibles à moyens (40-50 t/ha) sont caractéristiques des sols des grandes plaines de culture intensive de France ainsi que des sols limoneux. On les observe dans tout le grand Bassin parisien, une partie du Bassin aquitain, le Toulousain, le Languedoc et le sillon rhodanien. Les stocks de carbone moyennement élevés (50-70 t/ha) sont caractéristiques des grandes régions forestières ou fourragères de France (Bretagne, Est, Massif central, Normandie). Les stocks de carbone les plus élevés correspondent à des situations climatiques (sols situés en altitude), minéralogiques (sols volcaniques du Massif central) ou hydriques extrêmes (marais de l'Ouest, delta du Rhône).

En termes de tendance, plusieurs observations montrent que les teneurs et les stocks de carbone sont à la baisse depuis plusieurs décennies dans différentes régions françaises, par exemple en Beauce, en Bretagne, en Franche-Comté, dans les Landes de Gascogne, dans le piémont pyrénéen. Ces baisses seraient dues à différents facteurs : défrichement des forêts et mise en culture (Landes de Gascogne, piémont pyrénéen), retournement des prairies permanentes au profit de cultures fourragères annuelles (Bretagne, Franche-Comté), intensification des pratiques agricoles (Beauce), voire changement climatique (Franche-Comté). Les baisses observées sont en règle générale d'autant plus importantes que les teneurs initiales en matières organiques des sols sont élevées.



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

Note : La collecte des analyses de la Base de Données d'Analyses de Terre (BDAT) ayant débuté plus tôt en Bretagne (1980) qu'au niveau national (1990), ces statistiques ont permis d'analyser l'évolution du carbone organique dans les sols bretons sur une période de plus de 20 ans.

En revanche, dans certaines régions cultivées de façon intensive depuis très longtemps, les stocks de carbone organique ont actuellement tendance à se stabiliser, voire à augmenter légèrement (c'est le cas par exemple en Picardie). Ceci pourrait être dû à l'accroissement des flux de carbone entrants (par exemple, les pailles) ou à des pratiques de gestion plus favorables au stockage de carbone (réduction de la fréquence et de l'intensité des travaux du sol, introduction de cultures intermédiaires). Une expertise commanditée en 2001 par le ministère en charge de l'écologie a conclu que ce stockage additionnel volontaire pourrait représenter entre 1 et 3 millions de tonnes de carbone par an sur une durée de 20 ans.

Les actions permettant d'augmenter ces stocks de façon significative à l'échelle du territoire sont principalement les changements d'usage des sols (afforestation et

conversion de cultures en prairies permanentes), l'adoption de techniques culturales simplifiées, l'implantation de cultures intermédiaires et l'enherbement des vignes et des vergers. Il est important de considérer que le stockage et le déstockage de carbone n'ont pas des cinétiques symétriques. Par exemple, sur une durée de 20 ans, le déstockage lié à la conversion d'une prairie permanente en terre arable est deux fois plus rapide que celui généré par la conversion inverse. Ceci a deux conséquences majeures. Pour être efficace, une pratique « stockante » ne doit pas être interrompue, au risque d'en perdre rapidement le bénéfice. De plus, si une conversion réputée « stockante », comme par exemple la conversion d'une terre arable en prairie, s'accompagne de la conversion inverse sur une surface équivalente, le bilan est alors négatif.

La capacité de stabilisation du carbone organique des sols – ou, autrement dit, leur capacité de protection vis-à-vis de la biodégradation – dépend en partie de leurs propriétés intrinsèques et en particulier de leur teneur en argile. En conséquence, la capacité de stockage additionnel dépend de cette teneur en argile et ce ne sont pas obligatoirement les sols présentant les plus faibles teneurs qui offrent le meilleur potentiel additionnel de stockage de carbone.

Le maintien d'une teneur en carbone organique suffisante dans les sols présente de nombreux autres bénéfices environnementaux et agronomiques : amélioration de la structure du sol, résistance à l'érosion des sols, augmentation de la capacité de stockage en eau, rétention et fourniture d'éléments nutritifs aux plantes, stimulation de l'activité biologique du sol, etc. Les apports de matières organiques exogènes (composts, fumiers, etc.) peuvent contribuer à maintenir ou à augmenter significativement cette teneur.

1 Les sols de France sont-ils « pauvres » en matières organiques ?

encart

Il est très difficile de définir une teneur souhaitable en matières organiques pour les sols. D'une part, les matières organiques sont constituées d'une très large gamme de composés dont les effets sur les propriétés physico-chimiques des sols sont différents. D'autre part, il n'existe généralement pas de véritable « seuil » de comportement des sols en fonction des teneurs. Enfin, la teneur souhaitable, ou plus précisément la teneur que l'on cherche à atteindre ou au-dessus de laquelle on cherche à se maintenir, dépend de la propriété que l'on désire améliorer ainsi que d'autres caractéristiques : teneur en argile, système de culture, position topographique, climat, etc. L'évaluation d'une teneur observée doit donc se faire en fonction d'un référentiel local. En ce qui concerne la stabilité de la structure de surface des sols (propriété intervenant dans les processus de battance et d'érosion), ce sont principalement les sols très limoneux qui présentent des teneurs souvent faibles et qu'il est important de surveiller. On les rencontre principalement dans le grand Bassin parisien (Brie, Beauce Chartraine), en Picardie, dans le Sundgau (sud de l'Alsace) et dans le grand Sud-Ouest (sols dits « de boulbènes »).

Si le stockage de carbone organique dans les sols peut être considéré comme un moyen important d'atténuation du changement climatique, il n'est cependant pas une solution à long terme. À climat constant, tout changement d'usage ou de pratique finit par atteindre un nouvel état d'équilibre après quelques décennies et ne génère donc plus de stockage additionnel. Le stockage de carbone organique dans les sols représente donc un potentiel d'atténuation limité dans le temps comme dans l'espace. Le changement climatique lui-même est susceptible d'influer, positivement ou négativement, sur les stocks de carbone des sols.

L'impact futur du changement climatique sur les stocks de carbone organique des sols reste très incertain. Il est en effet sous la dépendance de facteurs pouvant avoir des effets opposés. L'augmentation de la température, en allongeant la période de croissance des végétaux,

pourrait avoir, dans certains cas, des effets positifs sur les flux entrants de carbone dans les sols. Inversement, ce réchauffement devrait favoriser l'activité microbienne et ainsi accélérer la biodégradation des matières organiques. Dans le sud de la France, des sécheresses estivales plus fréquentes pourraient également diminuer la production végétale et réduire les flux entrants. Une interrogation majeure concerne le devenir des stocks importants localisés dans les massifs montagneux, car les faibles températures ralentissent fortement la minéralisation.

Indirectement, la lutte contre le changement climatique, au travers par exemple de la valorisation énergétique de la biomasse (combustion des pailles, augmentation des prélèvements en forêt) pourrait également diminuer les flux de carbone entrants dans les sols.

Pour en savoir plus

- Arrouays D., Deslais W. et Badeau V., 2001. « The carbon content of topsoil and its geographical distribution in France. », *Soil Use and Management*, 17. 7-11 p.
- Arrouays D., Saby N., Walter C., Lemerrier B. et Schwartz C. 2006. « Relationships between particle size distribution and organic carbon in French arable topsoils. », *Soil Use and Management*, 22. 48-51 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 p. (coll. *Sciences sup*).
- 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.
- Jolivet C., Arrouays D., Lévêque J., Andreux F. et Chenu C., 2003. « Organic carbon dynamics in soil particle-size separates of sandy Spodosols when forest is cleared for maize cropping. », *Eur. J. Soil Sci.*, 54. 257-268 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.
- Métay A., Mary B., Arrouays D., Martin M.-P., Nicolardot B. et Germon J.-C., 2009. « Effets des techniques culturales sans labour (TCSL) sur le stockage de carbone dans le sol en contexte climatique tempéré. », *Canadian Journal of Soil Science*, 89(5). 623-634 p.
- Saby N.-P.-A., Arrouays D., Antoni V., Foucaud-lemercier B., Follain S., Walter C. et Schwartz C., 2008. « Changes in soil organic carbon content in a French mountainous region, 1990-2004. », *Soil Use and Management*, 24. 254-262 p.

Liens

- BDAT : Base de Données d'Analyses de Terre :
<http://www.gissol.fr/programme/bdat/bdat.php>
- INDIQUASOL : Base de Données des Indicateurs de la Qualité des Sols :
<http://www.gissol.fr/programme/bdiqs/bdiqs.php>

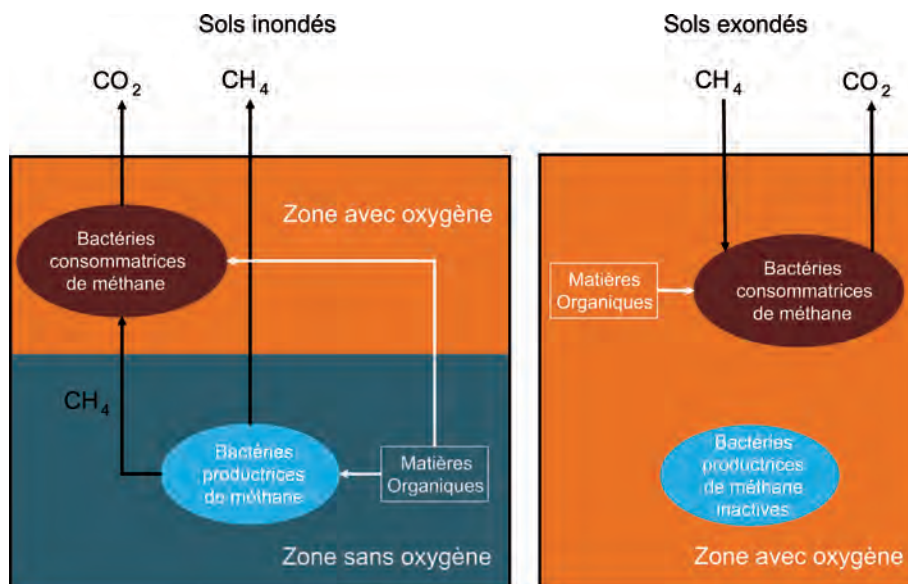
■ Les émissions par les sols de méthane et de protoxyde d'azote

Depuis deux siècles et demi, un effet de serre additionnel d'origine anthropique a été constaté. Le groupement inter-gouvernemental d'experts sur l'évolution du climat (GIEC) a estimé que le principal gaz à effet de serre, le dioxyde de carbone (CO_2), contribuerait à environ 60 % de cet effet de serre additionnel. Mais le méthane (CH_4) et le protoxyde d'azote ou oxyde nitreux (N_2O) ne sont pas à négliger. En effet, les concentrations atmosphériques de CH_4 et de N_2O ont augmenté respectivement de 150 % et de 18 % depuis 1750. Or, ces deux gaz ont un pouvoir réchauffant très nettement supérieur à celui du CO_2 , 25 fois supérieur pour le CH_4 et 300 fois pour le N_2O . On estime ainsi que leur contribution à l'effet de serre additionnel est respectivement de 20 % et 6 %. Pour ces deux gaz à effet de serre, les sols sont une source majeure d'émissions. Globalement, le tiers des émissions planétaires de CH_4 et les deux tiers de celles de N_2O proviennent des sols.

Le méthane est produit par l'activité microbienne dans les sols inondés. En effet, dans ces sols, l'excès d'eau a appauvri le sol en oxygène. Dès lors, certains micro-organismes dégradent les matières organiques du sol et les transforment en CO_2 et en méthane. Dans les sols exondés, la présence d'oxygène permet à d'autres micro-organismes qui utilisent le méthane comme source de carbone et d'énergie, d'oxyder le méthane atmosphérique en CO_2 . Ces sols fonctionnent donc comme des puits de méthane, mais avec une intensité très faible

comparée aux émissions des sols inondés. Ces deux populations de micro-organismes cohabitent dans les sols inondés et par conséquent un fort pourcentage de méthane produit dans les zones sans oxygène est ré-oxydé dans les zones oxygénées. En l'absence de végétation, le méthane est transféré vers l'atmosphère par diffusion et sous forme de bulles. En présence de végétation, notamment dans les rizières, les plantes absorbent ce méthane par leurs racines et le réémettent dans l'atmosphère par leurs feuilles et leurs tiges.

Les mécanismes de production et de consommation de méthane dans les sols



Source : D'après Hénault C., Roger P., Laville P., Gabrielle B., Cellier P. 2011. 2^e édition, Chapitre 7. Les émissions par les sols des gaz à effet de serre CH_4 et N_2O . In : M.-C. Girard, C. Walter, J.-C. Rémy, J. Berthelin, J.-L. Morel. *Sols et environnement*. Dunod, France. 881 pages.

Le protoxyde d'azote est produit au cours de deux étapes du cycle de l'azote : la dénitrification et la nitrification. En effet, dans les sols appauvris en oxygène, les populations microbiennes responsables de ces transformations modifient leur mode de respiration. Au lieu d'utiliser l'oxygène, elles consomment les ions nitrate (NO_3^-) et nitrite (NO_2^-) du sol : c'est la dénitrification. Cette forme de respiration microbienne produit au stade final de l'azote (N_2). Mais

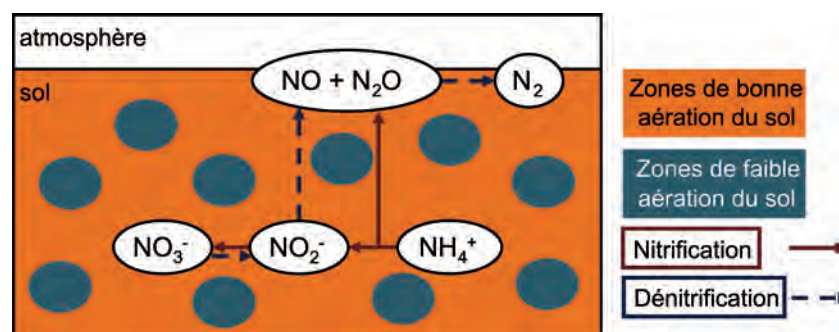
pour des raisons non encore élucidées, des gaz azotés intermédiaires peuvent être relargués : l'oxyde nitrique (NO) ou le protoxyde d'azote (N_2O).

Le processus de nitrification est le résultat de la transformation, par des populations bactériennes, d'ammonium en nitrites puis en nitrates en présence d'oxygène. Dans certains cas, l'oxyde nitrique (NO) et le protoxyde d'azote

(N₂O) peuvent également être libérés lors de ce processus ou par dénitrification des nitrites produits. Enfin dans certains milieux extrêmes très acides ou très réducteurs, N₂O peut être produit par dénitrification chimique. Un sol peut présenter des zones faiblement aérées

ou bien aérées simultanément. Par conséquent, les processus de dénitrification et de nitrification peuvent fonctionner simultanément et interagir. Les émissions sont donc le résultat d'un équilibre entre les mécanismes de consommation et de production de N₂O.

La production du N₂O par les processus de dénitrification ou de nitrification



Source : D'après Hénault C., Roger P., Laville P., Gabrielle B., Cellier P. 2011, 2^e édition., Chapitre 7. Les émissions par les sols des gaz à effet de serre CH₄ et N₂O. In : M.-C. Girard, C. Walter, J.-C. Rémy, J. Berthelin, J.-L. Morel. *Sols et environnement*. Dunod, France. 881 pages.

Les populations microbiennes impliquées dans la production de CH₄ et de N₂O sont présentes dans tous les sols du monde, mais ne sont pas toujours actives en termes de production de ces gaz. Cela dépend des conditions du milieu. Ainsi, la production de méthane s'effectue en milieu réducteur, la dénitrification en milieu faiblement réducteur et la nitrification en milieu oxydant. Les activités des populations microbiennes sont aussi affectées par le pH et sont plus faibles en milieu acide.

Le climat joue également un rôle primordial. L'activité des populations microbiennes est faible quand les températures sont froides. Elle augmente avec la température jusqu'à un optimum entre 30 et 40°C, puis diminue pour des températures très élevées. La pluviométrie a un effet déterminant sur les émissions car elle peut générer des engorgements temporaires favorables à l'émission de méthane ou de N₂O, même dans des sols bien drainés.



Un dispositif de mesures des gaz à effet de serre en Bourgogne.

L'intensité des émissions de N_2O dépend également du mode d'occupation des sols et des pratiques culturales. L'irrigation favorise les émissions de ce gaz car elle augmente les occurrences de situations d'excès d'eau. *A contrario*, le drainage artificiel est plutôt défavorable aux émissions. L'utilisation des engrais organiques (fumiers, lisiers, etc.) peut, selon le type d'engrais, augmenter ou diminuer les émissions. La fertilisation minérale augmente les émissions de CH_4 et de N_2O dans une proportion variable selon le type d'engrais, les quantités appliquées et le mode d'application.

Enfin, la variabilité spatiale et temporelle des émissions est importante. Sur un territoire donné, l'essentiel de la surface présente souvent de faibles valeurs d'émissions mais dans certaines zones, elles peuvent être 10 à 100 fois plus élevées. Les émissions de CH_4 et de N_2O sont également fortement variables dans le temps, aux niveaux journalier et saisonnier. Au cours du cycle cultural du riz, les pics d'émission sont observés après incorporation des matières organiques, durant la phase de reproduction, à la fin du cycle et après la récolte. Pour le N_2O , des émissions plus importantes sont observées après de fortes pluies et les apports d'engrais azotés. Au cours de la journée, des variations temporelles d'émission sont souvent perceptibles. Elles sont liées aux variations de température du sol et des conditions de vent et de pression à la surface du sol. Cette variabilité complique la quantification des émissions de N_2O et de CH_4 par les sols.

● L'estimation des émissions nationales de CH_4 et de N_2O par les sols

Depuis l'adoption de la Convention des Nations Unies sur le changement climatique, les pays signataires doivent réaliser des inventaires d'émission de gaz à effet de serre. Ces inventaires sont destinés à estimer la contribution de chaque pays à l'effet de serre global et à l'évolution des émissions dans le temps, et à évaluer l'efficacité des mesures de réduction des émissions. Le GIEC a établi des règles de calcul des émissions nécessitant d'une part d'établir une liste exhaustive des sources potentielles de CH_4 et de N_2O et, d'autre part, de définir des facteurs d'émission pour chacune de ces sources au niveau d'un pays et d'une année. Les facteurs d'émission sont définis à partir d'études expérimentales ou bibliographiques.

Dans son rapport de 2011, le Centre interprofessionnel technique d'études de la pollution atmosphérique (CITEPA) présente les estimations d'émissions de gaz à effet de serre de 1990 à 2009 pour la France. Cependant, il existe une très forte incertitude sur ces chiffres, avec des variations relatives pouvant aller de 50 % à 400 % selon les types d'émissions.

Les émissions de méthane liées aux sols cultivés proviennent surtout des rizières. En raison de leurs faibles surfaces en France, les émissions sont limitées et situées entre 4 400 et 6 400 tonnes de méthane par an selon les années. Ces émissions ont essentiellement lieu en Guyane où sont situées la plupart des rizières. En 1999, une estimation de la capacité d'absorption de CH_4 atmosphérique par les sols exondés l'évaluait à 120 000 tonnes par an.

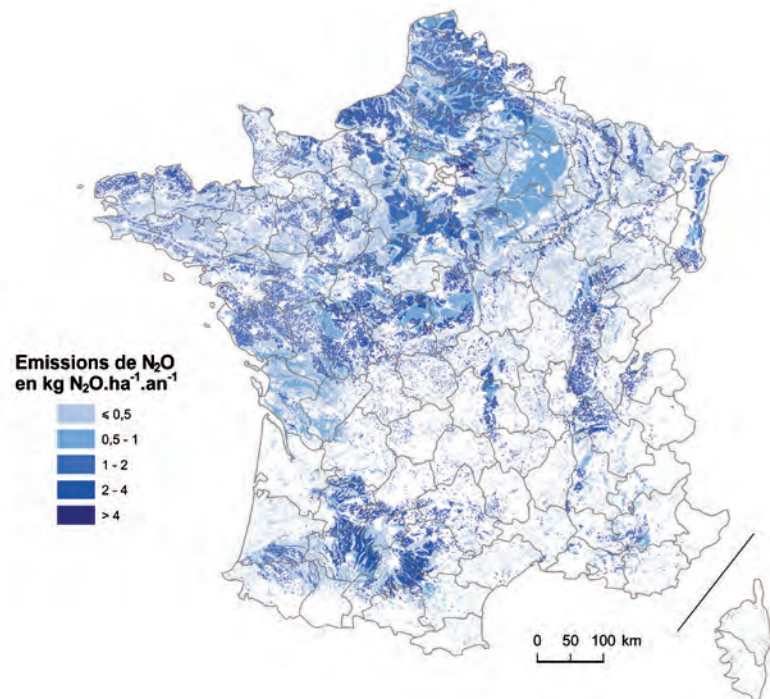
En ce qui concerne le N_2O , le CITEPA distingue les émissions directes par les sols liées à l'utilisation d'engrais minéraux ou organiques, les émissions directes dues au pâturage et les émissions indirectes dues aux pertes d'azote par les systèmes agricoles par ruissellement, lessivage et émissions atmosphériques. Selon les estimations du CITEPA, les émissions dues à la fertilisation sont passées de 86 000 tonnes en 1990 à 70 000 tonnes de N_2O en 2009. Les émissions dues au pâturage ont évolué de 28 000 à 24 000 tonnes de N_2O par an et les émissions indirectes de 67 000 à 56 000 tonnes de N_2O par an. Les émissions totales des sols agricoles sont donc passées de 181 000 à 150 000 tonnes de N_2O par an. En terme de pouvoir de réchauffement, 150 000 tonnes de N_2O équivalent à 45 millions de tonnes de CO_2 . Cette baisse serait notamment liée à la diminution des apports d'engrais azotés et à la baisse des cheptels bovin et ovin. Par contre, la part des sols agricoles dans les estimations totales d'émissions de N_2O augmente (de 60 % à 72 %) en raison d'une diminution importante des émissions industrielles.

À côté de la méthode d'estimation assez générale du GIEC, divers modèles d'estimation des émissions intégrant les connaissances des processus impliqués ont été développés par les scientifiques. Ainsi, pour la France, une estimation spatialisée des émissions de N_2O pour les sols de grandes cultures a été réalisée pour l'année 2007. Elle s'appuie sur un modèle simulant la croissance des cultures et le fonctionnement des cycles du carbone et de l'azote, et des données spatialisées de climat, de sol et d'assolement des six principales grandes cultures en France.

L'intérêt de ce type de modèles est d'estimer plus finement les émissions de N₂O par culture, par région, et en fonction des pratiques culturales. La simulation des évolutions d'occupation du sol ou de pratiques culturales

est également possible et permet d'évaluer leur pertinence en terme de réduction d'émissions de gaz à effet de serre.

L'estimation annuelle des émissions de N₂O par les grandes cultures en France métropolitaine



Source : Gabrielle *et al.*, 2011 (projets N-TWO-O (ANR) et IMAGINE (Fondation ENERBIO/TUCK)) ; IGN, Geofla®, 2006.

La carte des estimations des émissions de N₂O par les grandes cultures montre une forte variabilité spatiale des émissions par hectare de culture sur le territoire métropolitain. Les zones à faibles émissions correspondent à des régions de sols plutôt acides (Bretagne) ou calcaires (Champagne-Ardenne, sud de Poitou-Charentes).

Le Bassin parisien (Beauce, Haute-Normandie, Picardie) montre des niveaux d'émissions moyens à forts sur des sols à fort potentiel d'émission (sols lessivés). En Midi-Pyrénées, les zones ayant des émissions élevées correspondent à des sols limoneux et argileux présentant une tendance aux excès d'eau.

Pour en savoir plus

- 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 Avril 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.

Les pertes en sol

Le sol peut être affecté par des phénomènes naturels comme l'érosion ou les mouvements de terrain provoquant des pertes en sol. Mais elles peuvent aussi résulter de l'artificialisation des sols causée par les activités anthropiques.

L'érosion hydrique des sols affecte environ 18 % du territoire métropolitain. Elle peut s'exprimer sous forme de coulées d'eau boueuse aux conséquences parfois catastrophiques. De façon moins visible, lorsqu'elle n'est pas maîtrisée, l'érosion peut provoquer, à long terme, une dégradation irréversible des sols.

Les mouvements de terrain sont des déplacements plus ou moins brutaux de sols ou de roches. Parmi eux, les glissements de terrain affectent environ 7 000 communes françaises, dont un tiers avec des risques pour la population. La susceptibilité des versants aux glissements de terrain et aux écoulements a été cartographiée pour la métropole. Plus de 40 % du territoire présenterait une susceptibilité forte et 30 % une susceptibilité modérée.

D'après le dernier inventaire biophysique CORINE (coordination de l'information sur l'environnement) Land Cover 2006, l'artificialisation des sols atteint actuellement 5 % en France métropolitaine et continue sa progression.

D'après l'enquête Teruti, l'artificialisation (urbanisation, construction d'infrastructures, équipements) a affecté chaque année environ 60 000 ha de terres agricoles au début des années 2000 et a touché 93 000 hectares en 2010. Elle touche en priorité les espaces périurbains mais également les zones littorales et certaines montagnes. Ailleurs plus discontinue, elle aboutit au mitage des terres agricoles et aggrave les difficultés à les cultiver.

L'imperméabilisation des sols correspond à leur couverture par des matériaux non poreux (construction, béton, bitume, etc.). Outre la consommation de terres naturelles et agricoles, elle entraîne une dégradation irréversible des sols et une altération de certaines de leurs fonctions. La connaissance de la nature des sols et de leurs fonctions est donc un élément primordial dans la mise en œuvre de projets d'aménagements urbains.

L'érosion : un processus majeur de la dégradation des sols

L'érosion résulte de l'ablation des couches superficielles du sol et du déplacement des matériaux le constituant, sous l'action de l'eau, du vent, des rivières, des glaciers, ou de l'Homme. L'érosion hydrique toucherait 26 millions d'hectares en Europe, contre un million pour l'érosion éolienne. Près de 18 % des sols présentent un aléa d'érosion moyen à très fort en France métropolitaine.

Dans la stratégie thématique pour la protection des sols en Europe (COM (2006) 231), l'érosion a été identifiée comme l'une des huit menaces pesant sur les sols. En France, le décret d'application n°2005-117 de la loi du 30 juillet 2003 (n°2003-699) prévoit des mesures de lutte contre l'érosion des sols et la nécessité de réaliser un zonage des risques d'érosion sous la responsabilité des préfets.

L'érosion hydrique des sols se caractérise par le départ de sol sous l'action du ruissellement des eaux de pluies ne pouvant s'infiltrer dans le sol. Elle fait intervenir deux processus de dégradation des sols : la battance et l'érodibilité. La battance traduit la sensibilité des sols à la fermeture de la porosité en surface, avec formation d'une croûte réduisant l'infiltration de l'eau. L'érodibilité reflète la sensibilité d'un sol à l'arrachement et au transport des particules sous l'action de la pluie et du ruissellement. Dans certaines régions, l'érosion est renforcée par l'action de l'Homme : certaines pratiques culturales (labour dans le sens de la pente, sol nu en hiver, cultures peu couvrantes, etc.), surpâturage, déforestation ou imperméabilisation. Ainsi, un sol limoneux, sur pente forte, non couvert par des cultures d'hiver et soumis à des pluies hivernales intenses est particulièrement vulnérable à l'érosion.

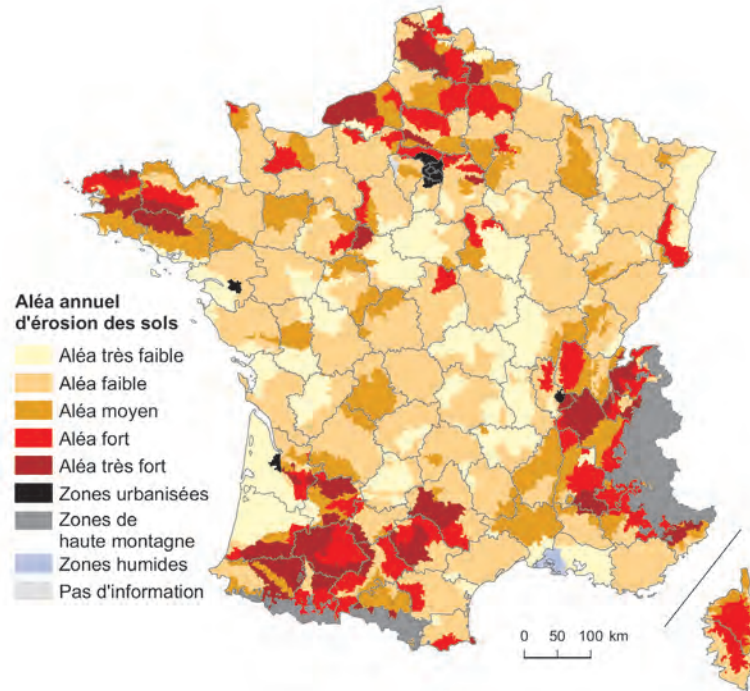


La formation d'une croûte de battance sur des sols limoneux sous culture de betterave (Pays de Caux).



La formation d'une ravine en sol limoneux sous culture de céréales (Pays de Caux).

L'aléa d'érosion des sols par petite région agricole



Source : Gis Sol-Inra-SOeS, 2011.

Note : L'aléa d'érosion des sols 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.

Les dégâts occasionnés aux cultures sont essentiellement : l'arrachement des plants ou des semis, la formation de rigoles et de ravines gênant les interventions culturales, le déclin de la biodiversité des sols, la perte de la couche fertile superficielle des sols dans le haut des parcelles et le recouvrement des plants par le dépôt des particules entraînées par l'érosion en bas de versant. La redistribution des particules entraînées vers le bas des parcelles pose également le problème des contaminations par les fertilisants et les éléments polluants adsorbés sur ces particules. La concentration des éléments polluants peut donc générer des phénomènes locaux de phytotoxicité et une contamination des chaînes alimentaires ou des ressources en eau superficielles ou souterraines.

L'érosion des sols peut parfois prendre des tournures catastrophiques, soit par l'expression exceptionnelle de l'un de ces facteurs (très fortes pluies, etc.), soit en raison des modifications apportées par l'Homme aux paysages. Des coulées d'eau boueuse peuvent alors se manifester

en aval des zones de départ. Elles peuvent affecter les infrastructures ou les zones résidentielles. Lorsque ces dégâts sont graves, ils font l'objet de demandes d'indemnisation au titre des catastrophes naturelles. L'aléa d'érosion des sols correspond à la possibilité qu'une érosion ait lieu dans une zone donnée. Il est déterminé par l'interaction entre le climat, la sensibilité des sols à l'érosion et des facteurs liés à l'occupation du sol et aux pratiques culturales. Il ne constitue un risque d'érosion que si des enjeux humains, économiques ou environnementaux sont présents dans la zone. Pour limiter le risque on peut donc agir sur l'aléa ou sur les enjeux. Pour cela, il faut approfondir l'étude des phénomènes érosifs et délimiter avec précision les zones vulnérables. Cela permet d'orienter les décisions des gestionnaires locaux pour favoriser des mesures agro-environnementales, des dispositifs de prévention des coulées d'eau boueuse (haies, taillis et bandes enherbées limitant le ruissellement, fascines), une urbanisation et une artificialisation des sols modérées respectant les zones sensibles.



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

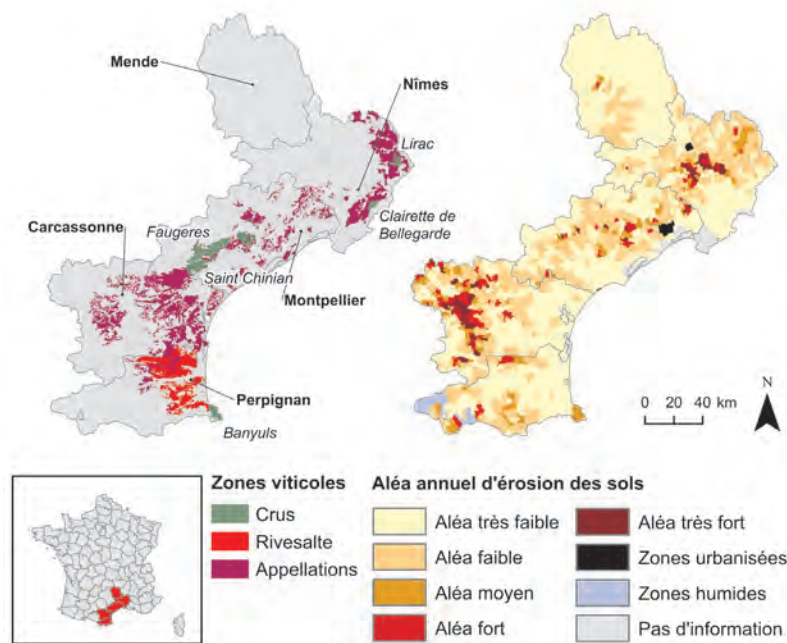
1 L'estimation de l'aléa d'érosion des sols en région Languedoc-Roussillon

Le Référentiel Régional Pédologique au 1/250 000^e 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. En Lozère, le faible aléa est lié à des sols peu sensibles à la battance et à la prédominance de forêts et de prairies protégeant les sols de l'érosion. Le littoral, pourtant soumis à une forte pression urbaine et à une artificialisation des sols importante, est cependant assez peu sensible à l'érosion des sols. Dans ces zones d'habitat concentré, ce sont néanmoins les zones périurbaines entourant les grandes villes qui sont les plus concernées.

L'estimation de l'influence de l'aléa érosif sur la qualité des eaux superficielles a quant à elle montré une forte influence du facteur saisonnier sur l'altération de la qualité des eaux superficielles, notamment par des teneurs en matières en suspension plus élevées dans les eaux en automne.

Enfin, l'étude des zones d'appellations viticoles montre que les vignobles les plus sensibles à l'aléa érosif sont localisés aux environs de Carcassonne et de Montpellier, tandis que ceux des plaines littorales sont moins sensibles.

Les zones d'aptitude viticole AOC et l'aléa érosif des sols dans ces zones



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

- 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.
- Brgm, 2006. *Guide méthodologique pour un zonage départemental de l'érosion des sols*. Rapport n° 1, 2 et 3 (Rapports : BRGM/RP-55049-FR et BRGM/RP-55103-FR et BRGM/RP-55104-FR). Téléchargeables :
<http://www.brgm.fr/publication/pubDetailRapportSP.jsp?id=RSP-BRGM/RP-55049-FR>
<http://www.brgm.fr/publication/pubDetailRapportSP.jsp?id=RSP-BRGM/RP-55103-FR>
<http://www.brgm.fr/publication/pubDetailRapportSP.jsp?id=RSP-BRGM/RP-55104-FR>
- Commission européenne, 2004. *La stratégie thématique en faveur de la protection des sols, Volume II : érosion*.
- Ifen, 2005. « L'érosion des sols, un phénomène à surveiller », *Le 4 pages de l'Ifen*, n°106, septembre 2005. 4 p.
- Ifen, 1998. *Cartographie de l'aléa « érosion des sols » en France*. Orléans, Ifen. 63 p. (coll. Études et travaux, n°18).
- Le Bissonnais Y., Thorette J., Bardet C. et Daroussin J., 2002. *L'érosion hydrique des sols en France*. Rapport Ifen-Inra. 106 p.

Liens

- BRGM :
<http://www.brgm.fr/>
- Commission européenne, protection des sols :
<http://ec.europa.eu/environment/soil>
- Inra d'Orléans, érosion des sols :
<http://erosion.orleans.inra.fr>
- Ministère en charge de l'Écologie :
 - La rubrique « Maîtrise du ruissellement agricole »
http://www.rdtrisques.org/projets/digetcob/bib/techniques_ruis/pole_comp_HN/
 - Service de l'Observation et des Statistiques :
Accès thématique « Sol »
<http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/theme/environnement/sous-theme/milieus-sol.html>
Cartographie interactive de l'aléa d'érosion des sols et des coulées boueuses :
<http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/cartographie/article/cartographie-interactive-geoidd-france.html>
- Portail de la Prévention des Risques Majeurs – Prim.Net :
<http://www.prim.net/>

■ Les glissements de terrain

Un mouvement de terrain est un déplacement gravitaire, plus ou moins brutal, de sols ou de roches déstabilisés sous l'effet de sollicitations naturelles (fonte de neige, pluviométrie anormalement forte, secousses sismiques, érosion de pied de versant, dissolution) ou anthropiques (terrassement, vibration, déboisement, exploitation de matériaux ou de nappes aquifères). Les types de mouvements de terrain et leur ampleur, de quelques mètres cubes à quelques millions de mètres cubes, sont très variés en raison des nombreux facteurs (topographie, lithologie, structure géologique, conditions hydro-géologiques, occupation du sol) et mécanismes de déclenchement et de propagation impliqués.

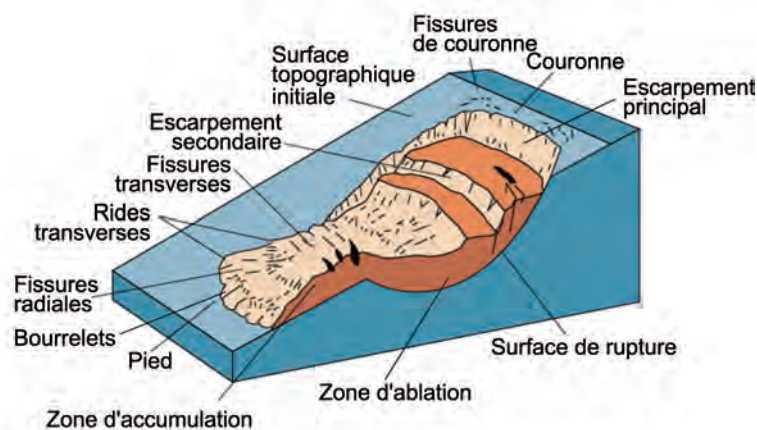
Quatre types de mouvement de terrain sont communément distingués : les écroulements, les chutes, les glissements et les écoulements. Seuls les deux derniers

sont détaillés ici, car ils affectent principalement les matériaux meubles non consolidés et les sols.

Les glissements de terrain sont des déplacements lents, de quelques millimètres à quelques mètres par an, de matériaux fins ou grossiers le long d'une ou de plusieurs surfaces de rupture. Elles peuvent être de forme circulaire (glissement rotationnel) ou plane et légèrement inclinée (glissement translationnel).

Les écoulements (coulées et laves torrentielles) sont plus fluides, composés au minimum de 30 % d'eau et au maximum de 70 % de matériaux fins ou grossiers. Plus dévastateurs par leur vitesse de propagation pouvant atteindre 5 mètres par seconde, ils se distinguent néanmoins des coulées boueuses ou des écoulements hyper-concentrés des zones agricoles.

La morphologie type d'un glissement de terrain : zones d'ablation à l'amont et d'accumulation à l'aval, délimitées sur un glissement translationnel déclenché en novembre 1994 dans le Piémont italien

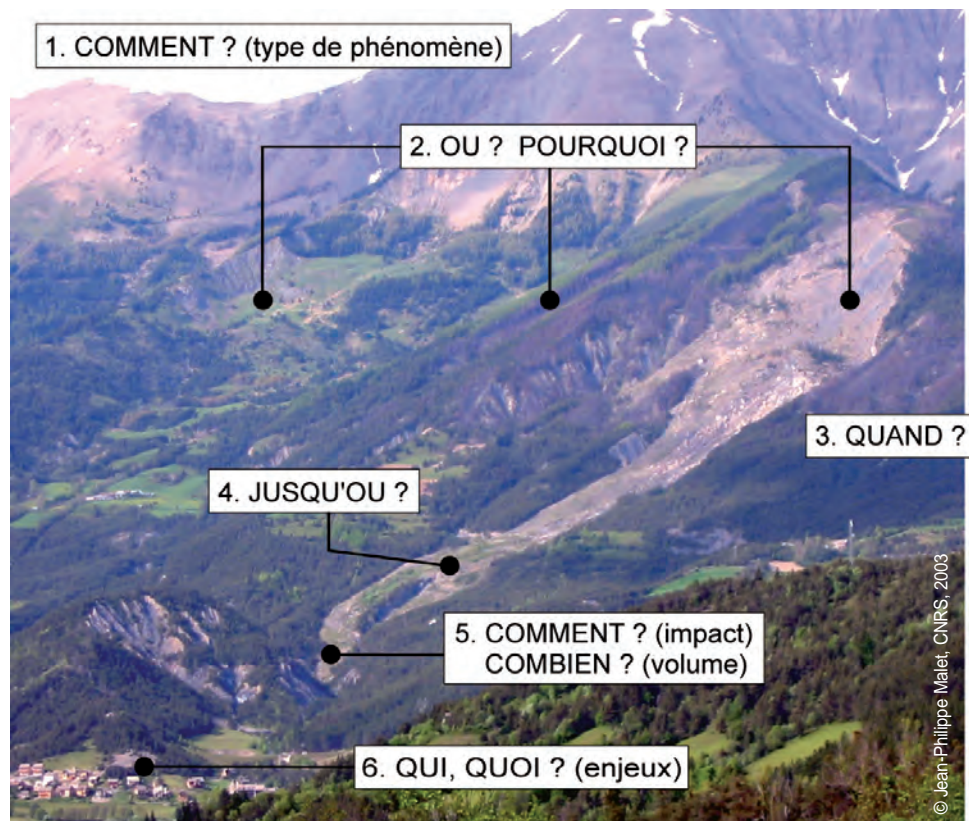


Source : D'après Varnes, 1978.

L'ensemble des régions françaises est affecté par l'aléa (ou phénomène naturel potentiellement dangereux) glissement de terrain et écoulement. Les zones de montagne (Alpes, Massif central, Pyrénées) ont une prédisposition particulière, ainsi que certains affleurements de lithologies sensibles (marnes du callovo-oxfordien en Provence-Alpes-Côte d'Azur, du lias dans le Jura, du toarcien en Champagne et en Lorraine, du bajocien en Normandie, du calcaire urgonien du Vercors et de la Chartreuse, du calcaire du lias des Causses de

Lozère et du Quercy, de la craie du coniacien de Normandie).

Le risque résulte du croisement de l'aléa et des enjeux humains, économiques et environnementaux. Pour l'évaluer, il faut définir l'occurrence spatiale (ou susceptibilité), la fréquence temporelle et les intensités du glissement de terrain et les confronter à la vulnérabilité des éléments exposés, exprimée en termes de coût ou de dommage potentiel.



Note : le glissement-coulée de La Valette, en amont de la ville de Barcelonnette (Alpes-de-Haute-Provence) est l'un des phénomènes majeurs actifs en France.

À partir des Dossiers Départementaux des Risques Majeurs (DDRM) et des connaissances des services de l'État, le ministère en charge de l'Écologie recense deux fois par an les communes à risques. Environ 7000 communes sont affectées par le risque de glissement de terrain, dont un tiers avec un niveau de gravité fort pour la population et près de 10 % considérés comme prioritaires pour la mise en œuvre de mesures de prévention. Les communes soumises à l'aléa avec enjeux humains

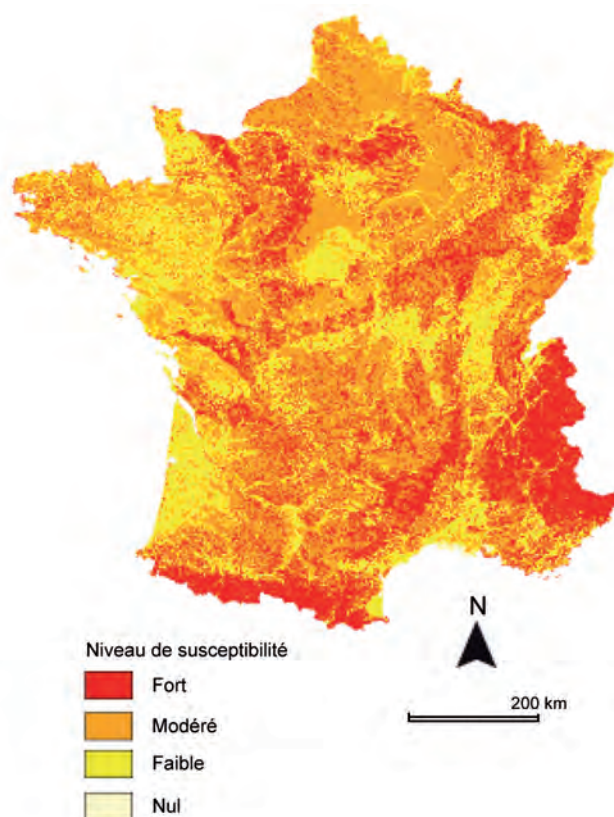
définis ou non sont visualisables sur le site internet de la Prévention des Risques Majeurs. En France, les victimes sont peu nombreuses, mais ces phénomènes sont souvent très destructeurs, car les aménagements y sont très sensibles et les dommages aux biens considérables et souvent irréversibles. Les coûts des dommages et de la prévention sont estimés en moyenne entre 1 à 1,5 milliard d'euros par an.

Glissements de terrain et écoulements majeurs historiques en France (liste non exhaustive)			
Année	Localisation	Phénomène	Victimes
1962	St-Jean-de-Maurienne (Savoie)	Lave torrentielle	75 victimes
1970	Plateau d'Assy (Haute-Savoie)	Coulée de boue	70 morts, destruction d'un sanatorium
1980	Grand-Ilet, Cirque de Salazie (Réunion)	Glissement	10 morts
1981	La Ravoire (Savoie)	Lave torrentielle	Dégâts estimés à 2 millions d'euros
1987	Le Grand-Bornand (Savoie)	Coulée de boue	29 victimes
1987	St-Antoine, Modane (Savoie)	Coulée de boue	Dégâts estimés à 3 millions d'euros
1994	La Salle-en-Beaumont (Isère)	Glissement	4 morts, plusieurs bâtiments détruits
2000	Cabassou, Remire-Montjoly (Guyane)	Glissement	10 morts
2000	Petit Bourg (Guadeloupe)	Glissement	20 bâtiments endommagés ou détruits
2001	Féterne (Haute-Savoie)	Glissement	50 bâtiments endommagés ou détruits
2003	Faucon (Alpes-de-Haute-Provence)	Lave torrentielle	Dégâts estimés à 3 millions d'euros
2004	Le Villard (Alpes-de-Haute-Provence)	Glissement	20 bâtiments endommagés ou détruits
Glissements de terrain majeurs actifs et surveillés en France			
Depuis	Localisation	Volume	Menaces
>1960	Super-Sauze (Alpes-de-Haute-Provence)	1 x 10 ⁶ m ³	Hameau du Pont-Long, risque d'obstruction de l'Ubaye et inondation de Barcelonnette
1976	Ruines de Séchilienne (Isère)	4 x 10 ⁶ m ³	Hameau de l'Île-Falcon, risque d'obstruction de la Romanche et, indirectement, inondation de l'agglomération grenobloise
1976	La Clapière (Alpes-Maritimes)	50 x 10 ⁶ m ³	Risque d'obstruction de la Tinée, inondation du village de St-Étienne-de-Tinée
1982	La Valette (Alpes-de-Haute-Provence)	4 x 10 ⁶ m ³	Village de St-Pons, risque d'obstruction de l'Ubaye et inondation de Barcelonnette
1982	Villerville-Cricqueboeuf (Calvados)	2 x 10 ⁶ m ³	Une centaine de bâtiments des communes de Villerville et Cricqueboeuf, 100 hab.
1985	Le Mas d'Avignonet (Isère)	10 x 10 ⁶ m ³	Hameau du Mas d'Avignonet, 190 hab.

1 La susceptibilité des versants aux glissements de terrain et aux écoulements

La surveillance et les calculs de stabilité développés pour étudier les sites actifs et à risque élevé ne peuvent être conduits sur de vastes étendues, notamment pour des questions de coût. On peut alors évaluer l'aléa aux échelles départementales ou régionales du 1/50 000 au 1/250 000, en cartographiant les facteurs géomorphologiques, géologiques, hydrogéologiques et d'occupation du sol favorables aux glissements de terrain et aux écoulements. Ces facteurs et leur poids respectif sont ensuite étalonnés sur les zones de mouvement observées à l'aide de renseignements historiques sur les événements passés, d'observations de terrain et de photographies aériennes. Cependant les périodes de retour ou l'intensité d'un événement ne peuvent être prédites par ces cartes.

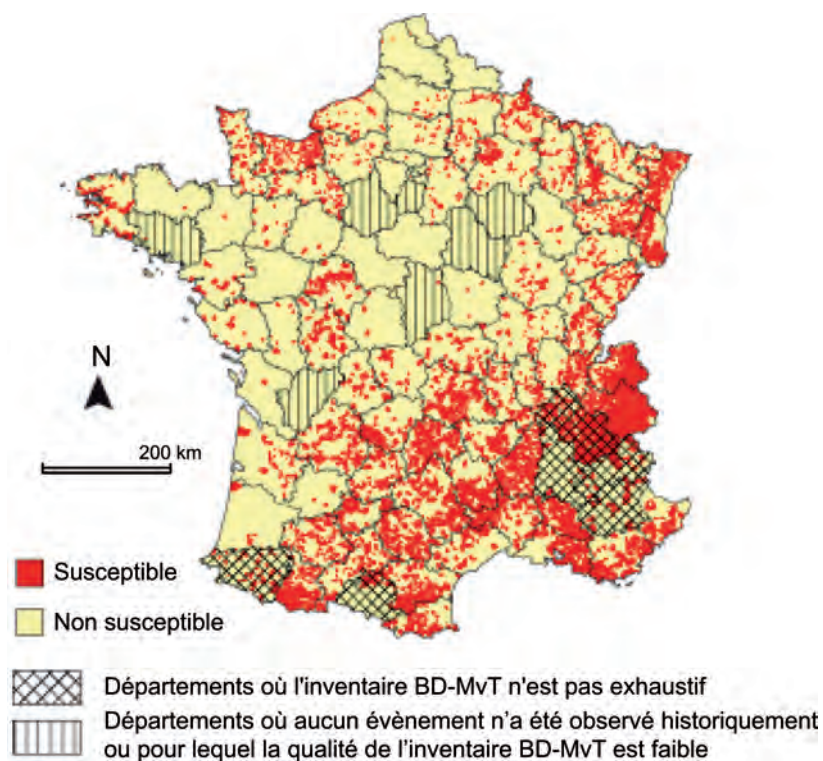
La susceptibilité globale des terrains aux glissements et aux écoulements



Source : Institut Physique du Globe de Strasbourg – CNRS.

Note : Cette approche multicritère avec une différenciation en quatre niveaux (fort, modéré, faible et nul) permet d'estimer la susceptibilité des terrains à l'échelle du millionième, pour les glissements de terrain et les écoulements.

Depuis 2009, la susceptibilité des versants aux mouvements de terrain a été cartographiée à l'échelle du territoire métropolitain à l'initiative d'un groupe d'experts européens, piloté par la Commission européenne. La méthode combine trois facteurs : la pente et la topographie, la lithologie et l'occupation du sol. Plus de 40 % du territoire présenterait une susceptibilité forte et 30 % une susceptibilité modérée. Ces valeurs sont élevées car elles ne représentent que la probabilité d'occurrence spatiale sans intégrer la probabilité d'occurrence temporelle ou l'intensité des phénomènes. Les cartes d'aléa identifient les terrains susceptibles aux mouvements de terrain, tandis que l'estimation du risque doit intégrer une évaluation économique des dommages directs (destructions) et indirects sur les activités. De plus, si les enjeux justifient des actions préventives à l'égard des voies de communication ou des zones urbanisées par exemple, l'analyse de leur vulnérabilité peut constituer des références utiles pour une prise de décisions adaptées.



Source : Institut Physique du Globe de Strasbourg – CNRS.

En France, depuis 1994, l'inventaire des informations historiques sur les mouvements de terrain regroupe environ 6 000 références dans la base de données nationale des mouvements de terrain (BD-MvT). Elle est gérée par le Bureau de Recherches Géologiques et Minières et développée en partenariat avec le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées et les services de Restauration des Terrains en Montagne de l'Office National des Forêts. Cette base recense par type, communes et départements, des informations souvent non exhaustives sur les phénomènes, comme le type, la date d'occurrence, la localisation et les dommages observés.

Des Plans de Prévention des Risques (PPR) pour les mouvements de terrain ont été réalisés et approuvés pour environ 1200 communes, à des échelles détaillées allant du 1/5 000 au 1/10 000. Ces PPR intègrent réglementairement un zonage et des prescriptions d'urbanisme, selon une méthode présentée dans le guide méthodologique du ministère en charge de l'écologie. Enfin, des dispositifs de surveillance sont installés depuis plusieurs années sur les grands sites instables. Les techniques de prévision utilisées s'appuient sur les relations entre les précipitations et le déplacement à très court terme, ou sur l'estimation de la date de rupture.

- Eckelmann W., Baritz R., Bialousz S., Bielek P., Carré F., Houšková B., Jones R.-J.-A., Kibblewhite M., Kozak J., Le Bas C., Tóth G., Tóth T., Várallyay G., Yli Halla M. et Zupan M. 2006. *Common criteria for risk area identification according to soil threats*. European Soil Bureau Research Report No.20, EUR 22185 EN, Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg. 94 p.
- Flageollet J.-C., 1988. *Les mouvements de terrain et leur prévention*. Masson, Paris, 224 p.
- MATE-METL, 1999. *Plans de Prévention des Risques Naturels (PPR) : Risque de Mouvements de Terrain. Guide Méthodologique*. Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement & Ministère de l'Équipement, des Transports et du Logement. La Documentation Française, Paris, 71 p.

Liens

- Base de données Mouvements de Terrain – BD-MvT, Bureau de Recherches Géologiques et Minières :
<http://www.bdmvt.net/>
- BeSafeNet – Protect Yourself from Hazards – Rubrique > Natural hazards > Landslides :
<http://www.besafenet.net/>
- Centre Européen sur les Risques Géomorphologiques :
<http://www.cerg.eu>
- Commission Européenne, Joint Research Centre, Groupe d'Expert Européen sur les Mouvements de Terrain :
<http://eusoils.jrc.ec.europa.eu/library/themes/LandSlides/wg.html>
- Glossaire des termes sur les mouvements de terrain, US Geological Survey :
<http://landslides.usgs.gov/learning/glossary.php>
- Institut National des Sciences de l'Univers, Observatoire Multidisciplinaire des Instabilités de Versants :
<http://eost.u-strasbg.fr/omiv>
- Portail de la Prévention des Risques Majeurs – Prim.Net, Section Mouvements de Terrain :
<http://www.risquesmajeurs.fr/le-risque-mouvements-de-terrain>

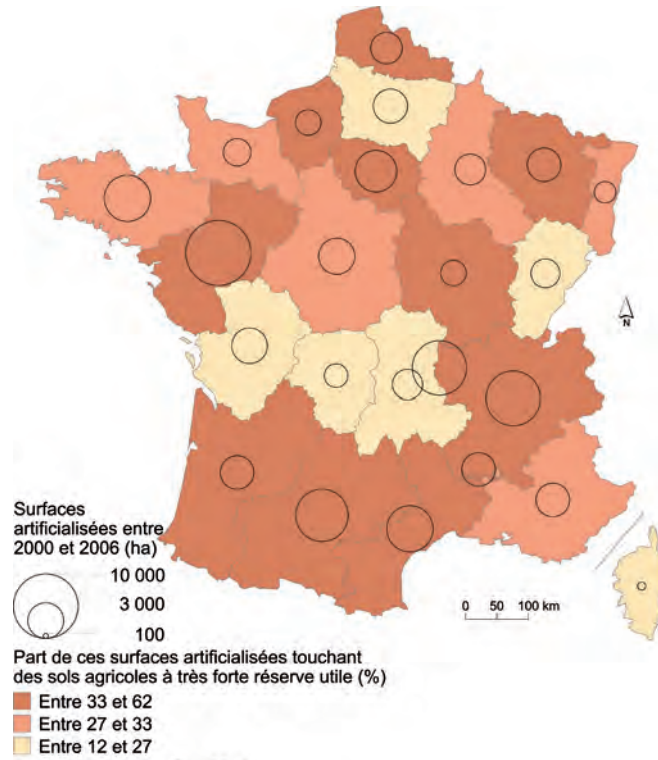
■ L'artificialisation et l'imperméabilisation des sols

Actuellement, trois quarts de la population française est urbaine. Depuis le milieu des années 1990, la périurbanisation et l'engouement pour la maison individuelle ont provoqué une dissociation entre les lieux de vie, de travail, de consommation et de loisirs. L'étalement urbain et la construction d'infrastructures de transport induisent ainsi une artificialisation des sols. Les incidences sur l'environnement sont nombreuses : la perte de ressources naturelles et agricoles, la fragmentation des habitats naturels et des corridors biologiques, l'intensification du ruissellement des eaux et l'altération de leur qualité, l'augmentation du risque d'inondation, etc. Tous les sols artificialisés ne sont pas imperméabilisés. L'imperméabilisation des sols correspond au recouvrement permanent du sol par un matériau imperméable. Elle altère la plupart des fonctions des sols de façon irréversible, en particulier celles qui concernent la régulation des flux hydriques.

Selon l'inventaire CORINE Land Cover de 2006, les espaces artificialisés (tissu urbain continu ou discontinu, zones industrielles ou commerciales, réseaux de communication) ne représentent que 5 % du territoire métropolitain, tandis que les terres agricoles occupent 60 % et les forêts et espaces semi-naturels 34 %. Les espaces artificialisés continuent cependant de s'étendre avec une augmentation de 3 % entre 2000 et 2006, soit environ 80 000 hectares, principalement au détriment des sols agricoles. La progression de l'artificialisation des sols est contrastée selon les régions. Les plus densément peuplées comme l'Alsace, l'Île-de-France, le Languedoc-Roussillon, le Nord, Provence-Alpes-Côte d'Azur et la vallée du Rhône sont soumises à une forte progression de l'artificialisation. Il en est de même autour des grandes agglomérations,

le long des infrastructures et près du littoral. Elle progresse de manière plus diffuse en Bretagne et dans les Pays de la Loire.

À l'échelon de la France métropolitaine, ce sont surtout des sols de très bonne qualité agronomique qui ont été artificialisés entre 2000 et 2006 : ils représentent plus d'un tiers des surfaces agricoles artificialisées au niveau national. C'est ce qui ressort de l'étude du classement des sols agricoles (à partir des données de CORINE Land Cover 2000), pour chaque région, en cinq classes de qualité agronomique en fonction des valeurs de leur réserve utile en eau. Quatre groupes de régions se distinguent. Pour près de la moitié d'entre elles (Aquitaine, Bourgogne, Haute-Normandie, Île-de-France, Languedoc-Roussillon, Lorraine, Midi-Pyrénées, Nord-Pas-de-Calais, Pays de la Loire, Rhône-Alpes), l'artificialisation touche en priorité les sols ayant les meilleures potentialités agronomiques (entre 33 et 62 % des surfaces agricoles régionales artificialisées entre 2000 et 2006). La répartition est plus homogène dans les autres régions. Ainsi, dans un deuxième groupe rassemblant l'Alsace, la Basse-Normandie, la Bretagne, Champagne-Ardenne, le Centre et Provence-Alpes-Côte d'Azur, l'artificialisation touche environ 30 % des sols agricoles de qualité agronomique très bonne et dans une moindre mesure les autres. En Auvergne, en Corse et en Franche-Comté, les sols de qualité agronomique intermédiaire sont les plus touchés par l'artificialisation (entre 25 et 55 % de la surface agricole régionale artificialisée entre 2000 et 2006). Enfin, en Limousin, en Picardie et en Poitou-Charentes, ce sont les sols de moindre qualité agronomique qui sont les plus concernés par l'artificialisation.



Source : SOeS-Gis Sol, 2010.

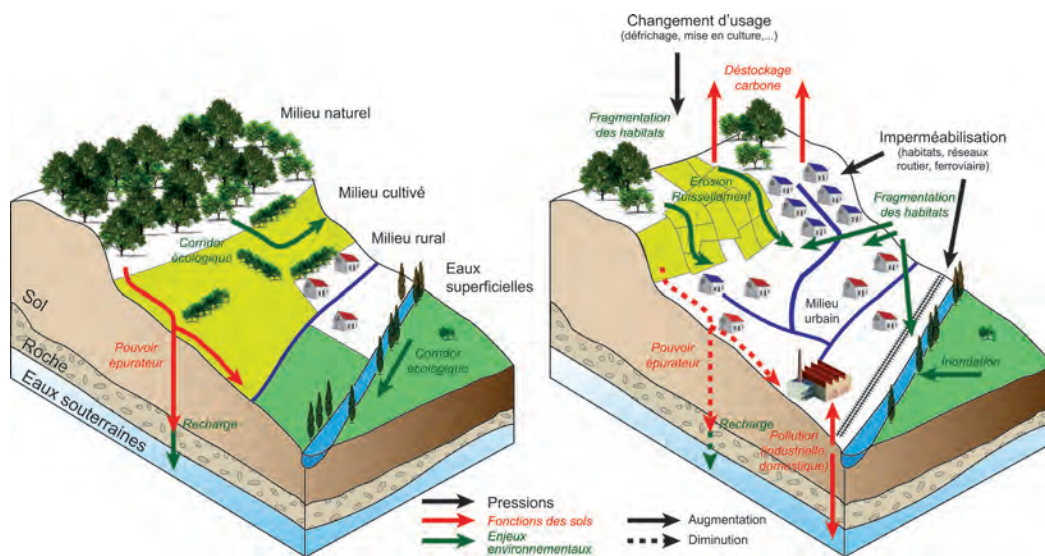
Traitements : SOeS, 2010.

1 Quels sont les impacts de l'imperméabilisation des sols sur l'environnement ?

encart

L'imperméabilisation de la surface du sol a de nombreuses conséquences sur l'environnement. En favorisant le ruissellement de l'eau le long des pentes au détriment de son infiltration, elle concentre les lames d'eau et perturbe souvent la circulation de l'eau dans les bassins versants. L'érosion des sols, l'occurrence des coulées d'eau boueuse et le risque d'inondation intensifient alors l'apport de sédiments vers les cours d'eau. Leur qualité peut s'altérer en raison d'un apport accru de contaminants contenus dans les sols (engrais azotés ou phosphatés, hydrocarbures, métaux lourds, produits phytosanitaires).

Les habitats, le cycle du carbone et de l'eau sont perturbés par l'artificialisation des sols



Source : Gis Sol, 2011.

▶▶▶ suite

1 Quels sont les impacts de l'imperméabilisation des sols sur l'environnement ?

▶▶▶ *suite* La perte de terrains naturels fragmente les habitats, les écosystèmes et les paysages, entraînant une perte de la biodiversité. La fragmentation des exploitations agricoles rend également difficile l'exploitation des parcelles. Ceci est d'autant plus perceptible en zone périurbaine où l'étalement urbain s'accroît. La construction de logements individuels de plus en plus éloignés des centres urbains est particulièrement consommatrice de sols cultivés. Le mitage des zones périurbaines est renforcé par la construction de réseaux de communication nécessaires aux trajets domicile-travail. L'aménagement et l'entretien des axes de transport nécessitent, par ailleurs, des matières premières extraites de carrières, exerçant une pression indirecte sur les sols.

2 Un exemple : quels sont les sols touchés par l'imperméabilisation autour de Chalon-sur-Saône ?

L'extension des zones artificialisées et les informations concernant la qualité des sols permettent d'y répondre. Les premières sont issues de l'occupation du sol de CORINE Land Cover (1990, 2000) et la qualité des sols est estimée *via* la réserve d'eau utile calculée à partir du Référentiel Régional Pédologique (RRP) au 1/250 000 de la Saône-et-Loire. La réserve utile en eau représente un des aspects de la qualité des sols et correspond à la quantité maximale d'eau stockée dans le sol et utilisable par les plantes. Un sol pourvu d'une réserve utile importante dispose de bonnes propriétés agronomiques.

Les zones urbanisées et les voies de communication sont situées dans la vallée de la Saône, épargnant les plateaux forestiers à l'ouest. L'implantation humaine s'est faite à proximité des zones de culture et des zones de transport par voie d'eau le long de la Saône. L'urbanisation s'étend dans ces zones de cultures sur les sols ayant les meilleures potentialités agronomiques au détriment de leur vocation agricole de départ.

En effet, il existe une forte concordance entre l'occupation du sol et sa réserve utile. À l'ouest de Chalon-sur-Saône, le vignoble de la côte chalonnaise s'est développé sur des pentes exposées à l'est, sur des sols calcaires peu profonds, à forte charge en éléments grossiers et à réserve utile faible. Les sols des hauts de versants sont difficiles à cultiver car peu stables, très humides en surface, avec des réserves utiles très faibles. Ils sont donc couverts de forêts ou exploités sous la forme de carrières. Aux pieds de la côte viticole vers Givry, sur les rebords des grands plateaux limoneux et forestiers et dans les plaines alluviales couvertes de prairies, les sols ont des réserves utiles plus élevées. À l'est de Chalon-sur-Saône, les habitations se développent le long des axes routiers reliant Louhans, Tournus et Dôle à Chalon-sur-Saône, sur les terrasses sableuses de la Saône. Elles sont caractérisées par des sols à faible réserve utile, mais dont la texture sableuse est favorable au maraîchage intensif. Enfin, la dépression bressane entaillée par la Saône est composée de grands plateaux limoneux, humides et forestiers, à réserve utile plus faible, disséqués par des vallons à plus forte réserve utile.

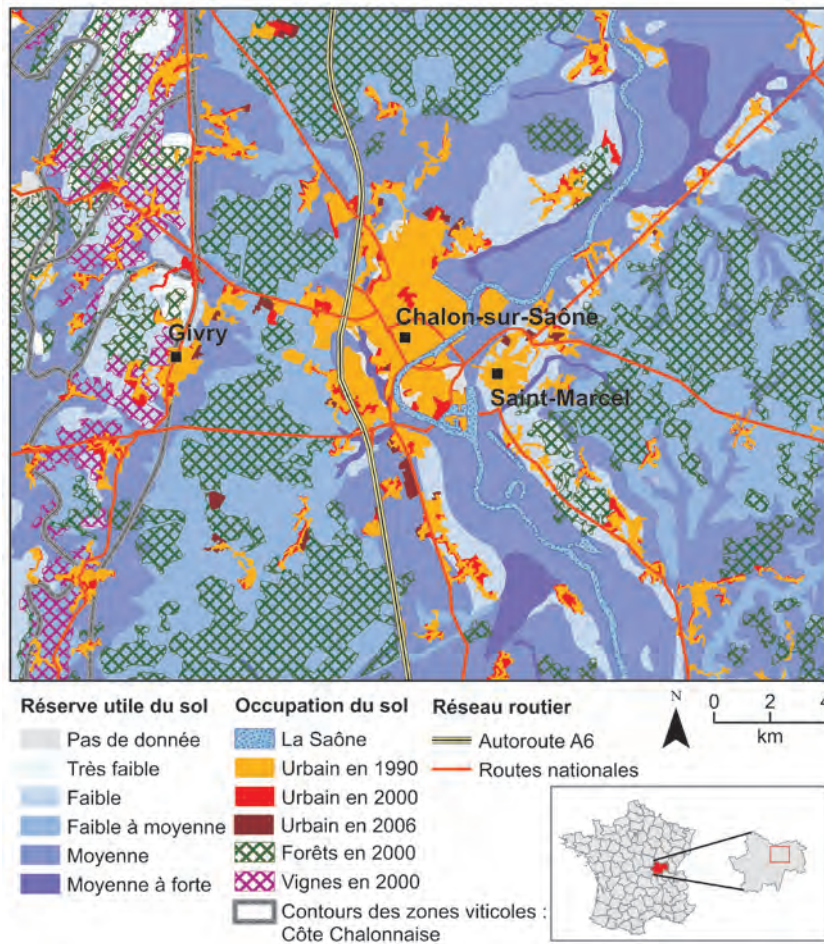
▶▶▶ *suite*

2 Un exemple : quels sont les sols touchés par l'imperméabilisation autour de Chalon-sur-Saône ?

encart (suite)

►►► *suite* In fine, les sols imperméabilisés entre 1990 et 2000 ont des réserves utiles en eau faibles au nord-est de Saint-Marcel et au sud de Chalon-sur-Saône. Par contre, les sols imperméabilisés au Nord et à l'Ouest sont de meilleure qualité avec des réserves utiles en eau faibles à moyennes ou moyennes. Le vignoble de la côte chalonnaise n'est pas touché par l'urbanisation, car le prix des terres est très élevé. Par contre, les sols de bonne qualité situés au pied de la côte prisée pour son paysage, sont soumis à une forte pression immobilière. Enfin, l'imperméabilisation des terrasses sableuses de la Saône risque de faire disparaître leur vocation maraîchère. La périurbanisation y est motivée par l'attrait des paysages et la facilité des trajets domicile-travail le long des axes de transport.

La réserve utile en eau des sols autour de Chalon-sur-Saône

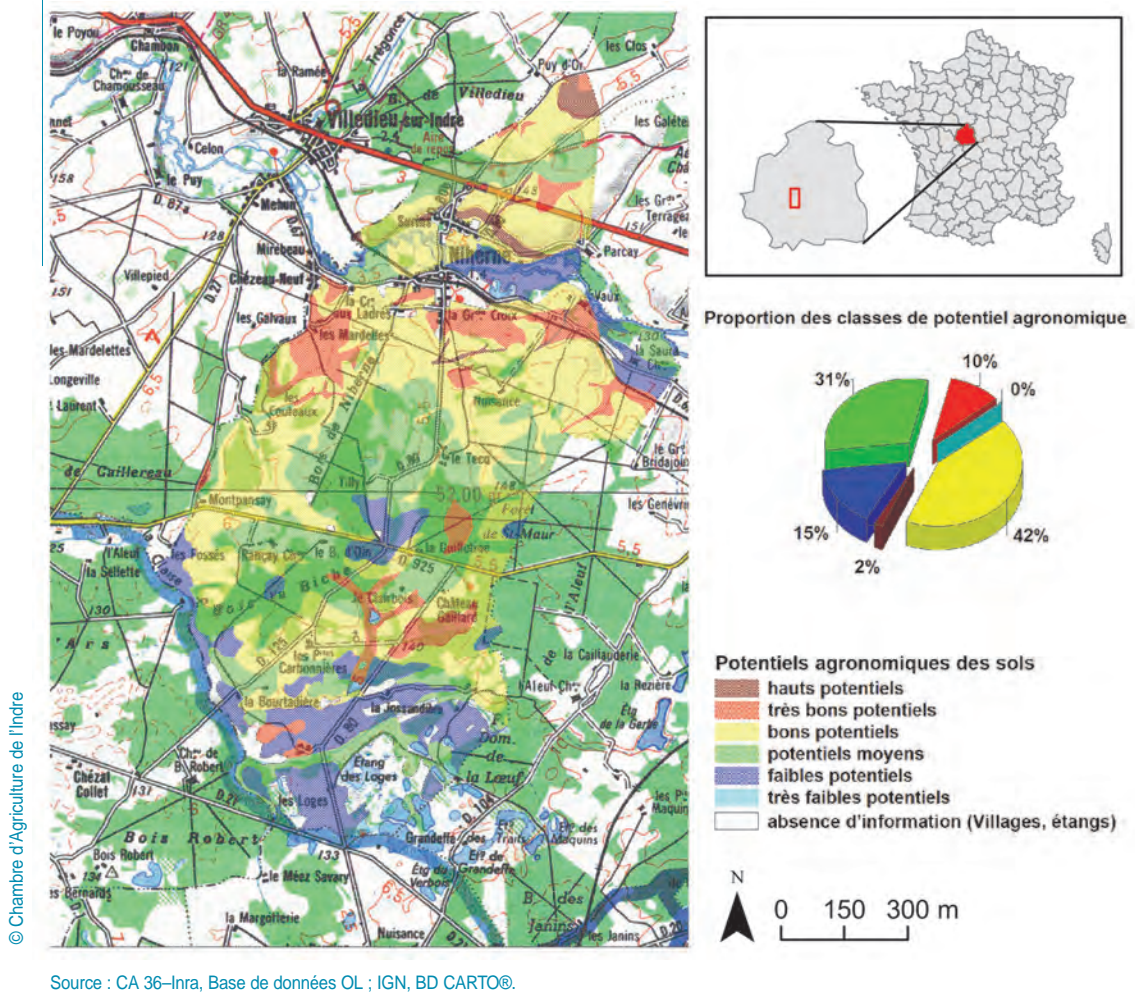


Source : Gis Sol, 2005 ; UE – SOeS, CORINE Land Cover 1990, 2000 et 2006 ; IGN, Route 500®, 2004.

3 Un exemple : comment préserver les sols agricoles de l'imperméabilisation dans l'Indre ?

Les organismes impliqués dans le programme d'Inventaire, gestion et conservation des sols (IGCS) du Groupement d'intérêt scientifique sur les sols (Gis Sol) peuvent fournir des informations sur les sols aux décideurs, comme les comités de pilotage des Plans locaux d'urbanisme (PLU), les services de l'État, ou les bureaux d'étude sollicités par l'État. Cependant, ceci n'est possible que lorsque les échelles des cartes de sols sont assez fines pour être compatibles avec celles des études d'aménagement. La Chambre d'agriculture de l'Indre a ainsi réalisé des outils d'aide à la décision pour son département à partir de la carte des sols et de la base de données associée au 1/50 000.

Un extrait de la carte du potentiel agronomique des sols de l'Indre



Les cartes des potentiels agronomiques des sols, établies sur la base des contraintes à la mise en valeur (pierrosité, excès d'eau, texture, réserve en eau utile) ont permis de gérer des conflits d'usage en zones périurbaines et en milieu rural lors de l'agrandissement de zones d'activités ou de la conduite de travaux d'aménagement d'infrastructures dans le cadre de PLU. L'implantation de lagunes et la délimitation et la préservation des zones humides ont aussi été facilitées par la cartographie des textures de surface, des réserves en eau, de la sensibilité à l'infiltration ou à la battance (formation d'une croûte superficielle favorisant l'érosion), etc.

Pour en savoir plus

- Cheverry C. et Gascuel C., 2009. *Sous les pavés, la terre : connaître et gérer les sols urbains*. Montreuil : Omniscience. 208 p. (coll. Écrin).
- Service de l'Observation et des Statistiques (SOeS), 2010. *L'environnement en France*. 138 p. (coll. les synthèses). Téléchargeable : <http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/publications/publication/154/1098/lenvironnement-france-edition-2010.html>
- 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.

Liens

- Commission européenne :
http://ec.europa.eu/environment/soil/index_en.htm
- Service de l'Observation et des Statistiques du Ministère en charge de l'Écologie :
<http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/> rubrique « Données en ligne » > « Environnement » > « CORINE Land Cover »
- Chambre d'agriculture de l'Indre :
<http://www.indre.chambagri.fr/> ; rubrique « La Chambre à votre service » > « Informations géographiques »

Les sols, la santé et les écosystèmes

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 et la chaîne alimentaire. Les écosystèmes terrestres et aquatiques peuvent subir des apports de contaminants en provenance des sols susceptibles de provoquer des écotoxicités et des transferts dans les chaînes trophiques. On observe des gradients de contamination modérée en éléments traces métalliques autour de certaines grandes agglomérations ou régions industrialisées et un effet notable des pratiques agronomiques comme celles expliquant les fortes teneurs en cuivre des vignobles et des vergers. Les contaminations très élevées sont généralement liées à la proximité de sources industrielles ou minières ou à des apports massifs très locaux. Certains polluants organiques persistants sont relativement ubiquistes dans les sols, alors que d'autres ne sont retrouvés que très ponctuellement. Les sols constituent de véritables réservoirs pour certaines espèces de bactéries pathogènes.



Traitement fongique sur orge d'hiver par rampe de pulvérisation autoportée. Vierzon (Cher).

Les éléments traces métalliques dans les sols de France

Les éléments traces métalliques (ETM) comme le cuivre, le plomb, le zinc, etc., sont présents dans les roches et dans les sols à des teneurs très faibles, d'où leur nom. La distribution des ETM résulte principalement de phénomènes naturels, comme la composition chimique initiale des roches-mères, puis leur altération pédogénétique due à l'action conjuguée des climats successifs et des activités biologiques et humaines, à l'érosion des sols, au colluvionnement par transport et dépôt des matériaux érodés le long ou au pied des pentes, à l'absorption et à la restitution par les végétaux, etc.

À l'échelle de la France métropolitaine, les principaux facteurs expliquant la distribution des éléments traces métalliques dans les sols sont d'abord la nature et la composition géochimique des roches-mères, puis les évolutions pédogénétiques se traduisant par des teneurs variables en argile et en fer.

Si certains de ces éléments sont nécessaires à la vie (oligo-éléments), ils peuvent tous devenir toxiques, notamment quand ils sont trop abondants mais surtout s'ils sont présents sous certaines formes chimiques.

Les teneurs en ETM dans les sols sont également influencées par des apports diffus d'origine humaine (industries, combustion d'énergies fossiles et incinérations, amendements, engrais et traitements phytosanitaires agricoles, transports) ou par des contaminations beaucoup plus locales à proximité d'installations provoquant des rejets polluants, ou suite à des apports massifs anciennement peu contrôlés. En ce qui concerne les apports volontaires ou involontaires d'ETM en agriculture (*via* les boues de stations d'épuration, les engrais, etc.), la diminution des flux d'apports passe par l'amélioration progressive et continue de la qualité des produits épandus.

Les ETM présentent des mobilités variables dépendant de leur nature, de leur origine et des caractéristiques physico-chimiques des sols. Généralement, seules les teneurs totales en ETM sont considérées, ce qui permet difficilement d'apprécier leur disponibilité, c'est-à-dire la possibilité d'être absorbé par une plante, ainsi que le risque de transfert vers les chaînes alimentaires ou vers la ressource en eau. Des approches basées sur des extractions chimiques plus douces permettent de mieux approcher ces quantités potentiellement mobiles vers les êtres vivants.

Les teneurs en onze éléments (arsenic, cadmium, chrome, cobalt, cuivre, mercure, molybdène, nickel,

plomb, thallium, zinc) ont été mesurées dans les horizons de surface de sols de France. Ces données proviennent principalement de la première campagne de mesures (2000-2010) du réseau de mesures de la qualité des sols (RMQS) mis en place par le Groupement d'intérêt scientifique sur le sol (Gis Sol). Le RMQS regroupe un réseau systématique de 2 200 sites d'observation en France, à raison d'un par maille carrée de 16 km de côté. Ces teneurs ont été mesurées par une extraction totale (acide fluorhydrique). Pour 6 de ces éléments (Cadmium, Chrome, Cuivre, Nickel, Plomb, Zinc), une extraction plus douce (par l'EDTA) a été réalisée également, afin de mieux rendre compte des formes les plus mobiles de ces éléments (transfert vers les eaux superficielles ou souterraines, biodisponibilité). Un certain nombre d'informations complémentaires ont été fournies par une autre base de données, la BD ETM, qui regroupe des résultats d'analyses de plus de 73 000 prélèvements, réalisés entre 1990 et 2009, préalablement à des épandages de boues de stations d'épurations. Ces mesures ont été réalisées soit en utilisant l'acide fluorhydrique (extraction totale), soit l'eau régale (extraction pseudo-totale). La Région Nord-Pas-de-Calais dispose également d'une base de données très riche (environ 260 points de mesures) couvrant une gamme beaucoup plus large de 18 éléments en traces.



Épandage d'engrais solides.

Statistiques des éléments traces mesurés dans le RMQS (mg.kg⁻¹)

	min	1 ^{er} décile	1 ^{er} quartile	médiane	moyenne	3 ^e quartile	9 ^e décile	max
Cd total	<SDD	0,07	0,12	0,20	0,30	0,34	0,62	5,53
Cd EDTA	<SDD	0,04	0,07	0,10	0,16	0,17	0,30	2,95
Cr total	<SDD	19,1	33,4	48,6	57,4	66,5	89,2	3030,0
Cr EDTA	<SDD	0,04	0,07	0,11	0,15	0,18	0,28	3,90
Co total	<SDD	2,9	5,5	9,0	10,6	13,6	18,7	112,0
Cu total	<SDD	5,1	8,7	13,9	20,4	22,3	35,7	508,0
Cu EDTA	0,1	0,6	1,2	2,3	5,3	4,1	8,3	322,0
Mo total	<SDD	0,3	0,4	0,6	0,8	0,9	1,5	19,8
Ni total	<SDD	5,9	11,2	19,4	26,2	31,3	46,1	1530,0
Ni EDTA	<SDD	0,2	0,4	0,7	1,3	1,4	2,4	99,2
Pb total	2,9	16,6	21,3	27,9	32,8	37,7	49,6	624,0
Pb EDTA	<SDD	2,6	3,7	5,6	7,5	8,5	13,1	165,5
Tl total	<SDD	0,27	0,40	0,55	0,68	0,79	1,2	16,80
Zn total	<SDD	27,5	43,1	63,6	74,7	90,2	127,0	1231,0
Zn EDTA	0,2	0,9	1,3	2,1	3,2	3,4	5,6	150,3

SDD : seuil de détection

Source : Gis Sol, RMQS, 2011.

Note : le premier décile sépare les 10 % inférieurs des données et le premier quartile les 25 % inférieurs des données.

Les distributions des éléments traces dans les sols sont toutes caractérisées par une forte asymétrie et par l'existence de quelques valeurs fortes anomaliques. Le pourcentage de mesures supérieures aux valeurs seuils réglementaires fixées pour l'épandage des boues de station d'épuration est en général assez

faible, à l'exception notable du nickel. Il est toujours plus élevé dans l'échantillonnage du RMQS que dans les données de la BDETM, ce qui s'explique par le fait que le RMQS s'adresse à une gamme de situations plus étendue, comprenant en particulier des sols urbains et périurbains.

Pourcentage de mesures supérieures aux valeurs seuils réglementaires fixées pour l'épandage des boues de station d'épuration

	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
Valeur seuil mg.kg ⁻¹	2	150	100	1	50	100	300
Pourcentage de valeurs excédentaires RMQS acide fluorhydrique	0,88	1,75	1,80	-	7,42	1,57	0,88
Pourcentage de valeurs excédentaires BDETM Eau régale	0,21	0,17	0,60	0,15	2,14	0,44	0,30
Pourcentage de valeurs excédentaires BDETM acide fluorhydrique	0,38	0,32	0,26	0,11	3,28	0,69	0,45

Sources : Gis Sol, RMQS et BD ETM, 2011.

L'arsenic (As) dans les sols de France

L'arsenic est apporté aux sols principalement par les effluents d'élevage, des retombées atmosphériques et des impuretés dans certains engrais. Il entrait dans la composition de certains traitements phytosanitaires aujourd'hui interdits.

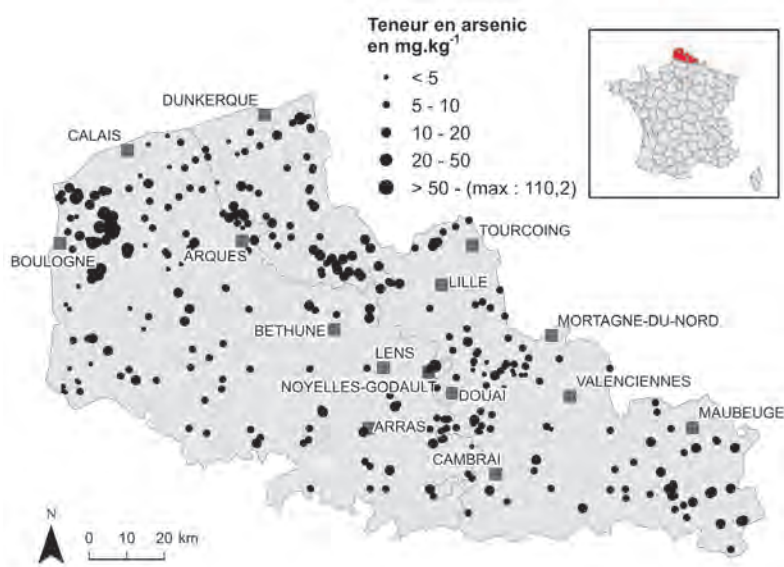
L'arsenic ne figure pas dans la liste des éléments à analyser dans le cadre des plans d'épandage de boues de stations d'épuration, ni dans les éléments analysés en routine dans le cadre du RMQS. C'est pourquoi les données relatives aux teneurs en arsenic dans les sols sont peu nombreuses et géographiquement localisées.

De nombreuses données sur les teneurs en arsenic ont été acquises par le BRGM dans le cadre de l'Inventaire Minier National (1975-1991). Cette prospection minière

a consisté en une analyse systématique de sédiments de ruisseaux et de sols dans les massifs hercyniens (Cévennes, Massif central, Massif armoricain, Morvan, Vosges et quelques secteurs des Pyrénées et des Alpes). Les anomalies naturelles (liées à des minéralisations sulfurées) y apparaissent très clairement. Certaines anomalies sont également observées dans les eaux souterraines.

Le Référentiel pédogéochimique du Nord-Pas-de-Calais apporte des informations supplémentaires. Les teneurs naturelles les plus courantes dans les sols agricoles se situent entre 1 et 25 mg.kg⁻¹. En région Nord-Pas-de-Calais, la médiane s'établit à 8,3 mg.kg⁻¹ (exprimée par rapport à la terre fine sèche) et 90 % des teneurs en arsenic sont inférieures à 15,1 mg.kg⁻¹.

Les teneurs en arsenic dans les horizons de surface des sols de la région Nord-Pas-de-Calais



Source : programme NICOSIA, Référentiel Pédogéochimique du Nord-Pas-de-Calais, 2006 ; Gis Sol, RMQS régional adapté, 2006 ; IGN, Geofla®, 2008.

Sur 19 valeurs anormales à l'échelle régionale (valeurs comprises entre 17,8 et 110 mg.kg⁻¹), 17 teneurs en arsenic se situent dans le Boulonnais. Ces valeurs sont

d'origine naturelle en rapport avec des roches-mères anormales en cet élément, notamment des calcaires et des formations marneuses.

Le cadmium (Cd) dans les sols de France

Le cadmium d'origine naturelle est présent dans les roches et dans les sols, mais en quantités généralement très faibles (plus de la moitié des valeurs mesurées dans le RMQS sont inférieures à $0,2 \text{ mg.kg}^{-1}$ et 95 % des valeurs sont inférieures à $0,9 \text{ mg.kg}^{-1}$). Les craies et les calcaires jurassiques montrent des teneurs naturelles élevées en cadmium (pouvant dépasser 2 mg.kg^{-1}). C'est pourquoi les sols crayeux et les sols argileux issus de la dissolution de ces calcaires montrent souvent des anomalies en cadmium.

Les principales sources de contamination en cadmium par voie atmosphérique sont les rejets miniers ou industriels (métallurgie non ferreuse, peintures, batteries, combustion d'énergies fossiles, etc.). Certaines pratiques agricoles peuvent apporter du cadmium localement sur les sols, *via* l'épandage de déchets organiques comme les boues de station d'épuration ou *via* les engrais phosphatés minéraux, qui peuvent être particulièrement riches en cadmium selon l'origine des roches dont ils sont extraits (phosphates naturels). En milieu acide, le cadmium d'origine anthropique est assez mobile et peut alors facilement migrer en profondeur ou être absorbé par les végétaux.

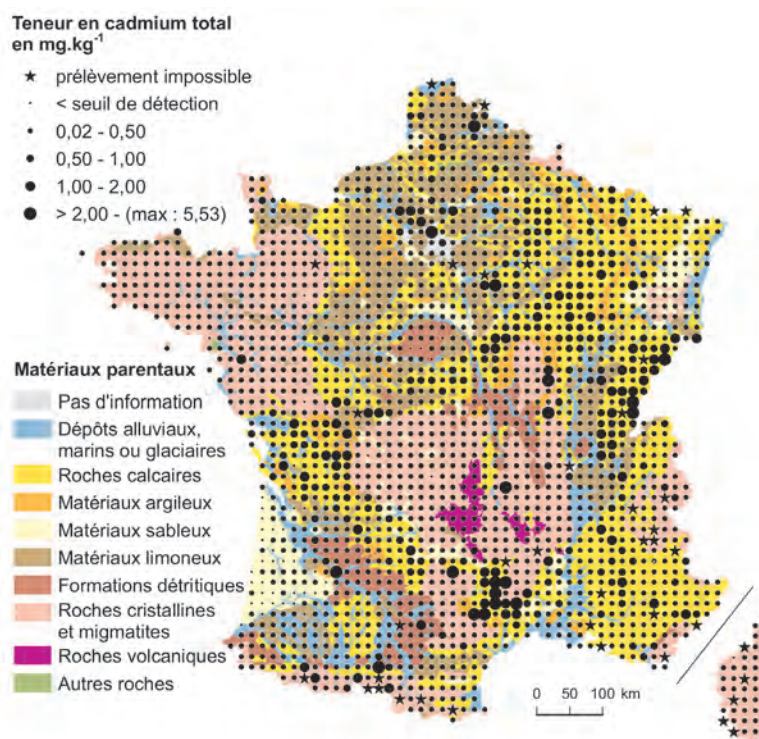
Les distributions des teneurs en cadmium en France sont semblables pour le cadmium total ou le cadmium extrait à l'EDTA (fraction considérée comme plus mobile).

Elles montrent des tendances régionales marquées, traduisant l'influence des roches-mères dans lesquelles les sols se sont développés et des processus d'altération et de pédogenèse. Les sols développés à partir de roches calcaires (Champagne, Charente, Jura, etc.) ont de fortes teneurs naturelles en cadmium. C'est particulièrement le cas dans le Jura où les sols argileux, souvent peu épais, résultent de l'altération lente d'une épaisseur considérable de calcaire, à l'origine d'une forte concentration de cadmium en surface. Dans les sols des Causses et du sud du Massif central, les teneurs sont également très fortes.

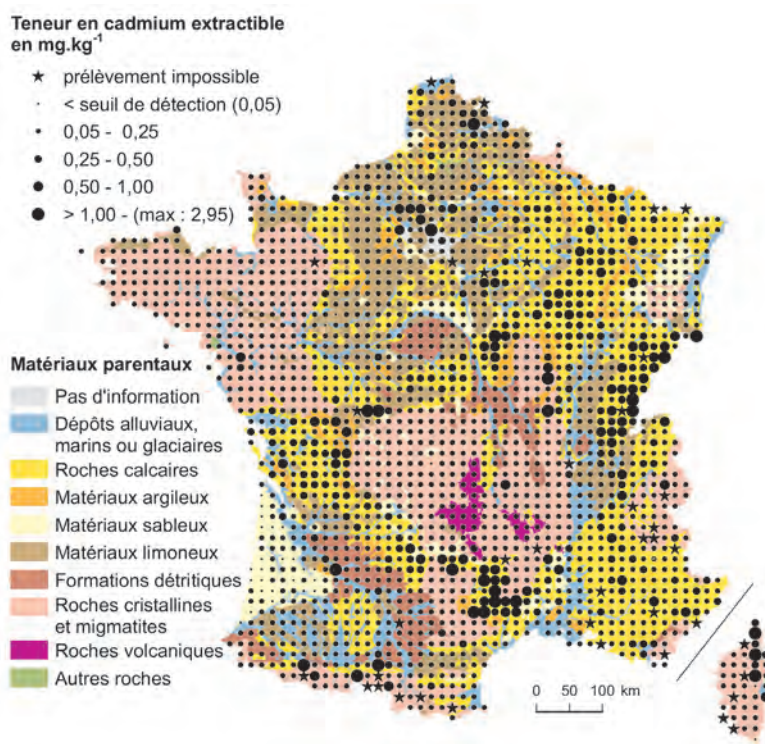
Des gradients de contamination diffuse sont visibles autour de grands secteurs miniers ou industriels, comme dans le Nord-Pas-de-Calais. Au nord-ouest de la région parisienne, les contaminations observées sont essentiellement liées à la proximité immédiate de sites industriels ou à d'anciens apports de boues de station d'épuration non contrôlées (boues de la station d'épuration d'Achères des années 1970-1980).

Les flux de cadmium entrants dans les sols agricoles sont en diminution depuis plusieurs décennies en raison de la baisse constante des apports en engrais phosphatés en agriculture.

Les teneurs en cadmium total des horizons de surface (0-30 cm) des sols de France



Source : Gis Sol, RMQS, 2011 ; Inra, BDGSF, 1998.



Source : Gis Sol, RMQS, 2011 ; Inra, BDGSF, 1998.

Le chrome (Cr) dans les sols de France

Le chrome d'origine naturelle est présent dans les roches et dans les sols en quantités assez faibles (la valeur médiane mesurée dans le RMQS est d'environ 49 mg.kg^{-1} et 95 % des valeurs sont inférieures à 104 mg.kg^{-1}).

Les apports de chrome aux sols peuvent provenir d'épandages de boues de stations d'épuration, d'effluents d'élevage ou d'impuretés contenues dans des engrais minéraux.

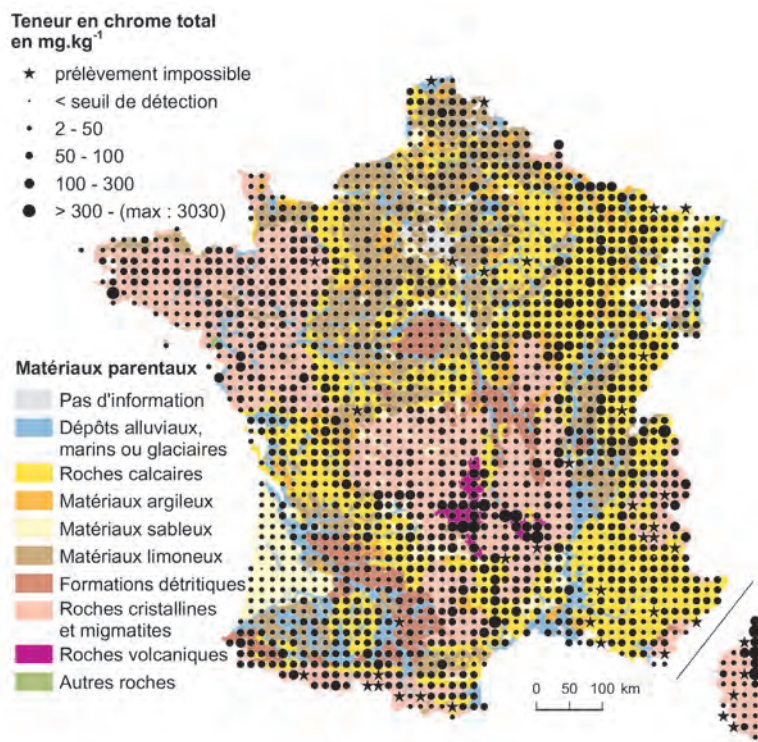
En règle générale, le chrome est stable et peut se fixer aux oxydes de fer, aux argiles ou aux matières organiques quand il est sous sa forme chrome (III). Néanmoins, le chrome (III) peut être oxydé en chrome (VI), beaucoup plus mobile et toxique. Sa mobilité est également dépendante du pH du sol.

La répartition des teneurs en chrome total montre une forte influence des roches-mères dont les sols sont issus. Les sols développés dans certaines roches magmatiques basiques (basaltes) ou ultrabasiques montrent des

teneurs naturellement beaucoup plus élevées en chrome. Il en va de même des sols développés dans les moraines et les flyschs alpins. Les roches liasiques (calcaire argileux, marne et argile du jurassique inférieur) donnent également naissance à des sols riches en chrome.

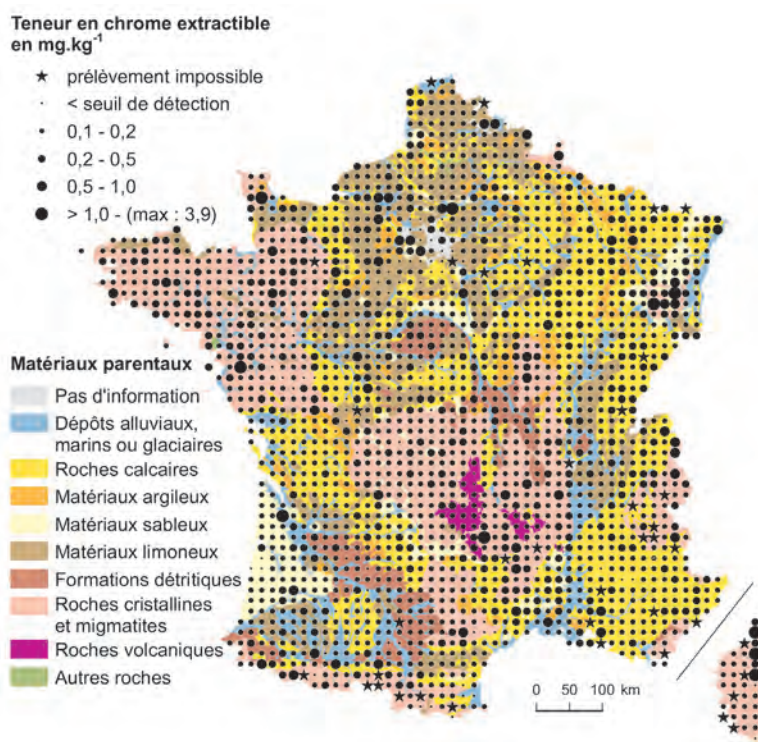
Le chrome extractible par l'EDTA peut être considéré comme un marqueur des formes les plus mobiles du chrome, plus disponibles pour les plantes et susceptibles de migrer vers la ressource en eau. Les teneurs les plus élevées en chrome extractible (entre 2 et 4 mg.kg^{-1}) sont localisées dans les roches cristallines des Vosges et dans les schistes du nord-est de la Corse, tandis que les autres teneurs élevées sont réparties çà et là sur l'ensemble de la France. Des contaminations importantes en chrome peuvent être observées localement à proximité de certains sites industriels, notamment des anciennes tanneries. Quelques teneurs relativement fortes et groupées (à l'ouest de la région parisienne, en vallée de la Seine) sont vraisemblablement d'origine anthropique.

Les teneurs en chrome total des horizons de surface (0-30 cm) des sols de France



Source : Gis Sol, RMQS, 2011 ; Inra, BDGSF, 1998.

Les teneurs en chrome extractible à l'EDTA des horizons de surface (0-30 cm) des sols de France



Source : Gis Sol, RMQS, 2011 ; Inra, BDGSF, 1998.

Le cobalt (Co) dans les sols de France

Le cobalt d'origine naturelle existe dans les roches et les sols. Les teneurs en cobalt dans les sols sont en général assez faibles (la valeur médiane mesurée dans le RMQS est d'environ 9 mg.kg^{-1} et 95 % des valeurs sont inférieures à 24 mg.kg^{-1}). Les concentrations sont fortes dans certaines roches ultrabasiques (pouvant dépasser 50 mg.kg^{-1} en sol développé à partir d'une roche volcanique) et plus faibles dans les autres roches.

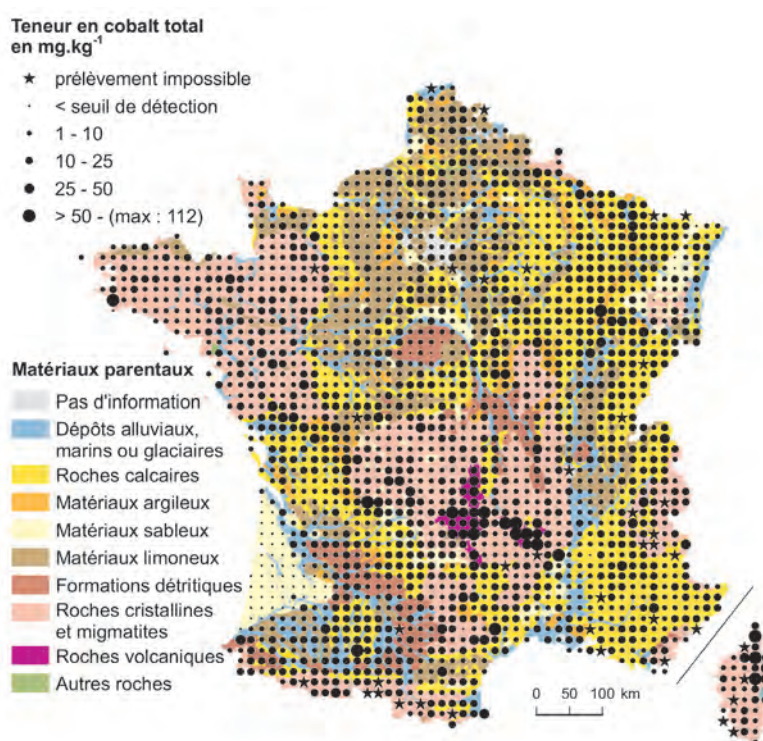
Le cobalt peut devenir mobile dans les sols acides (pH faible).

Les teneurs en cobalt total dans les sols dépendent essentiellement des teneurs de la roche-mère dans laquelle ils se sont développés. Les sols des massifs volcaniques (chaîne des Puys) et, dans une moindre

mesure, les sols des roches cristallines, sont particulièrement riches en cobalt. On peut aussi trouver de fortes concentrations dans les roches liasiques (calcaire argileux, marne et argile du jurassique inférieur et au contact du socle du Massif central et du Poitou). Les teneurs en cobalt sont presque toujours inférieures au seuil de détection dans les sols sableux des Landes de Gascogne.

Si elles existent, les contaminations des sols en cobalt d'origine anthropique sont très faibles et donc difficilement détectables à l'échelle nationale à partir du Réseau de Mesures de la Qualité des Sols (RMQS). Il n'a pas été possible d'identifier d'anomalie manifestement anthropique. Certaines anomalies ponctuelles sont liées à la présence de roches particulières (par exemple, des serpentines à la pointe sud-ouest de la Bretagne).

Les teneurs en cobalt des horizons de surface (0-30 cm) des sols de France



Source : Gis Sol, RMQS, 2011 ; Inra, BDGSF, 1998.

Le cuivre (Cu) dans les sols de France

Le cuivre est présent naturellement dans les roches et les sols mais en quantités faibles (la valeur médiane mesurée dans le RMQS est d'environ 14 mg.kg^{-1} et 95 % des valeurs sont inférieures à 54 mg.kg^{-1}). Les sols formés dans des roches magmatiques basiques riches en minéraux ferromagnésiens contiennent de grandes quantités de cuivre. Les roches granitiques sont également riches en cuivre, surtout lorsqu'elles ont subi une minéralisation additionnelle.

Les teneurs en cuivre peuvent aussi dépendre d'une contamination d'origine humaine. Certaines pratiques comme le traitement des vignes et des vergers à la « bouillie bordelaise » ou l'épandage de lisier de porcs peuvent être considérées comme des sources de contamination, tout comme les activités métallurgiques ou les épandages de boues de stations d'épuration. Dans ces deux derniers cas, il s'agit de sources très localisées. En sol viticole, le cuivre a pu s'accumuler de longue date et présenter des teneurs très élevées (parfois plusieurs centaines de mg.kg^{-1}). Le cuivre est un élément stable dans les sols sauf en milieu acide (pH faible).

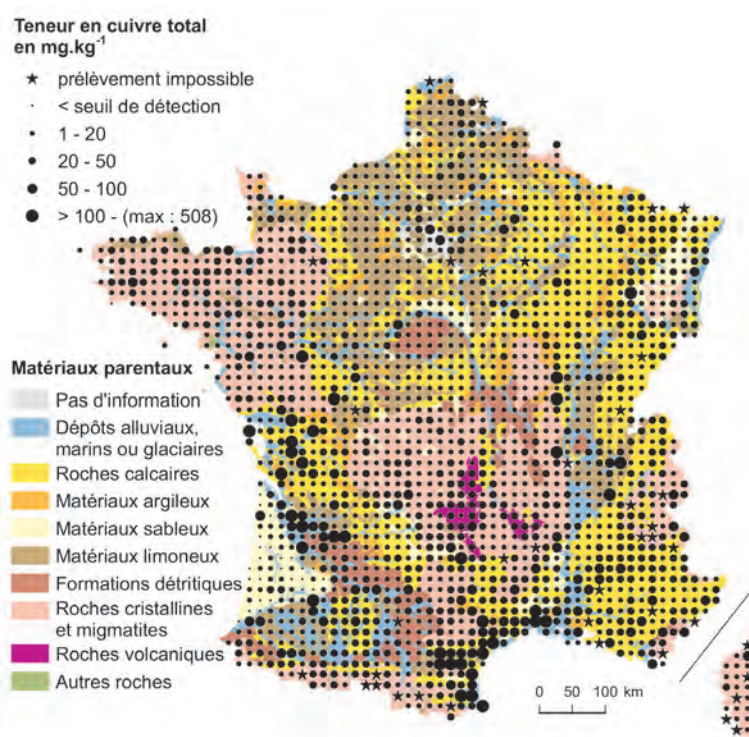
Les teneurs en cuivre total naturel des sols dépendent essentiellement des roches-mères dans lesquelles ils se sont formés. Dans les massifs volcaniques de la chaîne

des Puys et plus généralement dans les massifs hercyniens, les sols sont naturellement plus riches en cuivre.

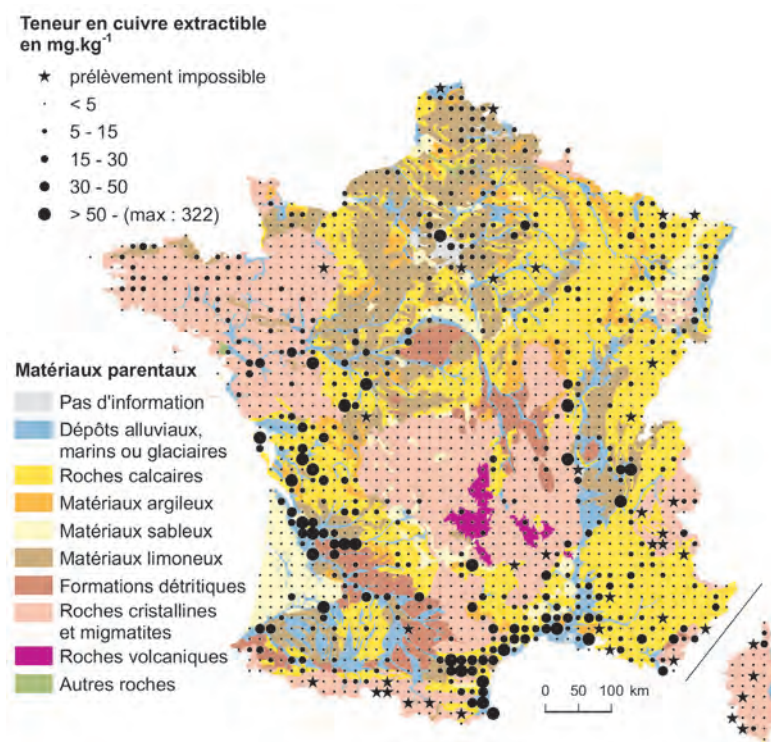
Le cuivre extrait à l'EDTA (qui représente une forme plus mobile que le cuivre total) est un très bon marqueur d'une contamination d'origine humaine. On observe ainsi des gradients très marqués de contamination diffuse, notamment autour des lieux fortement urbanisés, industrialisés et à forte densité de population (Île-de-France, Nord-Pas-de-Calais). Certaines régions viticoles comme le Bordelais présentent de très fortes teneurs, tout comme l'ouest du bassin méditerranéen (Languedoc-Roussillon) qui compte aussi beaucoup d'arbres fruitiers et de vignobles. On note également des contaminations dans les vignobles du Val de Loire ainsi que le long des vallées de la Saône et du Rhône. Compte tenu de la taille de la maille du RMQS, certaines régions viticoles trop petites ou de forme trop linéaire échappent à cette cartographie. L'épandage des lisiers est aussi à l'origine d'une contamination diffuse des sols en cuivre, notamment en Bretagne.

En ce qui concerne les lisiers de porcs (une source spécifique importante d'apports de cuivre vers les sols), des études sont en cours pour limiter voire supprimer l'adjonction de cuivre dans l'alimentation des porcelets.

Les teneurs en cuivre total des horizons de surface (0-30 cm) des sols de France



Source : Gis Sol, RMQS, 2011 ; Inra, BDGSF, 1998.



Source : Gis Sol, RMQS, 2011 ; Inra, BDGSF, 1998.

Le mercure (Hg) dans les sols de France

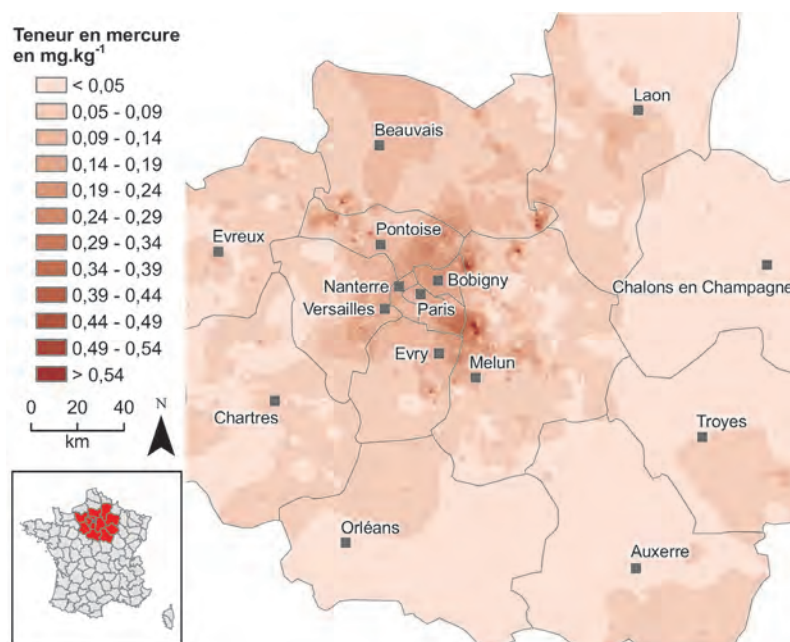
Le mercure d'origine naturelle est présent dans les roches et dans les sols, mais en quantités extrêmement faibles. En effet, plus de la moitié des valeurs observées dans le cadre de la BD ETM sont inférieures à $0,05 \text{ mg.kg}^{-1}$ et 90 % des valeurs sont inférieures à $0,11 \text{ mg.kg}^{-1}$ (valeur qui dénote déjà un certain degré de contamination).

C'est le seul métal susceptible de se volatiliser à température ambiante. C'est pourquoi il a tendance à se redistribuer spontanément dans l'environnement.

Les sols peuvent avoir été contaminés par le mercure de façon directe mais localisée par des retombées

atmosphériques autour de certaines installations industrielles ou, de manière plus diffuse, via l'épandage incontrôlé de boues d'épuration (dans les années 1970 et 1980) ou de « gadoues » (dans les années 1950 et 1960). Une autre source à l'échelle nationale est constituée par les effluents d'élevage du fait des quantités importantes épandues.

Le mercure peut former par l'action des micro-organismes des composés dangereux pour l'Homme en se combinant à certains composés organiques (méthyl-mercure assimilable par les êtres vivants).



Source : Ademe-INRA, BD-ETM, 2001; IGN, Geofla®, 2008.

On peut être surpris par les très faibles teneurs en mercure mesurées dans les sols agricoles, même dans ceux situés non loin de Paris (le plus souvent 0,04 à 0,06 mg/kg). Toutes les valeurs supérieures à 0,10 mg/kg correspondent déjà à de faibles contaminations (retombées atmosphériques ou épandages de boues d'épuration des années 1970-1980).

À noter l'indépendance des teneurs mesurées par rapport à la géologie et à la pédologie.

Enfin, on décèle des anomalies anthropiques notables (valeurs supérieures à 0,30 mg/kg), localisées dans quelques secteurs comme en Seine-et-Marne occidentale, lesquelles semblent liées à des apports de « gadoues » urbaines dans les années 1960.

Le molybdène (Mo) dans les sols de France

Les quantités de molybdène présentes dans les sols sont très faibles (la valeur médiane mesurée dans le RMQS est d'environ $0,6 \text{ mg.kg}^{-1}$ et 95 % des valeurs sont inférieures à $2,1 \text{ mg.kg}^{-1}$). Ce sont les sols développés dans les roches volcaniques ainsi que sur certains matériaux calcaires qui sont les plus riches en molybdène.

Les concentrations plus élevées en molybdène peuvent aussi avoir une origine humaine (épandages de lisiers ou d'autres déjections animales). Les activités industrielles émettent également du molybdène. Il s'agit essentiellement des industries métallurgique et pétrolière.

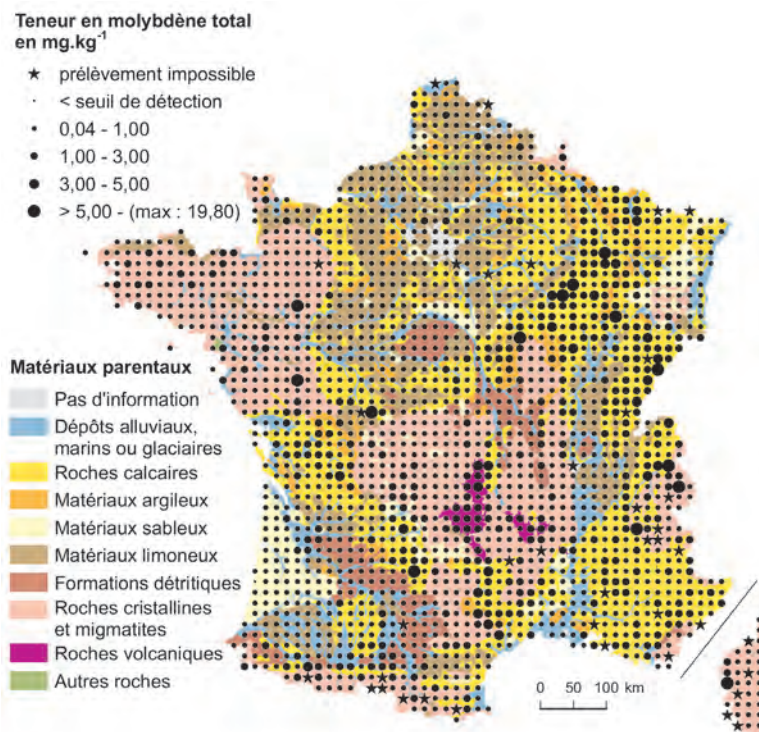
Contrairement à beaucoup d'éléments traces, une augmentation du pH du sol augmente la mobilité et la biodisponibilité du molybdène, ainsi que les risques de transfert éventuel vers les eaux souterraines.

La répartition du molybdène dans les sols montre une dépendance aux roches-mères à l'origine de la formation des sols. Les sols issus des massifs volcaniques montrent des concentrations naturelles en molybdène

élevées comme dans la chaîne des Puys (pouvant atteindre plus de 2 mg.kg^{-1}). Dans une moindre mesure, certains sols issus de roches cristallines montrent aussi des concentrations élevées en molybdène. Les sols formés sur une roche-mère datant du jurassique ont aussi des concentrations sensiblement plus élevées en molybdène. On note aussi que les sols argileux de Lorraine présentent des concentrations élevées alors que ces dernières sont très faibles dans les sols des Landes de Gascogne et de Champagne crayeuse.

Les contaminations d'origine humaine en molybdène peuvent être diffuses, notamment lorsqu'elles sont liées à l'épandage de produits phytosanitaires ou de lisiers. Des contaminations plus importantes peuvent être induites par des activités industrielles. Dans ce cas, la contamination est généralement très locale et à proximité immédiate du site. Deux valeurs anormales locales apparaissent nettement dans le centre-ouest de la France. L'une est liée à une roche-mère particulière (schiste noir), l'autre est probablement liée à des épandages réguliers d'effluents d'abattoirs.

Les teneurs en molybdène des horizons de surface (0-30 cm) des sols de France



Source : Gis Sol, RMQS, 2011 ; Inra, BDGSF, 1998.

Le nickel (Ni) dans les sols de France

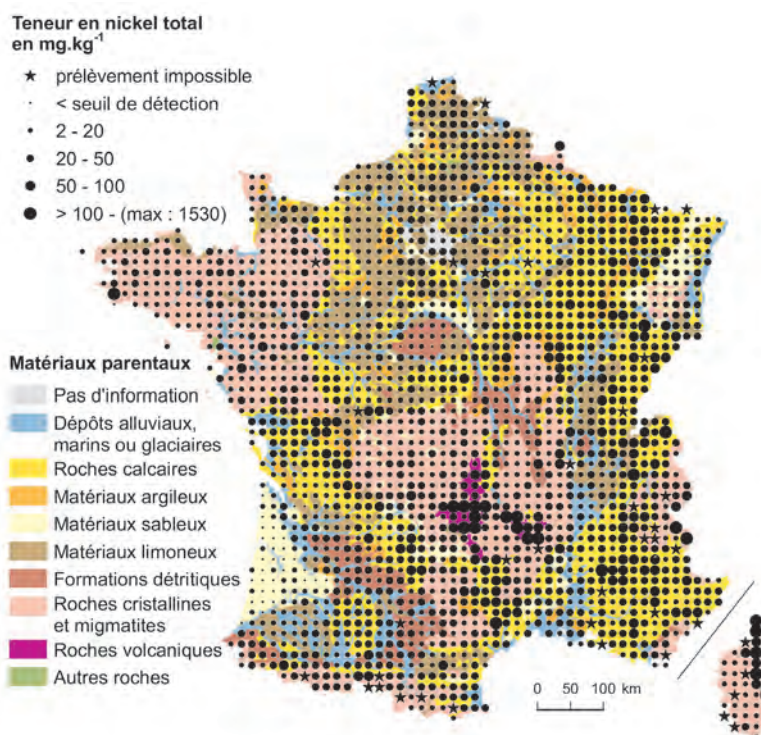
Le nickel se trouve naturellement dans les roches et dans les sols en quantités relativement faibles (la valeur médiane mesurée dans le RMQS est d'environ 20 mg.kg^{-1} et 95 % des valeurs sont inférieures à 57 mg.kg^{-1}). De grandes quantités de nickel sont observées dans les roches contenant des minéraux ferromagnésiens où il se substitue partiellement au fer ou au magnésium. C'est pourquoi il est abondant dans les roches magmatiques basiques ou ultrabasiques (en particulier les basaltes du Massif central). Les sols qui s'y développent ont des teneurs naturellement plus élevées en nickel.

Le nickel extractible à l'EDTA représente des formes plus mobiles, dont les valeurs dépassent très rarement 10 mg.kg^{-1} . Une diminution de pH peut augmenter la mobilité et la biodisponibilité du nickel dans les sols et favoriser ainsi son transfert vers la ressource en eau ou les plantes.

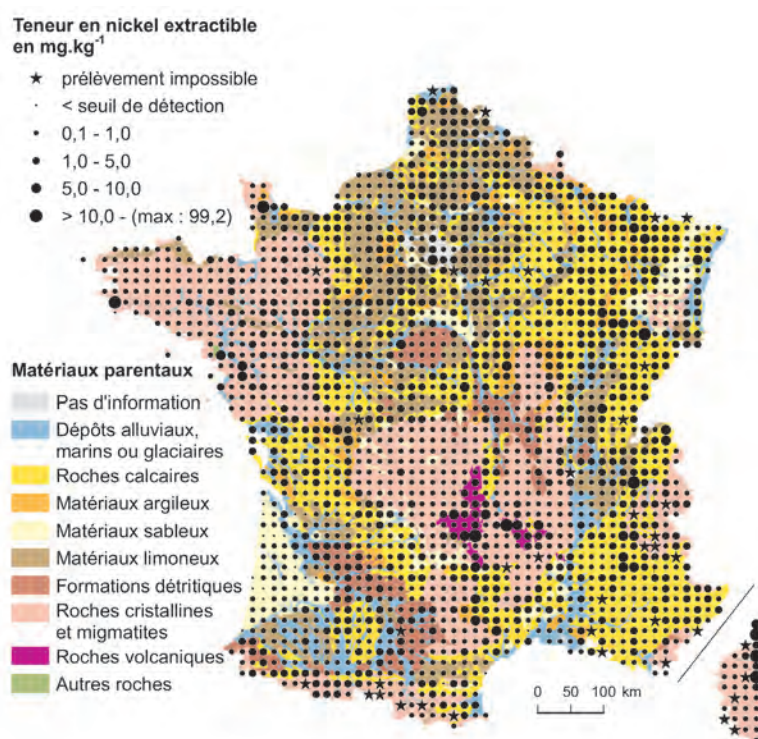
La répartition des teneurs en nickel montre une forte influence de la roche-mère dans laquelle le sol s'est formé. Les sols issus des roches basaltiques présentent des teneurs naturelles très fortes en nickel. C'est le cas dans la chaîne des Puys. Les roches datant du jurassique sont également à l'origine de sols particulièrement riches en nickel (Jura, Charente).

Si elles existent, les contaminations en nickel d'origine humaine sont de niveau faible et très localisées et ne sont donc pas détectables à l'échelle nationale à partir des données en nickel total du réseau de mesures de la qualité des sols (RMQS). En revanche, la carte du nickel extractible à l'EDTA montre des zones où plusieurs teneurs assez fortes sont groupées, sans que la nature des roches-mères ne permette de l'expliquer (dans le Nord, autour de Paris, en Basse-Normandie) : il s'agit donc probablement de contaminations.

Les teneurs en nickel total des horizons de surface (0-30 cm) des sols de France



Source : Gis Sol, RMQS, 2011 ; Inra, BDGSF, 1998.



Source : Gis Sol, RMQS, 2011 ; Inra, BDGSF, 1998.

Le nickel est l'élément trace qui montre le plus fort pourcentage de dépassement du seuil en vigueur pour l'épandage des boues de station d'épuration. La quasi-totalité de ces dépassements correspond à des teneurs d'origine naturelle.

Le plomb (Pb) dans les sols de France

Le plomb, naturellement présent dans les sols, se trouve en quantités généralement faibles (la valeur médiane mesurée dans le RMQS est d'environ 28 mg.kg⁻¹ et 95 % des valeurs sont inférieures à 50 mg.kg⁻¹). Certaines roches, en particulier les roches cristallines, possèdent des teneurs naturelles élevées en plomb.

Les principales sources de contamination en plomb par voie atmosphérique résultent des rejets miniers ou industriels (métallurgie non ferreuse, anciennes fabriques de peintures, recyclage de batteries, combustion d'énergies fossiles) et du transport (lié à l'utilisation passée de plomb tétra-éthyle comme antidétonant dans l'essence). Le plomb peut également être apporté plus localement sur les sols, *via* l'épandage de déchets (boues de stations d'épuration) ou de déjections animales (fumiers, lisiers), ou historiquement *via* l'application de certains traitements phytosanitaires aujourd'hui interdits. Généralement très peu mobile, le plomb est fortement fixé par les matières organiques et les oxydes de fer et de manganèse. Par contre, les milieux très acides (pH du sol très faible) favorisent sa mobilité et sa migration en profondeur ou vers les végétaux (cas des PODZOSOLS).

La distribution des teneurs en plomb total en France montre des tendances régionales marquées, traduisant

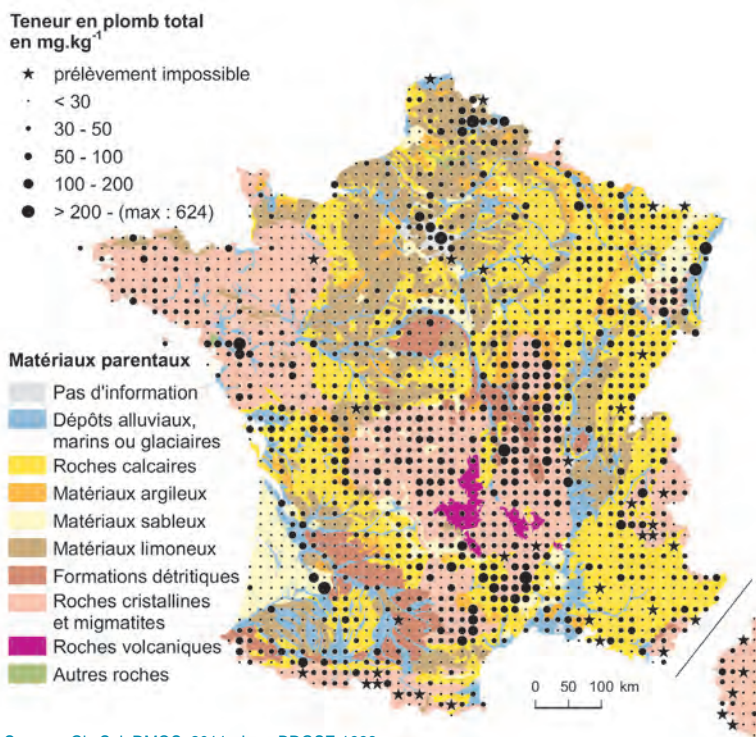
l'influence de la roche-mère et des processus de minéralisation de certaines roches sédimentaires situées au contact immédiat des grands massifs hercyniens comme le Massif central ou les Vosges. Ces teneurs naturelles élevées des roches sont transmises aux sols. La distribution des fortes teneurs en plomb est donc étroitement liée à la présence de roches cristallines ou à des sols résiduels anciens développés dans des roches fortement minéralisées par des processus géologiques à long terme. Les accumulations relatives de plomb dans les sols en aval des grands fleuves (delta du Rhône, estuaires de la Garonne et de la Loire) pourraient être liées à des apports alluviaux de provenance lointaine et à des tris sélectifs lors de leur transport et de leur sédimentation.

Le plomb extrait à l'EDTA représente une fraction plus mobile du plomb dans les sols et qui traduit mieux l'influence des contaminations d'origine humaine. Des gradients de contamination diffuse sont nettement visibles autour de grands secteurs miniers, industriels ou de forte densité de population (Île-de-France, Nord-Pas-de-Calais). Ces contaminations sont probablement en grande partie imputables à la circulation automobile passée et à l'utilisation d'essence plombée (avant 1990). Des contaminations beaucoup plus

importantes ont été observées très localement, résultant d'épandages d'eaux usées à proximité immédiate de sites industriels, ou d'anciens apports de boues de station d'épuration non contrôlées (Achères dans les Yvelines, années 1970-1980). Les sols urbains (Paris, Strasbourg)

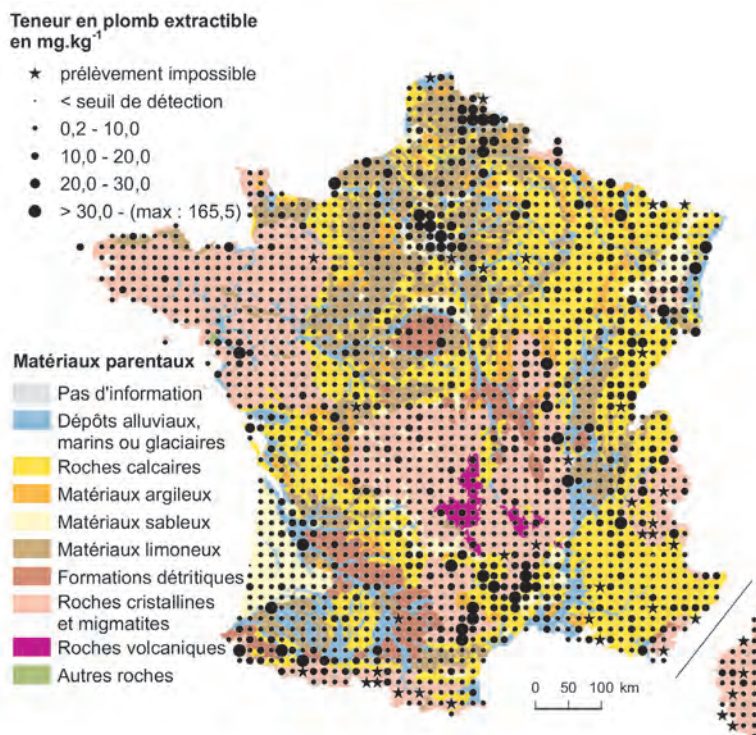
présentent également des teneurs en plomb particulièrement élevées. Enfin, il est possible que les fortes teneurs en plomb dans le Bordelais soient dues à l'utilisation passée d'arséniates de plomb pour le traitement de la vigne.

Les teneurs en plomb total des horizons de surface (0-30 cm) des sols de France



Source : Gis Sol, RMQS, 2011 ; Inra, BDGSF, 1998.

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



Source : Gis Sol, RMQS, 2011 ; Inra, BDGSF, 1998.

Le thallium (Tl) dans les sols de France

Le thallium d'origine naturelle est présent en quantités très faibles dans les sols (la valeur médiane mesurée dans le RMQS est d'environ $0,55 \text{ mg.kg}^{-1}$ et 95 % des valeurs sont inférieures à $1,6 \text{ mg.kg}^{-1}$). Cet élément est peu présent dans les roches, hormis en tant qu'impureté dans certaines roches hercyniennes riches en sulfures, telles que la galène (sulfure de plomb) ou la sphalérite (sulfure de zinc). On le trouve aussi en concentrations plus faibles dans les roches cristallines contenant des minéraux potassiques (feldspaths, micas).

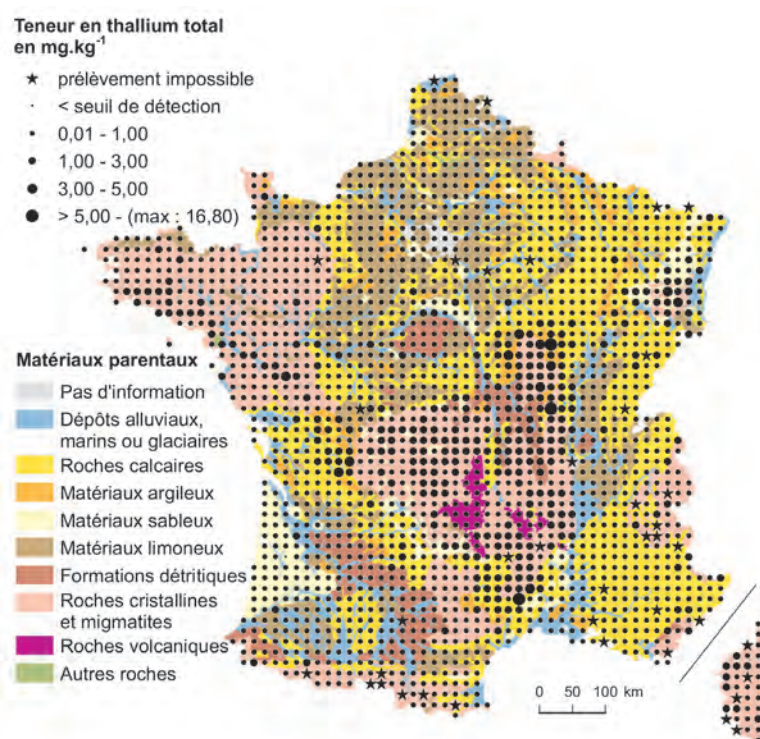
Si les activités industrielles (briqueteries, cimenteries, métallurgie) sont les principales sources de dispersion du thallium par voie aérienne citées par la littérature, la circulation automobile y contribuerait également. Le thallium est considéré comme relativement mobile dans

les sols. Toutefois, sa mobilité augmente avec la diminution du pH du sol.

Les teneurs les plus élevées en thallium total sont localisées sur les sols issus de roches cristallines avec des teneurs fortes dans le Massif central, le Morvan et les Vosges, et des teneurs moindres dans le Massif armoricain, les Alpes et les Pyrénées.

Les quantités de thallium d'origine humaine émises sont faibles, notamment lorsqu'elles proviennent d'épandages agricoles. Dans le cas de contaminations ponctuelles avérées, leur origine serait principalement industrielle et elles resteraient à proximité immédiate de leur source d'émission. Les cartographies issues du maillage du RMQS ne permettent pas de mettre en évidence des contaminations d'origine anthropique en thallium.

Les teneurs en thallium des horizons de surface (0-30 cm) des sols de France



Source : Gis Sol, RMQS, 2011 ; Inra, BDGSF, 1998.

Le zinc (Zn) dans les sols de France

Les quantités de zinc d'origine naturelle existant dans les sols sont faibles, bien qu'elles soient en moyenne les plus élevées de la gamme des ETM analysés dans le cadre du RMQS (la valeur médiane mesurée dans le RMQS est d'environ 64 mg.kg⁻¹ et 95 % des valeurs sont inférieures à 155 mg.kg⁻¹). Le zinc est présent dans les roches et plus particulièrement dans celles d'origine magmatique ou volcanique, ainsi que dans les secteurs présentant des minéralisations hydrothermales.

Les contaminations d'origine humaine en zinc proviennent de sources industrielles, comme les industries métallurgiques. Les épandages agricoles, notamment le lisier de porcs, peuvent être une source non négligeable d'apport en zinc dans les sols. Les activités des zones urbaines (*via*, localement, les boues de stations d'épuration) sont aussi source de zinc, les toitures et gouttières, l'usure des pneumatiques ou les poussières d'incinération pouvant également contaminer les sols. Le zinc peut être considéré comme relativement mobile dans les sols. De ce fait, le zinc total n'est pas forcément un bon marqueur de contamination d'origine humaine historique. Sa mobilité dépend essentiellement du pH.

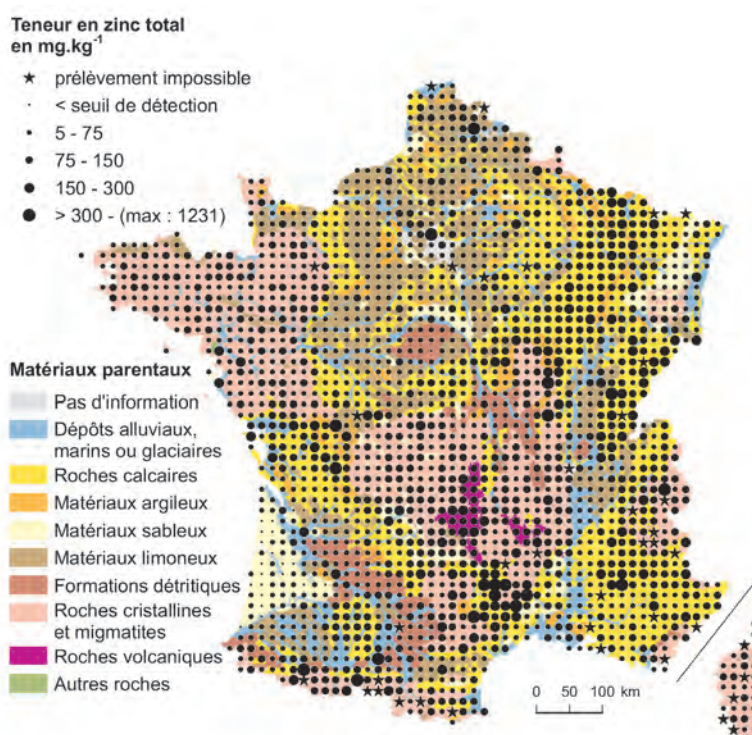
De fortes teneurs naturelles en zinc sont observées dans les sols développés dans des roches cristallines

(Massif central). Les roches jurassiques, notamment liasiques (calcaires argileux, marnes et argiles du jurassique inférieur), sont aussi à l'origine de fortes concentrations en zinc (voir par exemple dans le nord-est de la France, le Jura, les Causses du sud du Massif central). On observe également de fortes teneurs en milieu volcanique.

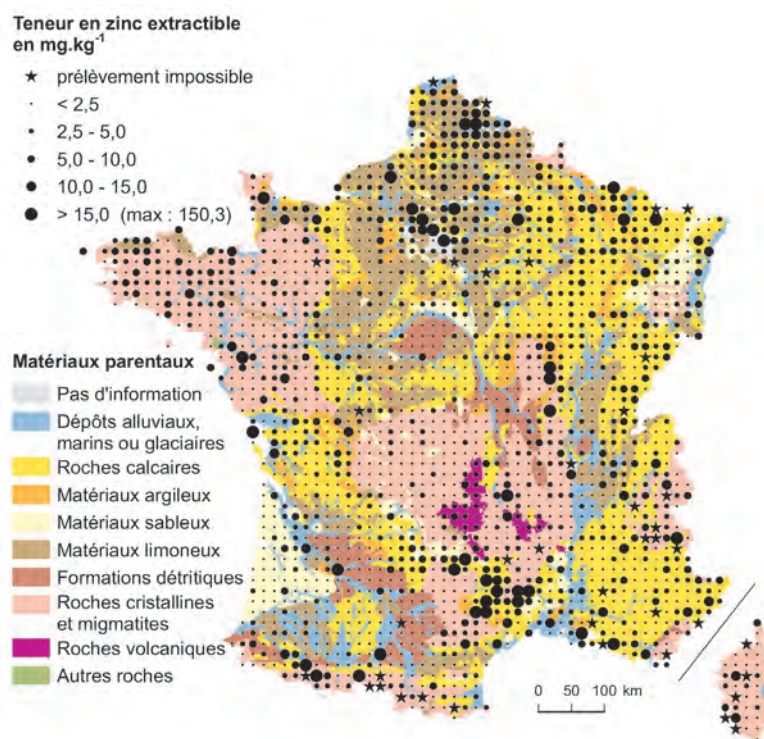
La carte du zinc extractible à l'EDTA, correspondant à des formes plus mobiles, montre plus clairement des gradients très probablement liés à des contaminations diffuses. Ces gradients sont observés à proximité des grandes agglomérations ou des zones très industrialisées (bassin minier et métallurgique lorrain, Île-de-France, Nord-Pas-de-Calais). Les teneurs élevées en Bretagne sont probablement liées à la combinaison d'un effet pédogéochimique naturel auquel se surimpose celui des épandages de lisiers de porcs. Les valeurs qui semblent constituer des anomalies locales dans les Landes de Gascogne correspondent à des clairières cultivées dans lesquelles des apports de zinc sont effectués sur maïs afin de lutter contre la carence naturelle des sols en cet élément.

En ce qui concerne les lisiers de porcs, des études sont en cours pour limiter voire supprimer l'adjonction de zinc dans l'alimentation des porcelets.

Les teneurs en zinc total des horizons de surface (0-30 cm) des sols de France



Source : Gis Sol, RMQS, 2011 ; Inra, BDGSF, 1998.

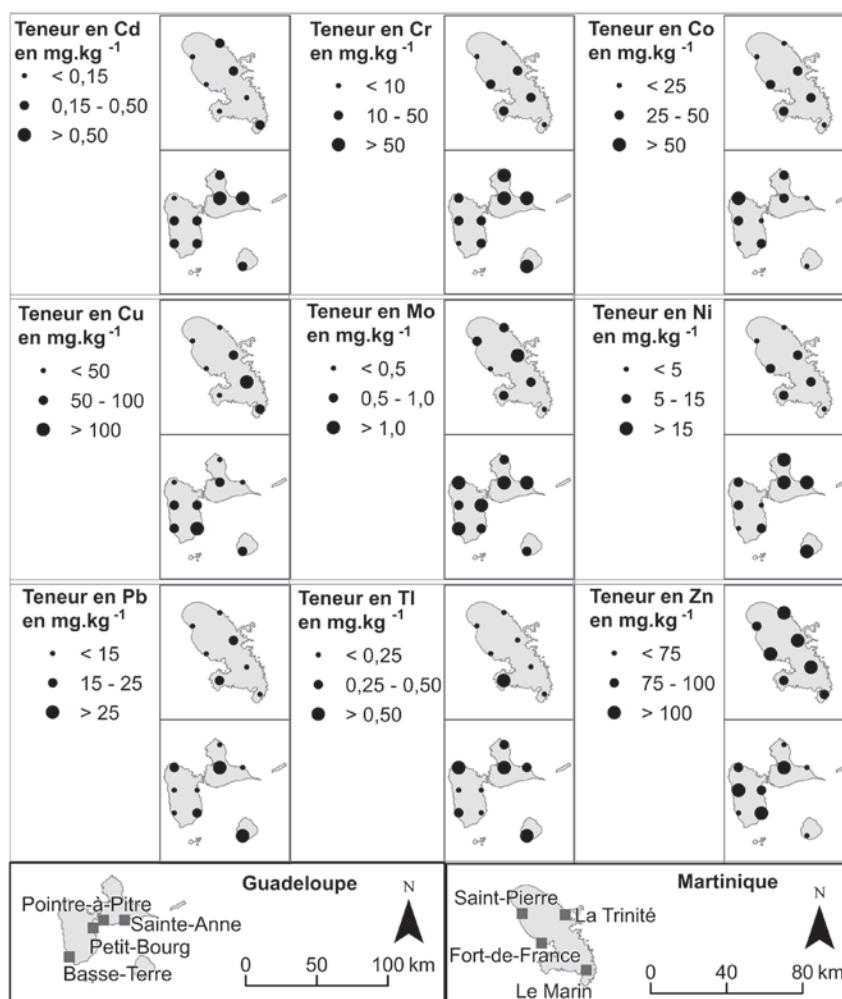


Source : Gis Sol, RMQS, 2011 ; Inra, BDGSF, 1998.

2 Les éléments traces métalliques dans les sols des Antilles françaises

De par leur origine volcanique, les sols des Antilles françaises présentent fréquemment des teneurs relativement élevées en éléments traces métalliques. Le zinc et le cuivre s'accumulent relativement dans les sols selon leur degré d'altération, en même temps que le fer. On y observe quelques particularités locales, comme par exemple la présence de fortes teneurs en chrome et en nickel dans les sols de la Guadeloupe reposant sur calcaire récifal, mais aussi les plus exposés aux dépôts de poussières sahariennes (Grande Terre, Marie-Galante). Les teneurs en éléments traces des cendres volcaniques peuvent varier fortement d'une éruption à l'autre. Ainsi ces teneurs pourraient constituer des marqueurs de l'historique des dépôts. Il n'a pas été observé de contamination anthropique évidente en ces éléments. Les teneurs élevées en cuivre sont liées à l'altération de certaines roches magmatiques basiques.

Les teneurs en éléments traces métalliques totaux des horizons de surface (0-30 cm) des sols de la Guadeloupe et de la Martinique



Source : Gis Sol, RMQS, 2011 ; IGN, Geofla®, 2008.

- Baize D., 1997. *Teneurs totales en éléments traces métalliques dans les sols*. Paris : INRA Éditions. 410 p. (coll. Un point sur...).
- Baize D. et Tercé (coord.), 2002. *Les Éléments traces métalliques dans les sols – Approches fonctionnelles et spatiales*. Paris : INRA Éditions, 570 p.
- 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.
- Baize D., Saby N. et Walter C., 2006. « *Le cuivre extrait à l'EDTA dans les sols de France. Probabilités de carences et de toxicités selon la BDAT* », *Étude et Gestion des Sols*, 13, 4. 259-268 p.
- Lamy I., Sterckeman T., Cambier P., Jaffrezic A., van Oort F., Baize D., Chaussod R., Denaix L. et Cornu S., 2011. *Présence et impact des éléments en traces dans les sols. Chapitre 24 In : Sols et Environnement*. Girard M.-C., Walter C., Rémy J.-C., Berthelin J. et Morel J.-L. éd. Dunod, 896 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., Thioulouse J., Jolivet C.-C., Ratié C., Boulonne L., Bispo A., Arrouays D., 2009. « *Multivariate analysis of the spatial patterns of 8 trace elements using the French Soil Monitoring Network data.* », *Sci. Tot. Env.* 407, 5644-5652 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.
- Sterckeman T., Douay F., Fourrier H. et Proix N., 2002. *Référentiel Pêdo-Géochimique du Nord-Pas-de-Calais*. Rapport final (130 p) et Annexes (306 p).
- Tremel A. et Mench M., 1997. « *Le thallium dans les sols et les végétaux supérieurs. I. Le thallium dans les sols.* », *Agronomie*, 17, 195-204 p.

Liens

- BDETM : Collecte nationale d'analyses d'Éléments Traces Métalliques :
<http://www.gissol.fr/programme/bdetm/bdetm.php>
- INDIQUASOL : Base de Données des indicateurs de la Qualité des Sols :
<http://www.gissol.fr/programme/bdiqs/bdiqs.php>
- SOGREAH : Bilan des flux de contaminants entrant sur les sols agricoles de France métropolitaine :
<http://www2.ademe.fr/servlet/KBaseShow?sort=-1&cid=96&m=3&catid=14231&p1=00&p2=11>
- UNIFA, La fertilisation en France :
<http://www.unifa.fr/le-marche-en-chiffres/la-fertilisation-en-france.html>

■ Les polluants organiques persistants et les pesticides dans les sols de France

Les polluants organiques persistants (POP) sont encore peu étudiés de façon systématique dans les sols de France. Les molécules classées comme POP ont des origines très différentes (naturelle ou humaine). Leur comportement physico-chimique est lui aussi très variable et souvent le type de contamination en dépend, selon que ces molécules sont plus ou moins retenues par le sol, biodégradables ou volatiles. Certaines molécules sont relativement ubiquistes dans les sols, alors que d'autres ne sont retrouvées que très ponctuellement, en fonction de leur origine, de leur historique d'utilisation et des modes de dispersion dans l'environnement. Quelques herbicides qui ne sont pas habituellement considérés comme des POP ont également été étudiés.

Les polluants organiques persistants (POP) sont des molécules définies par quatre propriétés : leur toxicité (effets avérés sur la santé humaine ou l'environnement), leur persistance dans l'environnement (résistance à la dégradation), leur capacité de bioaccumulation (concentration progressive dans les tissus vivants) et leur capacité de transport sur de longues distances (déplacements en des lieux plus ou moins lointains des sources d'émission).

La toxicité des POP est clairement établie dans le cas d'expositions très fortes et peut provoquer des troubles majeurs pouvant conduire jusqu'au décès. La toxicité chronique de la plupart de ces polluants est de plus en plus suspectée (effets cancérigènes, réduction de la fertilité, perturbation des systèmes nerveux, endocrinien et immunitaire, etc.). Leur solubilité élevée dans les lipides entraîne également leur bioaccumulation dans les tissus adipeux.

La plupart des POP ont comme particularité d'être semi-volatiles, avec une certaine mobilité apparente due à leur persistance élevée, ce qui facilite leur transport sur de longues distances. Leur résistance à la dégradation biologique, chimique et par la lumière est variable et ils sont parfois dégradés en sous-produits plus toxiques et persistants que la molécule-mère.

Plusieurs dizaines de familles de molécules organiques sont susceptibles de répondre à ces critères. Certaines substances peuvent avoir une origine naturelle (les feux de forêt ou de prairie produisent par exemple des hydrocarbures aromatiques polycycliques) ou bien peuvent être produites, de façon intentionnelle ou non, par les activités humaines (industrie, combustion d'énergie fossile, traitements de déchets, produits phytosanitaires, etc.).

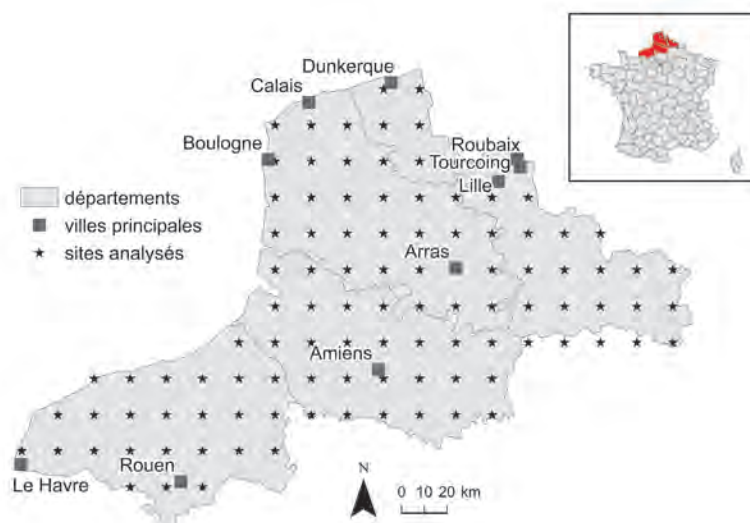


Usine de fabrication d'enrobés.

La distribution de plusieurs familles de POP dans les sols est abordée. Il s'agit des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), des polychlorobiphényles (PCB), des pesticides organochlorés (OCP), des dioxines et des furanes.

La distribution d'autres polluants ubiquistes moins persistants comme les triazines, les urées substituées et certains herbicides très largement utilisés est également présentée.

Une liste de 90 POP a ainsi été retenue et étudiée sur la base du maillage (16 km x 16 km) du Réseau de Mesures de la Qualité des Sols (RMQS) sur un sous-échantillon du territoire métropolitain composé de la région Nord-Pas-de-Calais et des départements de la Somme et de la Seine-Maritime.



Source : Gis Sol, RMQS, 2008 ; Anses, programme POP-RMQS, 2009 ; IGN, Geofla®, 2008.

Ce secteur a été choisi comme zone de test pour disposer de gradients opposant des secteurs fortement urbanisés et industrialisés à des secteurs à dominante agricole.

Il comporte 105 sites RMQS pour lesquels les analyses ont été réalisées dans les horizons de surface (0-30 cm) des sols.

Les hydrocarbures aromatiques polycycliques dans les sols

Les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) sont des molécules organiques issues de la fusion de cycles benzéniques (cycles de six atomes de carbone). Le plus simple des HAP est le naphthalène (deux cycles) et le plus complexe est le coronène (sept cycles). Le nombre de cycles aromatiques influe directement sur le comportement physico-chimique des HAP. Les composés comptant moins de quatre cycles sont considérés comme légers. Ils sont rapidement dégradés et volatiles. Les molécules comptant quatre cycles ou plus sont plus persistantes dans les sols et moins volatiles. Excepté le naphthalène, leur solubilité dans l'eau est faible et décroît avec l'augmentation du nombre de cycles. Ce sont des molécules lipophiles, c'est-à-dire solubles dans les corps gras. La persistance des HAP dans les sols est en partie la conséquence de ces propriétés.

Les HAP dans les sols peuvent avoir une origine naturelle ou humaine. Ils sont produits principalement par pyrolyse des matières organiques comme les feux de forêt et la combustion des énergies fossiles. Dans les sols, ils peuvent se former naturellement par l'activité biologique

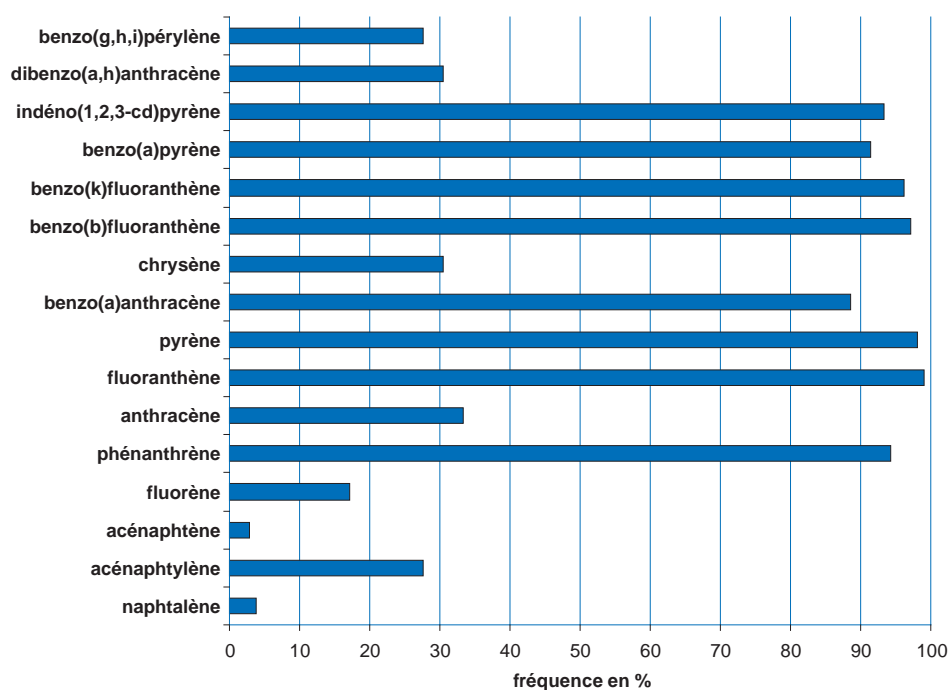
lors du processus d'humification des matières organiques pouvant conduire à des composés aromatiques. Ils peuvent aussi provenir de processus de transformation de produits pétroliers ou d'autres hydrocarbures fossiles tels que les asphaltes, bitumes, créosotes (huiles extraites de goudrons de bois, de charbon ou de plantes), goudrons ou huiles minérales. D'autres sources notables concernent les usines de traitement du bois et l'incinération de déchets.

La fréquence de détection de la présence d'HAP dans les sols du nord de la France montre clairement 3 populations aux comportements différents :

- des HAP dont la présence est très rarement détectée (naphthalène, acénaphène) ;
- des HAP plus fréquemment présents mais toujours dans moins de 35 % des échantillons analysés ;
- des HAP relativement ubiquistes, car détectés dans la grande majorité des échantillons.

En règle générale, ce sont les HAP les plus lourds qui sont détectés le plus souvent, car ils sont les plus persistants.

La fréquence (en %) de détection des HAP dans des horizons de surface (0-30 cm) des sols du nord de la France



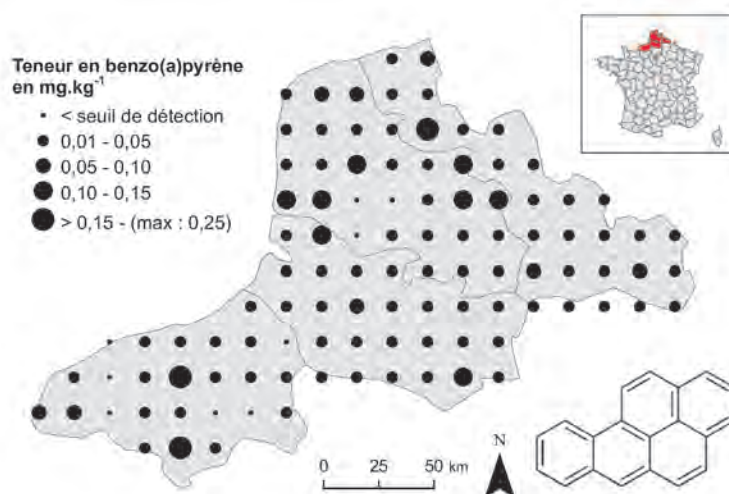
Source : Gis Sol, RMQS, 2008 ; Anses, programme POP-RMQS, 2009.

2 Un exemple : la distribution spatiale du benzo(a)pyrène (BaP)

encart

Il s'agit d'un des HAP les plus présents dans les échantillons de sols analysés dans le cadre du RMQS dans le nord de la France. Les sources de BaP ne sont pas spécifiques : sa présence dans l'environnement peut être d'origine humaine ou naturelle. Cette molécule est principalement émise dans l'atmosphère sous forme particulaire. Le BaP est peu soluble dans l'eau et peu mobile dans les sols. Dans les sols du nord de la France, les teneurs en BaP ne dépassent pas $0,25 \text{ mg.kg}^{-1}$. On observe des valeurs élevées au niveau du bassin minier dans le Nord qui se trouve aussi être un département fortement peuplé et industrialisé. Le sud-ouest du Pas-de-Calais présente lui aussi des teneurs plus fortes. On observe ailleurs des valeurs ponctuellement élevées, comme à proximité du Havre ou de Rouen, probablement dues à une contamination plus ponctuelle de type industriel.

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



Source : Gis Sol, RMQS, 2008 ; Anses, programme POP-RMQS, 2009 ; IGN, Geofla®, 2008.

Les polychlorobiphényles dans les sols

Les polychlorobiphényles (PCB), aussi communément appelés pyralènes, sont des composés chimiques constitués de deux noyaux benzéniques dont une partie des atomes d'hydrogène est substituée par des atomes de chlore. Il existe 209 congénères possibles selon le nombre et la distribution des atomes de chlore. Leurs propriétés physico-chimiques varient en fonction du nombre et de la position des atomes de chlore dans la molécule. Leur solubilité dans l'eau décroît avec l'augmentation du nombre d'atome de chlore, tout comme leur dégradabilité, alors que leur volatilité augmente. Cette faible solubilité dans l'eau confine fortement les PCB dans les sols, car ils sont fortement adsorbés.

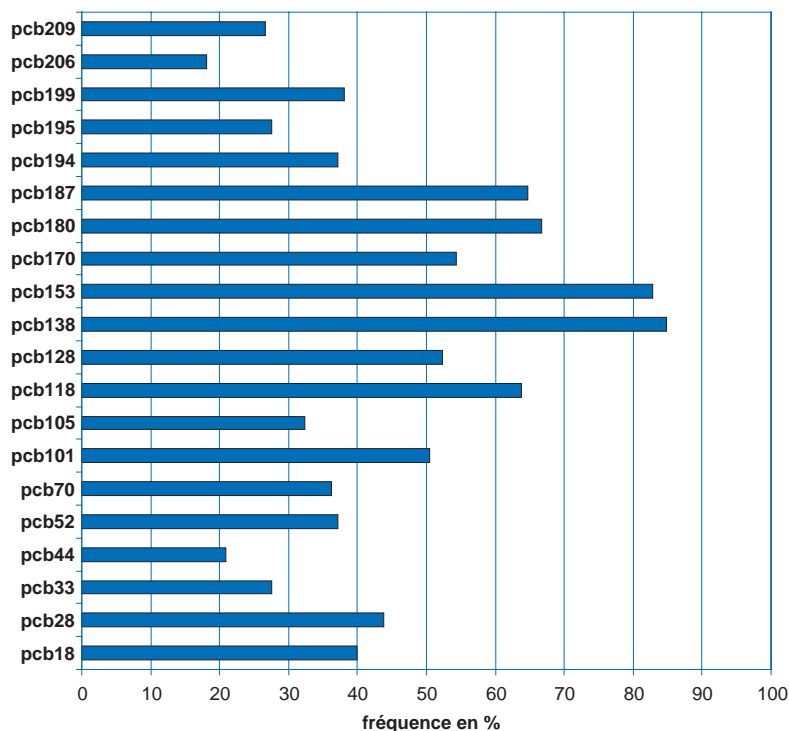
Ces molécules sont plutôt liposolubles et se fixent dans les tissus gras des êtres vivants, pouvant entraîner un risque de bioaccumulation le long des chaînes alimentaires. Les PCB comptant 5 à 7 atomes de chlore sont les plus susceptibles de se bioaccumuler dans la chaîne alimentaire. La toxicité des PCB peut varier d'un facteur 1 000 entre deux congénères. La structure de la molécule

a une influence directe sur l'effet toxique. La toxicité aiguë et la stabilité des PCB augmentent généralement avec le nombre d'atomes de chlore présents sur la molécule. La toxicité aiguë des PCB est faible, mais ils peuvent avoir un effet à long terme par intoxication chronique.

Les PCB ne sont générés par aucun phénomène naturel. Ils ont une origine exclusivement humaine. Produits industriellement depuis 1930, leur fabrication a été arrêtée totalement en France depuis 1987. Les PCB étaient principalement utilisés comme fluides diélectriques dans les transformateurs et condensateurs, comme liquides de refroidissement ou comme additifs dans les peintures, les encres ou les apprêts pour revêtements muraux.

Les PCB sont des molécules chimiquement très stables et très persistantes. Leur demi-vie – durée nécessaire à la disparition de la moitié de la molécule introduite dans l'environnement – varie de 94 jours à 2 700 ans selon les molécules et les conditions environnementales.

La fréquence de détection des PCB dans des horizons de surface (0-30 cm) des sols du nord de la France

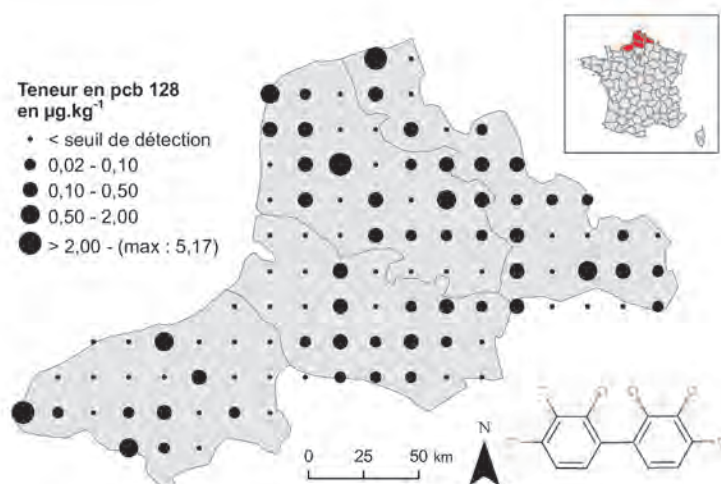


Source : Gis Sol, RMQS, 2008 ; Anses, programme POP-RMQS, 2009.

De nombreux PCB sont relativement peu présents dans les sols du nord de la France. Les valeurs élevées en PCB sont très ponctuelles et souvent à proximité des

villes comme Calais, Dieppe, Dunkerque ou encore Le Havre. C'est le cas du PCB128. On peut penser que dans ce cas, la contamination est d'origine industrielle.

Les teneurs en PCB128 des horizons de surface (0-30 cm) des sols du nord de la France



Source : Gis Sol, RMQS, 2008 ; Anses, programme POP-RMQS, 2009 ; IGN, Geofla®, 2008.

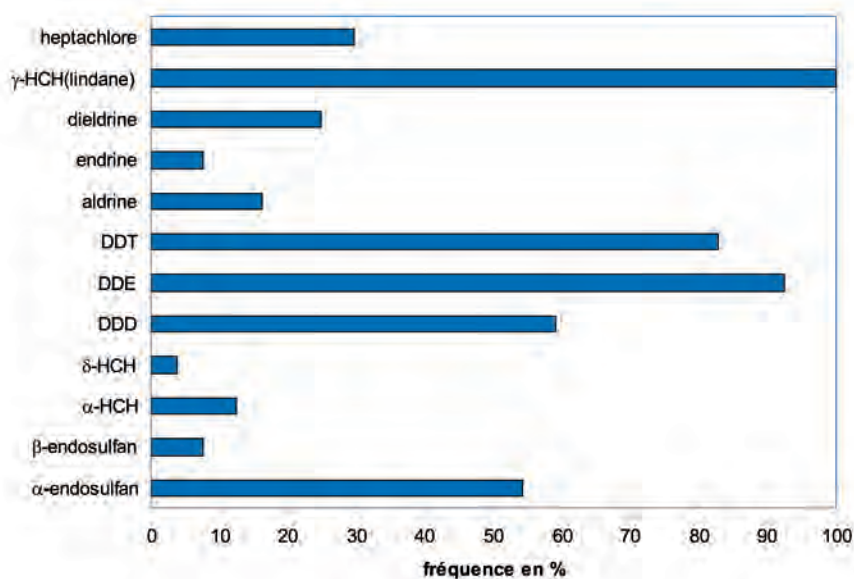
Les pesticides organochlorés dans les sols

Les pesticides organochlorés (OCP) sont des molécules hydrocarbonées cycliques possédant un ou plusieurs atomes de chlore. Ils sont très stables dans l'environnement et ont une affinité particulière pour les matières organiques. Les OCP sont des molécules considérées comme volatiles. Ils sont très peu solubles dans l'eau, mais plutôt lipophiles. Ils ont donc tendance à s'accumuler dans les tissus riches en graisses des êtres vivants et à contaminer la chaîne alimentaire.

Ces molécules, très stables, génèrent parfois des métabolites, produits de leur dégradation, qui peuvent s'avérer plus toxiques et aussi stables que la molécule mère (par exemple, le DDT : dichlorodiphényltrichloroéthane peut générer du DDE : dichlorodiphényldichloroéthylène).

Les sources d'OCP sont d'origine humaine. Ils sont utilisés pour lutter contre les insectes dans le domaine agricole, vétérinaire (déparasitage de certains animaux), du bâtiment (traitement du bois) ou encore de l'hygiène publique (désinsectisation). La plupart sont actuellement interdits en France. Les OCP peuvent être sujets à des transports atmosphériques sur de longues distances. Ils sont observés dans la composition de l'air, et certains sont transportés jusqu'aux calottes glaciaires.

Trois OCP (lindane ou γ -hexachlorocyclohexane (γ -HCH), DDE et DDT) sont très largement présents dans les sols du nord de la France. Parmi eux, le lindane est présent dans la totalité des échantillons analysés, même sur les sites où il n'a manifestement jamais été épandu. Ceci montre bien le caractère ubiquiste de cette molécule sujette à des transports sur de longues distances.



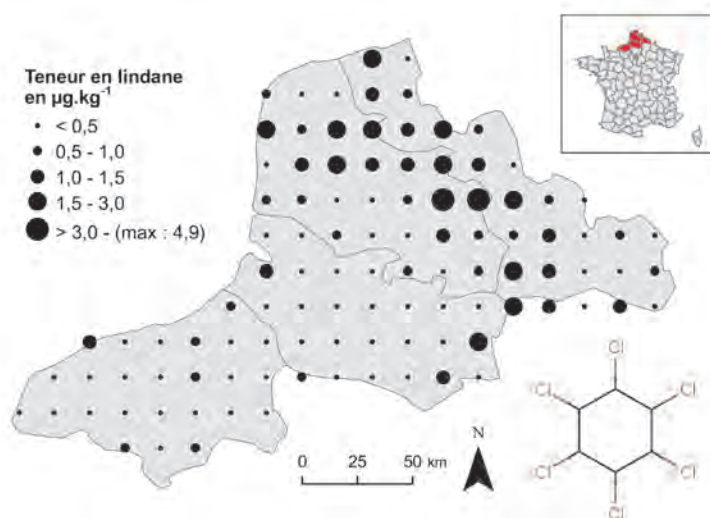
Source : Gis Sol, RMQS, 2008 ; Anses, programme POP-RMQS, 2009.

Le lindane (γ -HCH) est un isomère du HCH ($C_6H_6Cl_6$). C'est une molécule considérée comme volatile. Son temps de demi-vie dans les sols (durée nécessaire à la disparition de la moitié de la molécule introduite) varie de quelques jours à environ un an selon les conditions du milieu.

Il s'agit d'un insecticide dit « à spectre large », c'est-à-dire qu'il a pu être utilisé dans des cas multiples comme le traitement des sols, des semences ou des feuilles de diverses cultures, le traitement du bois, pour déparasiter le bétail ou les animaux de compagnie ou même pour l'usage domestique ou pharmaceutique.

Dans le nord de la France, les teneurs en lindane des sols varient entre 0,03 et $5 \mu g.kg^{-1}$. Les valeurs les plus élevées sont localisées dans le nord-est du secteur étudié qui est une région urbanisée, au niveau de l'ancien bassin minier. L'altitude y est peu élevée et forme une dépression. Le lindane, que l'on attendait plutôt avec de fortes teneurs dans les sols agricoles, a pu être remobilisé par volatilisation puis être transporté par les vents dominants et se redéposer dans la dépression.

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



Source : Gis Sol, RMQS, 2008 ; Anses, programme POP-RMQS, 2009 ; IGN, Geofla®, 2008.

Les triazines et les urées substituées dans les sols

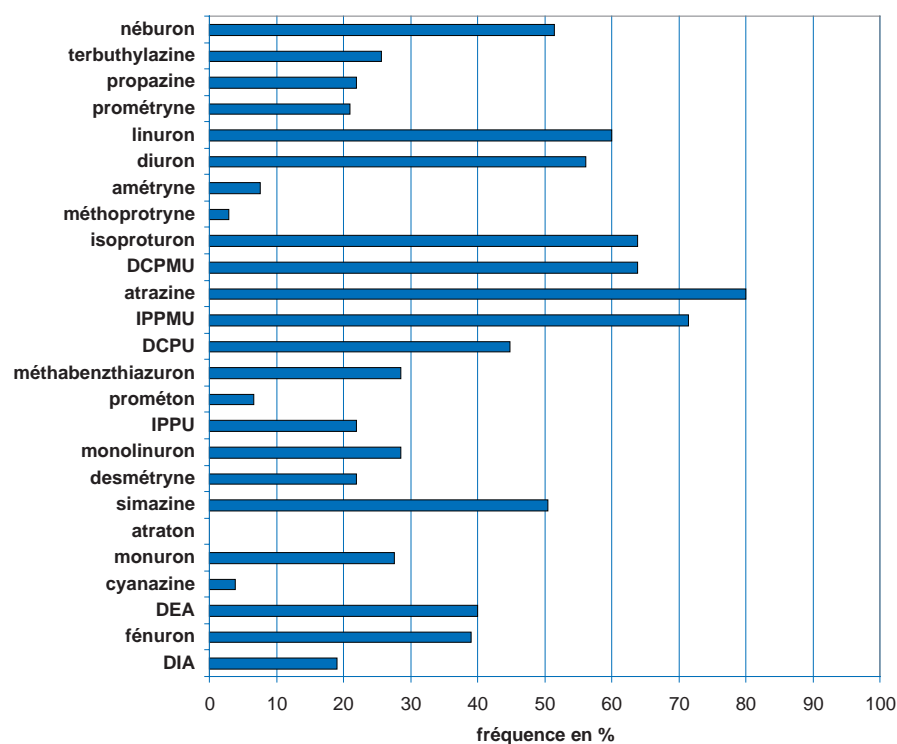
Les triazines et les urées substituées trouvées dans les sols sont des herbicides de type racinaire, c'est-à-dire qu'ils sont absorbés par les racines des plantes, puis transportés aux parties aériennes où ils inhibent la photosynthèse. Ces herbicides sont considérés comme peu volatiles et relativement solubles dans l'eau et ne sont donc pas très fortement fixés par les sols. Leur temps de demi-vie (durée nécessaire à la disparition de la moitié de la molécule introduite) dans les sols y est assez court : de quelques jours à quelques mois.

Ces herbicides sont principalement utilisés en agriculture, mais peuvent aussi être utilisés en milieu urbain par les

collectivités locales ou les particuliers, ainsi que pour l'entretien des voies de chemins de fer. Pour les usages non agricoles, les deux principales triazines que sont l'atrazine et la simazine sont interdites depuis 1997. L'interdiction de l'atrazine pour l'usage agricole a été décidée en 2001. Les dates limites de distribution et d'utilisation ont été fixées respectivement au 30 septembre 2002 et au 30 septembre 2003.

La fréquence de détection de ces herbicides dans les sols est très variable, depuis l'absence totale (atraton) jusqu'à plus de 80 % des échantillons analysés (atrazine).

La fréquence de détection des herbicides étudiés dans des horizons de surface (0-30 cm) des sols du nord de la France

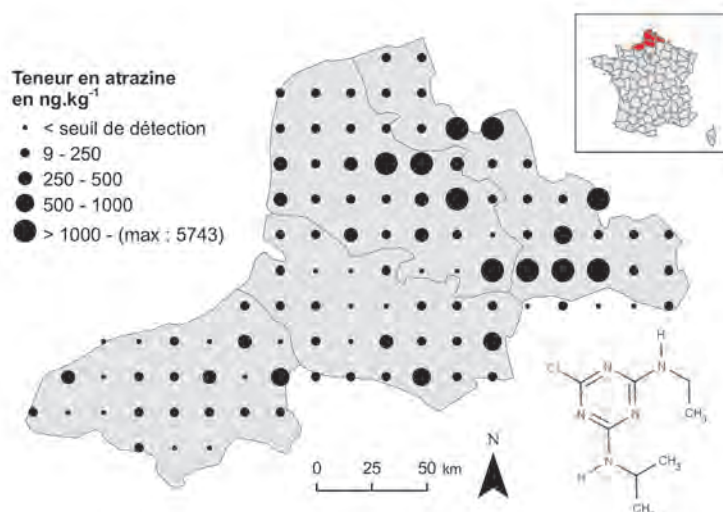


Source : Gis Sol, RMQS, 2008 ; Anses, programme POP-RMQS, 2009.

L'atrazine est une molécule peu volatile, assez peu soluble dans l'eau et plutôt lipophile. Sa durée de demi-vie dans le sol (durée nécessaire à la disparition de la moitié de la molécule introduite) varie de 15 à 100 jours. L'atrazine se dégrade en formant des métabolites (produits de dégradation) souvent plus stables que la molécule-mère. Les métabolites fréquemment retrouvés sont la déséthyl-atrazine (DEA), la désisopropyl-atrazine (DIA) et

l'hydroxy-atrazine. Cette dernière est moins toxique que les dérivés chlorés comme la DIA, la DEA ou la diamino-atrazine (DA).

Les teneurs en atrazine dans les sols du nord de la France varient entre quelques ng.kg^{-1} et des valeurs dépassant 2000 ng.kg^{-1} . Les valeurs les plus élevées se situent en zones agricoles autour du bassin minier. La Somme et la Seine-Maritime semblent moins touchées.



Source : Gis Sol, RMQS, 2008 ; Anses, programme POP-RMQS, 2009 ; IGN, Geofla®, 2008.

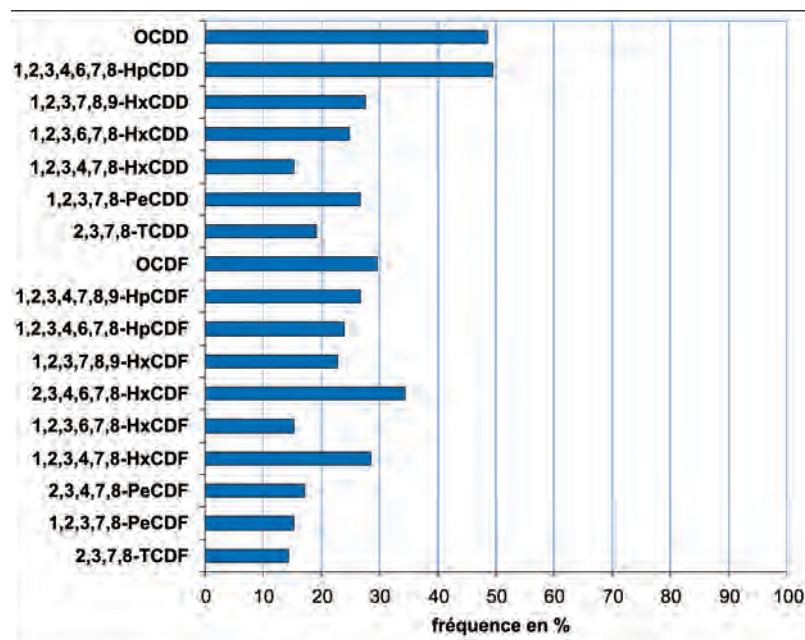
Les dioxines et les furanes dans les sols

Les polychlorodibenzodioxines (PCDD) et les polychlorodibenzofuranes (PCDF), plus souvent nommées dioxines et furanes, sont des composés formés de deux cycles benzéniques chlorés liés par l'intermédiaire d'une structure cyclique contenant un atome d'oxygène pour les furanes ou deux pour les dioxines. Il existe 75 congénères pour les dioxines et 135 pour les furanes, mais seuls certains d'entre eux sont toxiques pour l'Homme. Les molécules faiblement chlorées sont plus volatiles que celles fortement chlorées. Elles peuvent être transportées sur de longues distances sous forme gazeuse ou de particules. Elles sont peu solubles dans l'eau et sont facilement adsorbées par les composés organiques du sol. Les PCDD et PCDF sont lipophiles et se concentrent préférentiellement dans les tissus adipeux des êtres vivants,

ce qui explique leur caractère bioaccumulable. Elles peuvent néanmoins être dégradées dans les sols par la lumière ou par biodégradation.

Les dioxines et les furanes sont des molécules pouvant avoir une origine naturelle ou anthropique, mais elles sont toujours produites de façon non intentionnelle. Elles sont le produit de combustions comme les feux de forêts, mais aussi des combustions d'énergie fossile pour l'usage domestique, industriel ou les transports routiers ou encore de l'incinération des déchets. Elles sont souvent exprimées par une somme pondérée appelée « Total Équivalent Toxique » (TEQ) qui prend en compte la concentration et la toxicité relative de chaque congénère.

La fréquence de détection des PCDD et des PCDF étudiés dans des horizons de surface (0-30 cm) des sols du nord de la France



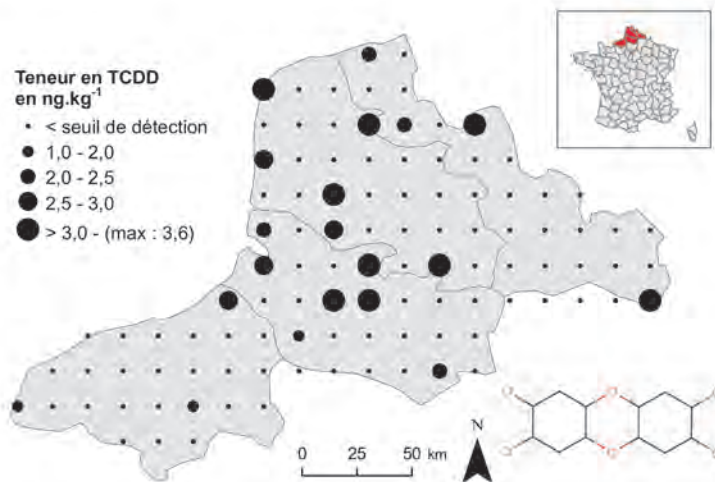
Source : Gis Sol, RMQS, 2008 ; Anses, programme POP-RMQS, 2009.

Seules deux des molécules étudiées ont une fréquence de détection supérieure à 50 % dans l'échantillonnage considéré.

surnommée dioxine « Seveso », car elle a été émise en quantité massive lors de l'explosion d'une usine de produits organochlorés en 1976 à Seveso, ville du nord de l'Italie. Son temps de demi-vie dans les sols (durée au bout de laquelle la quantité de molécules apportées est diminuée de moitié) varie entre 13 et 100 ans.

La TCDD, ou 2,3,7,8-tétrachlorodibenzo-dioxine, est la dioxine la plus toxique pour l'Homme et c'est la seule qui est considérée comme cancérigène. Elle est aussi

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



Source : Gis Sol, RMQS, 2008 ; Anses, programme POP-RMQS, 2009 ; IGN, Geofla®, 2008.

Les teneurs en TCDD restent inférieures à 4 ng.kg⁻¹ dans le nord de la France. On observe quelques valeurs élevées autour de certaines villes (Amiens, Arras, Calais, Boulogne-sur-Mer, Dunkerque, Saint-Omer) et

autour de l'agglomération Lille-Roubaix-Tourcoing. Il semblerait que la TCDD soit donc principalement concentrée dans les sols en milieu urbain avec une origine probablement à la fois industrielle, routière et domestique.

L'exemple de la chlordécone aux Antilles françaises

La chlordécone, molécule organochlorée de synthèse, était utilisée aux Antilles comme insecticide contre le charançon du bananier de 1972 à 1993. Depuis 2000, des contrôles ont montré des contaminations d'eaux de rivières et de sources, de certaines denrées alimentaires, et d'organismes aquatiques, y compris marins. Des mesures de traitement des eaux, d'interdiction et de contrôle concernant les cultures et la pêche ont alors été prises pour limiter l'exposition des consommateurs.

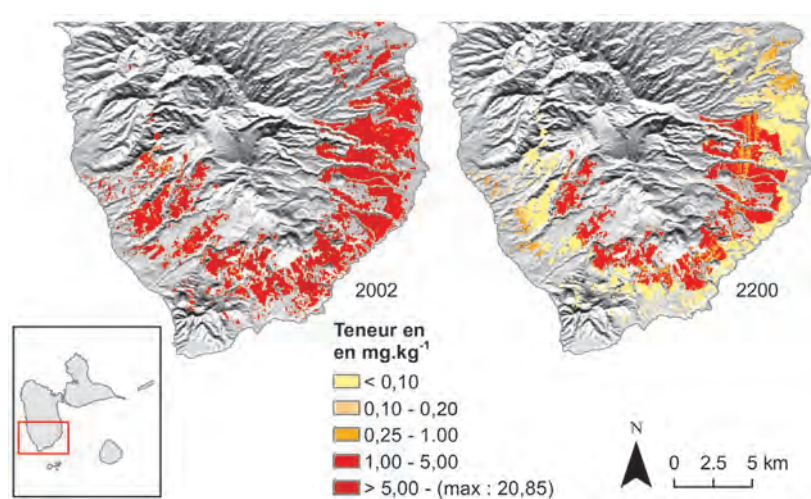
Des cartes de risques de pollution des sols, fondées sur leur occupation rétrospective en bananeraies, ont été établies, puis validées par des analyses. Les parts de surface agricole utile polluées sont ainsi de 1/5^e en Guadeloupe et 2/5^e en Martinique.

La chlordécone était épanchée sur des sols d'origine volcanique, riches en argiles et en matières organiques, sur laquelle elle s'est fortement fixée. Le ruissellement

superficiel, fugace et de faible volume, en transporte peu, ce qui évite la propagation de la pollution sur des terres indemnes. Seul le lessivage de la molécule par les eaux percolant en abondance dans les sols à forte capacité d'infiltration assure sa lente dissipation. Elle ne se dégrade pas dans les sols aérés.

Un modèle d'évolution appliqué sur les cartes de sol et prenant en compte les surfaces où la chlordécone a pu être apportée a permis de simuler cartographiquement l'évolution des teneurs dans les sols. Dix ans après les derniers apports, identiques, les sols argileux de la bande côtière sont moins pollués que les sols d'altitude riches en gels organominéraux. D'après cette modélisation, dans deux siècles, les sols argileux ne devraient plus contenir de chlordécone, alors que les sols d'altitude seront encore très pollués. Il faudrait attendre six siècles pour que ces derniers soient lavés de leur chlordécone.

La simulation de l'évolution des teneurs en chlordécone en 2002 et en 2200 de la couche de surface des sols de bananeraies du sud de Basse Terre (Guadeloupe)



Source : GisSol, IGCS, 2006 ; Cabidoche *et al.*, 2009 ; IGN, Geofla®, 2008.

Pour autant, les sols argileux, les moins durablement pollués, sont actuellement les plus contaminants pour les cultures et les eaux de nappes et de rivières.

Les organes souterrains des plantes, en contact avec la solution du sol, sont les plus contaminés. Cependant les parties aériennes sont aussi contaminées par la chlordécone entraînée dans le flux de sève brute, des

racines aux feuilles. La contamination des organes récoltés dépend alors de leur position dans ce flux et des tissus « filtres » traversés. Ces connaissances permettent de suggérer les cultures possibles selon le niveau de pollution d'un sol. En effet, certains produits agricoles restent indemnes malgré la pollution (ananas, banane, fruits d'arbres, piment, tomate, etc.).

Pour en savoir plus

- 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.
- 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., Sous presse. « 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, 3 719-3 731 p.

■ Les sols réservoirs de bactéries pathogènes de l'Homme

L'Homme est en interaction continue avec un environnement où les bactéries abondent. Cependant, certaines d'entre elles sont responsables de maladies et classées parmi les agents pathogènes. Qu'ils soient qualifiés de stricts, obligatoires, opportunistes, occasionnels... ces agents profitent de l'hôte, de ses faiblesses ou de modifications de l'environnement pour manifester leur pathogénie. Par ailleurs, le vieillissement de la population, l'augmentation du nombre d'individus immunodéprimés du fait d'une corticothérapie, d'un cancer, d'une maladie auto-immune..., l'apparition chez les bactéries des mécanismes de multirésistance aux antibiotiques sont autant de facteurs générant de nouveaux dangers et risques d'infections.

Des espèces faisant partie intégrante de la microflore commensale peuvent se révéler pathogènes (par exemple, les souches d'*Escherichia coli*, commensales du tube digestif, productrices de toxines). Similairement, un nombre croissant d'espèces connues pour leur distribution ubiquiste dans l'environnement (sol, eau, sédiment, plante, etc.) sont impliquées dans les infections nosocomiales (acquises à l'hôpital) et intègrent la liste des pathogènes opportunistes (espèces responsables d'infections chez des individus immunodéprimés).

Il existe cependant un déficit important sur l'étude de la prévalence des bactéries pathogènes humaines dans l'environnement, en dehors de l'Homme et des réservoirs animaux, et plus particulièrement dans les sols. Pourtant, les sols hébergent une microflore bactérienne abondante et d'une grande diversité et offrent par leur complexité structurale et physico-chimique une multiplicité d'habitats. Un gramme de sol peut renfermer jusqu'à 10^{10} cellules bactériennes et une importante diversité de quelques milliers voire dizaines de milliers d'espèces de microorganismes. Les sols peuvent ainsi constituer des

réservoirs d'espèces pathogènes connues [*Clostridium* (tétanos et botulisme), *Bacillus* (anthrax) ou *Mycobacterium* (tuberculose)]. Si les espèces pathogènes ne sont pas « résidents permanents » des sols, certaines espèces peuvent être introduites lors de pratiques agricoles comme l'épandage de fumier, de lisier ou de boues de station d'épuration. La présence dans les pâturages d'animaux porteurs de pathogènes ou l'utilisation malencontreuse d'eau souillée en irrigation peuvent également contaminer les sols en espèces pathogènes. Par ailleurs, les sols pourraient être la source d'agents microbiens pouvant évoluer vers un statut d'agent pathogène, tout comme ils peuvent être les réservoirs de nouvelles propriétés de virulence ou de résistance aux antibiotiques. En agriculture, aquaculture et horticulture, les antibiotiques sont en effet utilisés à des fins thérapeutiques et prophylactiques. Ces utilisations exercent alors une pression de sélection sur les populations bactériennes susceptible d'induire directement ou non une résistance aux antibiotiques chez les bactéries pathogènes. Selon l'agence nationale du médicament vétérinaire, les ventes d'antibiotiques ont toutefois diminué de 13 % en 2009 par rapport à 2008 et de 19,3 % par rapport à 1999.

Pour initier cette étude de la distribution de différentes espèces bactériennes dans les sols et appréhender l'impact des activités humaines sur cette distribution, le projet de recherche PATHO-RMQS a été mis en place. Ce projet s'appuie sur le Réseau de Mesures de la Qualité des Sols (RMQS) permettant ainsi de mener cette étude à l'échelle du territoire français. Les résultats indiquent que les sols constituent pour certaines espèces (par exemple, *Escherichia coli*) de véritables réservoirs. Au contraire, la présence sporadique de certaines espèces laisse penser que les sols ne jouent qu'un simple rôle de réceptacle transitoire où les conditions environnementales ne sont pas favorables à la multiplication des espèces.

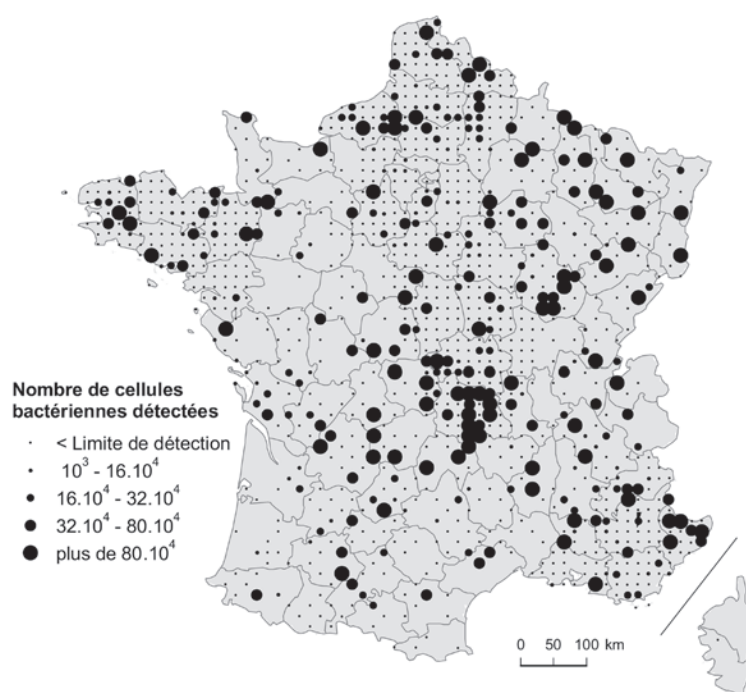
La fréquence de détection de certaines espèces de pathogènes dans un sous-échantillon des horizons de surface des sols du RMQS

	Nombres de sols analysés	Nombre de sols où la bactérie a été trouvée	Abondance de l'espèce (nombre de cellules par gramme de sol sec)
<i>Listeria monocytogenes</i>	1 463	0	< Id
<i>Salmonella enterica</i>	1 463	20	2.10 ³ à 2.10 ⁴
<i>Escherichia coli</i>	1 001	681	10 ³ à 5.10 ⁵
<i>Enterococcus faecalis</i>	1 463	63	10 ³ à 5.10 ⁵
<i>Acinetobacter baumannii</i>	1 163	8	10 ⁴ à 10 ⁵
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	363	11	10 ⁴ à 10 ⁵
<i>Stenotrophomonas maltophilia</i>	180	7	10 ⁴ à 5.10 ⁵
<i>Burkholderia cenocepacia</i>	117	0	< Id

<Id = inférieur à la limite de détection

Source : Gis Sol, RMQS, 2008 ; Anses, programme POP-RMQS, 2009.

La distribution du genre *Acinetobacter* dans les sols de France métropolitaine, hors Corse



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.

1 Le projet Patho-RMQS

Le premier objectif de ce projet est d'évaluer le potentiel du sol à constituer un réservoir, c'est-à-dire un milieu assurant la survie, le développement et la dispersion de bactéries pathogènes de l'Homme. Ce projet a également pour but de hiérarchiser les facteurs abiotiques (facteurs climatiques et physico-chimiques, source de contamination, fertilisation, usage de pesticides, etc.) et biotiques (densité, structure génétique des communautés bactériennes indigènes, etc.) favorables à la survie, au développement et à la dispersion de bactéries pathogènes.

Patho-RMQS vise à étudier la distribution de pathogènes humains dans les sols français *via* une stratégie d'échantillonnage portant sur l'ensemble du territoire métropolitain. L'échantillonnage est exhaustif, standardisé, représentatif de différents types et modes d'exploitation du sol et s'appuie sur le réseau RMQS.

Les pathogènes ciblés sont des pathogènes primaires (*Listeria monocytogenes*, *Salmonella typhimurium*, *Clostridium difficile*, *Enterococcus faecalis*, *Leptospira*, *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli*, *Burkholderia pseudomallei*) et des pathogènes opportunistes (*Pseudomonas aeruginosa*, *Burkholderia cenocepacia*, *Burkholderia multivorans*, *Stenotrophomonas maltophilia*, *Nocardia asteroides*, *Acinetobacter baumannii*, *Achromobacter xylooxidans*, *Aeromonas hydrophila*, *Aeromonas caviae*). Ces deux types de pathogènes se différencient également par leur distribution présumée dans l'environnement (aquatique, animal/humain, sols/rhizosphère).

Le projet de recherche Patho-RMQS (Répartition géographique des bactéries pathogènes de l'Homme dans les sols : effet des constituants et de l'urbanisation) a été financé par le programme de recherche Santé-Environnement et Santé-Travail de l'Agence Nationale pour la Recherche.

Lien

- Agence nationale du médicament vétérinaire : <http://www.anmv.afssa.fr/>

Le tassement dans les sols de France

Le tassement est un processus majeur de dégradation physique des sols et concernerait 33 millions d'hectares en Europe. Essentiellement dû à la mécanisation des activités agricoles et forestières, le tassement résulte d'une interaction complexe entre le sol, le climat et les pratiques culturales. Il entraîne une baisse de la production, mais a également des conséquences environnementales importantes. Éviter les situations à risque n'étant pas toujours possible, certaines pratiques comme le cloisonnement ou l'utilisation de pneumatiques adaptés peuvent limiter l'impact du tassement.

Le tassement des sols est, avec l'érosion, un processus majeur de dégradation physique des sols en Europe. Une superficie de 33 millions d'hectares serait actuellement concernée, soit 4 % des terres. La mécanisation des activités agricoles et forestières implique des passages d'engins lourds lors du travail du sol, du semis, des épandages et des récoltes. Si ces passages s'effectuent sur un sol humide, un tassement irréversible peut avoir lieu. En effet, le tassement est le résultat d'une interaction entre l'humidité du sol, sa sensibilité à la compaction et la pression exercée par les engins d'exploitation agricole ou forestière. Le tassement peut également être provoqué par le piétinement du bétail en conditions humides.

Depuis quelques années, on assiste à un renouvellement de l'intérêt porté à ce problème. En effet, cette dégradation de la qualité des sols agricoles et forestiers est un risque qui concerne désormais l'ensemble des sols français du fait de la généralisation de la mécanisation en vignoble et en forêt. Le tassement entraîne, outre une baisse de la production, un accroissement des impacts environnementaux des activités agricoles et forestières : augmentation du risque de lessivage des nitrates, d'émission de N_2O , de ruissellement et d'érosion des sols.

Par ailleurs, les évolutions actuelles des systèmes de culture remettent le tassement au cœur des préoccupations. On observe ainsi en grande culture une tendance à la diminution du travail du sol, motivée par le souci de baisser les coûts de production et les charges de mécanisation, ou de protéger les sols de l'érosion. La simplification du travail du sol limite les possibilités de régénérer sa structure grâce à la fragmentation par les outils. Enfin, des interrogations subsistent concernant l'irréversibilité possible de la dégradation des sols sous l'effet de la répétition des interventions en conditions humides.

Lors du projet de recherche portant sur la Dégradation Physique des Sols agricoles et forestiers liée au Tassement (DST), une étude réalisée en France métropolitaine en 2005 a permis de caractériser le risque de tassement associé à l'emploi des principaux engins agricoles et forestiers. En grande culture, les pressions exercées sont faibles (30 kPa) lors du semis ou de la préparation du sol. Elles sont très fortes lors des récoltes et de leur transport (150 voire 200 kPa). Dans les vignobles, les pressions sont moyennes (60 kPa) à fortes (100 kPa), mais certains gros porteurs peuvent présenter des pressions très fortes (280 kPa). En forêts, les engins utilisés pour abattre ou débarder le bois exercent des pressions moyennes (60 kPa) à très fortes (190 kPa).



Le tassement en forêt dû à des engins de débardage

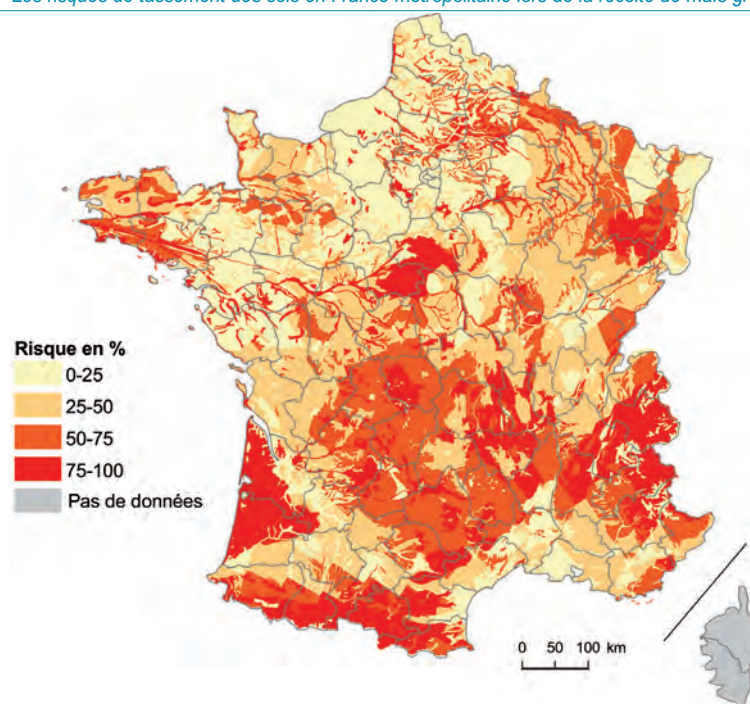
Cependant, pour estimer le risque de dégradation, il ne faut pas seulement considérer la pression exercée par les engins, mais également la proportion de la surface de la parcelle affectée par le passage de l'engin. Il y a de fortes disparités selon les opérations. En grande culture, lors de l'épandage de fertilisants ou de pesticides la surface affectée représente seulement 2 % de la surface totale. Par contre, elle est de 50 % lors du semis, voire de 68 % lors de la récolte de betteraves. En viticulture, seule la surface entre les rangs est touchée, mais le nombre de passages est élevé, atteignant jusqu'à 25 par an. Enfin, en forêt, les surfaces affectées peuvent représenter de 6 à 25 % de la surface totale des lots.

Il faut également tenir compte de la période d'utilisation des engins. Même ceux qui exercent de faibles pressions au sol peuvent induire des tassements importants si le passage a lieu lorsque le sol est trop humide. Ainsi, pour le blé d'hiver, la période la plus critique n'est pas la récolte (juin-juillet), là où les engins sont les plus lourds, car le sol

est généralement sec à cette période. Ce sont les semis tardifs d'automne et la fertilisation en février et mars, sur des sols souvent très humides, qui présentent le plus de risques.

Dans le cadre du projet DST, une modélisation à partir d'une base de données spatialisée sur les sols français a ainsi permis de cartographier le risque de tassement en France. Concernant la culture du maïs, la période la plus à risque concerne la récolte car les engins provoquent des pressions élevées au sol aggravées par les pluies automnales. Près de 40 % des surfaces présentent un risque au moins une année sur deux. Les risques les plus élevés sont principalement localisés sur les sols sableux (Landes, Sologne, Vosges) très sensibles aux fortes pressions et dans le Massif central. Cependant, ces résultats sont à relativiser car à l'exception des Landes, ces régions produisent peu de maïs. En Bretagne, région productrice de maïs, des zones à risque sont présentes au sud.

Les risques de tassement des sols en France métropolitaine lors de la récolte de maïs grain



Source : M.-P. Lefebvre, 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.

Note : Le risque correspond à un pourcentage d'années pour lesquelles un tassement sévère pourrait avoir lieu lors de la récolte du maïs, calculé sur une période de 30 ans. Les simulations considèrent que tous les sols sont cultivés en maïs.

Note de fin de chapitre : Le programme de recherche Dégradation Physique des Sols agricoles et forestiers liée au Tassement (DST) a été financé par le programme GESSOL du ministère en charge de l'Écologie et le programme Agriculture et Développement Durable de l'Agence Nationale de la Recherche.

Pour en savoir plus

- 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.

Conclusion

177 Conclusion

Conclusion

Les sols de France sont caractérisés par une très grande variabilité qui se manifeste à toutes les échelles. Ils assurent des services multiples. Ils sont soumis à des pressions d'origine naturelle ou anthropique qui constituent des menaces vis-à-vis de leur capacité à rendre ces services.

Ce rapport dresse un premier bilan de l'état des sols de France. Il souligne les principales inquiétudes relatives à l'évolution de leur qualité. *A contrario*, il met en évidence un certain nombre de points positifs. Enfin, il 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.

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 ne semble donc pas devoir être une préoccupation majeure à l'échelle nationale. Dans les sols non carbonatés, ce processus n'est toutefois contrebalancé que par l'apport régulier d'amendements minéraux. 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 du maintien à moyen terme de la fertilité des sols agricoles en cet élément. Inversement, l'augmentation des teneurs en phosphore des sols en situation d'excédent structurel reste très préoccupante en raison de son impact sur la qualité des eaux et sur l'eutrophisation des milieux. 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.

Pour certains oligo-éléments (bore, cuivre...) de nombreuses situations semblent susceptibles d'entraîner des carences pour 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.

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. Outre les problématiques de leur teneur en éléments indésirables et de leur mobilité, les inquiétudes et les incertitudes concernent une éventuelle accélération des transferts d'eau et de substances dissoutes ou en suspension vers les aquifères et les eaux superficielles sous l'effet du changement climatique. 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. L'augmentation de la fréquence des sécheresses pourrait également 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 abritent un stock de carbone organique considérable. Ce stock 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. 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 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. 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 (N₂O) 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.

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. 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. 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.

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 indicateurs retenus ici sont les quantités de contaminants mesurées et, lorsque cela est possible, des indicateurs visant à approcher leur mobilité et leur biodisponibilité. Les distributions géographiques de certains **éléments traces métalliques** (ETM), comme le plomb ou le cadmium, peuvent être reliées à des phénomènes de contamination diffuse. 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 auréoles existent également autour de pôles urbains ou industriels plus petits, mais qu'elles ont 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 aujourd'hui interdits.

Malgré l'identification de ces contaminations avérées, la grande majorité des sols de France présente des teneurs 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 périurbaine en plomb est, par exemple, très probablement à relier à l'addition de cet élément comme antidétonant dans les carburants. 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. Les concentrations restent néanmoins faibles, souvent proches des limites de détection. Le lindane est présent dans 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.

La caractérisation des sols en tant que réservoir de pathogènes et de gènes d'antibiorésistance n'en est encore qu'à ses prémices. Les résultats obtenus, comme les actualités récentes, confortent l'idée que l'exploration de ce réservoir potentiel est à poursuivre.

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. 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 et certaines situations méditerranéennes. Dans de nombreux cas, les pertes en sol provoquées par l'érosion sont, en effet, 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.

L'état des lieux dressé par ce rapport reste donc nuancé. Certaines menaces apparaissent aujourd'hui particulièrement prégnantes ou ont parfois déjà provoqué des dommages quasi irréversibles par le passé. D'autres font l'objet d'inquiétudes ou d'interrogations quant à leur évolution et leurs impacts possibles dans le futur. L'évaluation de l'état chimique 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.

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, le devenir de la biodiversité ou celui de l'état physique des sols. Certaines menaces largement irréversibles, comme l'érosion et l'artificialisation, pourraient être mieux quantifiées par d'autres dispositifs que ceux mis en place par le Gis Sol. Au-delà de ce diagnostic national, l'amélioration et le maintien de la qualité des sols nécessitent une gestion plus locale. 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.

Liste des abréviations et sigles

ACTA	Réseau des Instituts des Filières Animales et Végétales
ADEME	Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie
ADN	Acide Désoxyribonucléique
Al	Aluminium
ANR	Agence Nationale de la Recherche
Anses	Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail
AOC	Appellation d'Origine Contrôlée
APCA	Assemblée Permanente des Chambres d'Agriculture
As	Arsenic
B	Bore
BaP	Benzo(a)pyrène
BASIAS	Base de données de l'inventaire historique de sites industriels et activités de service
BASOL	base de données sur les sites et sols pollués (ou potentiellement pollués)
BD MvT	Base de Données Nationale des Mouvements de Terrain
BD	Base de Données
BDAT	Base de Données d'Analyses de Terre
BDETM	Base de Données des éléments traces métalliques
BDGSF	Base de Données Géographique des Sols de France à 1/1 000 000
BRGM	Bureau de Recherches Géologiques et Minières
C	Carbone
CA ou CDA	Chambre Départementale d'Agriculture
Ca	Calcium
Cd	Cadmium
CEC	Capacité d'Échange Cationique
CERTA	Cellule Économique Régionale des Transports d'Aquitaine
CH₄	Méthane
CITEPA	Centre Interprofessionnel Technique d'Études de la Pollution Atmosphérique
CNR-IRPI	Istituto di Ricerca per la Protezione Idrogeologica
CNRS	Centre National de la Recherche Scientifique
Co	Cobalt
CO₂	Dioxyde de Carbone
CORINE Land Cover	Inventaire cartographique de l'occupation des terres du programme de Coordination de l'information sur l'environnement
CPF	Connaissance Pédologique de la France
Cr	Chrome
CRA	Chambre Régionale d'Agriculture
CRA-PC	Chambre Régionale d'Agriculture de la région Poitou-Charentes
Cu	Cuivre
DA	Diamino-Atrazine
DDE	Dichlorodiphényldichloroéthylène
DDRM	Dossiers Départementaux des Risques Majeurs
DDT	Dichlorodiphényltrichloroéthane
DEA	Désethyl-Atrazine
DGPR	Direction Générale de la Prévention des Risques
DIA	Deisopropyl-Atrazine
DNA	Dernières Nouvelles d'Alsace
DST	Dégradation physique des Sols agricoles et forestiers liée au tassement : impact, prévision, prévention, suivi, cartographie
EDTA	Acide Éthylène Diamine Tétra Acétique
ETM	Éléments Traces Métalliques
Fe	Fer

FFTB	Fédération Française des Tuiles et Briques
Geofla®	Base de données contenant la description de l'ensemble des unités administratives de France métropolitaine et DOM et Mayotte
GES	Gaz à Effet de Serre
GESSOL	Programme de recherches « Gestion Environnementale des Sols » du ministère de l'écologie
GIEC	Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat
GIS	Groupement d'Intérêt Scientifique
GIS Sol	Groupement d'Intérêt Scientifique Sol
GRAP PC	Groupe Régional d'Action contre les Pollutions par les produits phytosanitaires – Poitou Charentes
H⁺	Proton
HAPs	Hydrocarbures aromatiques polycycliques
HCG	Haut Comité de Groupement (du GIS Sol)
HF	Acide fluorhydrique
Hg	Mercure
IFEN	Institut Français de l'ENvironnement
IFN	Institut Forestier National
IGCS	Inventaire, Gestion et Conservation des Sols
IGN	Institut Géographique National
IndiquaSol	Base de Données Indicateurs de la Qualité des Sols
INRA	Institut National de la Recherche Agronomique
INSEE	Institut National de la Statistique et des Études Économiques
IRD	Institut pour la Recherche et le Développement
K	Potassium
Loi ENE	Engagement National pour l'Environnement, dite Grenelle 2
MAAPRAT	Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation, de la Pêche, de la Ruralité et de l'Aménagement du Territoire
MEDDTL	Ministère de l'Écologie, du Développement Durable, des Transports et du Logement
Mesales	Modèle d'évaluation spatiale de l'aléa d'érosion des sols
Mg	Magnésium
Mn	Manganèse
Mo	Molybdène
N	Azote
N₂O	Protoxyde d'azote ou oxyde nitreux
Na	Sodium
NH₄⁺	Ion ammonium
Ni	Nickel
NO	Oxyde d'azote
NO₂⁻	Ion nitrite
NO₃⁻	Ion nitrate
OCP	Pesticides organochlorés
ONF	Office National des Forêts
P	Phosphore
Patho-RMQS	Programme ANR rattaché au RMQS consistant en la recherche de pathogènes humains dans les sols
Pb	Plomb
PCBs	Polychlorobiphényles
PCDD	Polychlorodibenzodioxines
PCDF	Polychlorodibenzofuranes
PCR	Polymerase Chain Reaction

pH	Potentiel Hydrogène
PLU	Plan Local d'Urbanisme
PO₄³⁻	Ion phosphate
POP	Polluants Organiques Persistants
PPR	Plan de Prévention des Risques
RMQS Biodiv	programme rattaché au RMQS visant à la réalisation d'un référentiel de la composante biologique des sols et de son activité
RMQS	Réseau de Mesures de la Qualité des Sols
ROM-COM	Régions d'Outre-Mer et Collectivités d'Outre-Mer
S	Soufre
SAU	Surface Agricole Utile
SDD	Seuil de Détection
Se	Sélénium
SOeS	Service de l'Observation et des Statistiques du ministère en charge de l'environnement
SOGREAH	SOciété GRenobloise d'Études et d'Applications Hydrauliques
SR	Secteurs de Référence
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
STEP	STation d'ÉPuration
TCDD	2,3,7,8-tétrachlorodibenzo-dioxine, ou dioxine « Seveso »
TEQ	Total Équivalent Toxique
TI	Thallium
UNICEM	Union Nationale des Industries de Carrières Et Matériaux de construction
UNIFA	Union des Industries de la Fertilisation
UNPG	Union nationale des producteurs de granulats
US	Unité de Service
Zn	zinc
γ-HCH	γ-hexachlorocyclohexane ou lindane

Table des matières

1 Avant-propos

3 Introduction : Le sol, interface dans l'environnement

Les services rendus par les sols

- 12 Le sol et la production végétale
- 14 Le sol, élément structurant du paysage
- 16 Le sol, source de matériaux
- 18 Le sol, support des infrastructures
- 20 Le sol et la conservation du patrimoine géologique et archéologique
- 22 Le pouvoir épurateur et filtrant du sol
- 24 Le sol et la réserve en eau : le rôle des zones tampons
- 26 La régulation des flux de gaz à effet de serre par le sol
- 28 Le sol, réservoir de biodiversité

La diversité des sols de France

35 La diversité naturelle des sols de France

- 36 • Les conditions de formation des sols
- 38 • La répartition des sols à différentes échelles

44 Les principales caractéristiques des sols

- 45 • La profondeur des sols
- 49 • La texture des sols
- 53 • La pierrosité des sols
- 54 • L'eau dans les sols
- 58 • La minéralogie des sols
- 62 • Les carbonates dans les sols
- 64 • Les éléments majeurs totaux des sols

L'état des sols de France et son évolution

72 Les facteurs d'évolution des sols sous l'action de l'Homme

- 73 • La pression démographique et ses conséquences sur les sols
- 76 • La pression exercée par les activités humaines et ses conséquences
- 78 • L'impact du changement climatique et des événements extrêmes

80 L'évaluation de la fertilité chimique des sols de France

- 82 • L'azote, le phosphore et le potassium dans les sols de France métropolitaine
- 87 • Les risques de carence en oligo-éléments pour les cultures dans les sols agricoles métropolitains
- 92 • Les cations échangeables et l'acidification des sols

104 Le sol, acteur de la biodiversité terrestre

- 105 • Les caractéristiques des sols déterminent la diversité des espèces végétales et animales terrestres
- 107 • La diversité des communautés microbiennes des sols
- 109 • La diversité des communautés d'invertébrés des sols
- 110 • Les perspectives

112 Les sols et le changement climatique

- 113 • Le carbone et la matière organique dans les sols de France
- 118 • Les émissions par les sols de méthane et de protoxyde d'azote

122 Les pertes en sol

- 122 • L'érosion : un processus majeur de la dégradation des sols
- 127 • Les glissements de terrain
- 133 • L'artificialisation et l'imperméabilisation des sols

139 Les sols, la santé et les écosystèmes

- 139 • Les éléments traces métalliques dans les sols de France
- 160 • Les polluants organiques persistants et les pesticides dans les sols de France
- 171 • Les sols réservoirs de bactéries pathogènes de l'Homme

174 Le tassement dans les sols de France

176 Conclusion

Dépôt légal : novembre 2011
ISBN : 978-2-7380-1295-1

L'état des sols de France

Ce livre 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. Il repose sur un important travail d'acquisition et d'exploitation de données réalisé par le Groupement d'Intérêt Scientifique Sol depuis 10 ans.

Après avoir décrit les différentes fonctions des sols dans nos sociétés puis leur diversité, le cœur de l'ouvrage examine et synthétise les données 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.

