

# LA CONNAISSANCE S'AMÉLIORE

mais le bilan reste toujours contrasté

## L'ÉTAT DES MILIEUX

INTRODUCTION p. 47

LES EAUX CONTINENTALES p. 49

LES EAUX MARINES p. 69

LES SOLS p. 77

L'ATMOSPHÈRE p. 89

L'AIR EXTÉRIEUR p. 99

L'AIR INTÉRIEUR p. 116



# Les sols

**L**es sols constituent la couche supérieure de la croûte terrestre. Ils sont en interaction permanente avec l'air, la flore et la faune, l'eau et les roches. L'altération des roches, sous l'effet combiné du climat, des organismes vivants, du relief et des activités humaines, forme les sols. Leur composition, leur structure et leur évolution différenciées déterminent leur grande variabilité.

Les sols sont au cœur des grands enjeux environnementaux à l'échelle de la Terre, comme la sécurité alimentaire, la lutte contre le changement climatique, la disponibilité en eau de qualité ou la préservation de la biodiversité. Ils fournissent les minéraux, la matière organique et l'eau indispensables à la croissance des plantes. La nature des sols détermine la diversité de la végétation naturelle et des espèces animales. Les systèmes agricoles et forestiers s'appuient majoritairement sur les propriétés des sols pour optimiser la production végétale. Les sols régulent les flux de gaz à effet de serre par l'intermédiaire de leurs micro-organismes en stockant notamment le carbone. Ils stockent également l'eau des pluies, régulent les écoulements d'eau, filtrent et dégradent naturellement les contaminants de l'environnement.

Les sols sont fragilisés, voire dégradés, sous l'action de la pluie, du vent et sous la pression exercée par les activités humaines (agriculture, industrie, construction, transport, activités domestiques).

Ainsi, **des quantités de sols importantes sont déplacées chaque année** sous l'effet de l'érosion hydrique subie notamment par les terres arables non protégées par la végétation lors de fortes pluies, ou suite à des glissements de terrain. L'artificialisation des espaces, conséquence directe des opérations d'aménagement (zones d'habitat, zones industrielles et commerciales, infrastructures de transport, etc.), contribue à ce processus de détérioration. L'**appauvrissement des sols** s'observe également au travers de l'évolution des quantités de matières organiques ou d'éléments nutritifs présents dans les sols ou encore de leur biodiversité. Enfin, en tant que support de la plupart des activités humaines, **les sols font l'objet de multiples contaminations**.



Sols calcaires et paysage agricole dans le Causse rouge en Aveyron.  
© Véronique Antoni.

## Des quantités importantes de sols disparaissent chaque année

### • L'érosion hydrique des sols à l'origine de 1,5 t/ha/an de perte en terre en moyenne

L'érosion des sols est un phénomène naturel principalement dû aux pluies dégradant les sols par déplacement des matériaux qui les composent. Souvent aggravés par les modifications paysagères et les pratiques (intensification de l'agriculture, surpâturage, déforestation, artificialisation), ces mouvements de terre peuvent prendre la forme de coulées boueuses pouvant aller jusqu'à recouvrir, à l'aval, les cultures et des infrastructures. La perte de la couche fertile des sols qui en résulte s'accompagne d'une diminution des rendements.

Ce phénomène contribue également à la dégradation de la qualité de l'eau, le ruissellement entraînant vers les milieux aquatiques les polluants contenus dans les sols (métaux, pesticides, micropolluants, etc.) sous forme dissoute ou fixés sur les particules du sol.

## DONNÉES OU MÉTHODOLOGIE

### L'acquisition de données sur les sols, un chantier de longue haleine

La France s'est dotée, au travers du **Groupe d'intérêt scientifique Sol (Gis Sol)** et de ses partenaires régionaux, de programmes d'inventaires et de surveillance des sols. En 2013, les relevés cartographiques des **référentiels régionaux pédologiques (Inventaire, gestion et conservation des sols - IGCS)** à l'échelle du 1/250 000 sont achevés pour 51 départements de la métropole, pour la bande littorale guyanaise et une partie des Antilles. La première campagne du **Réseau de mesures de la qualité des sols (RMQS)** s'est achevée en 2010, avec l'échantillonnage et l'analyse de

2 200 sites répartis selon un réseau systématique de mailles carrées de 16 km de côté en France métropolitaine et d'une vingtaine de sites dans les Antilles. Les échantillons de sol de ces programmes sont stockés et archivés dans un conservatoire, ce qui permettra de mener *a posteriori* de nouvelles analyses. La **Base de données des analyses de terre (BDAT)** centralise les analyses réalisées sur les sols agricoles et rassemble 25 millions de résultats concernant plus de 1,3 million d'échantillons de sols (1990 à 2009).

L'érosion hydrique des sols est estimée à 1,5 t/ha/an en moyenne en France avec de fortes hétérogénéités selon les territoires (Figure 44). Les vignobles, et dans une moindre mesure les terres cultivées et les vergers, sont les plus affectés.

Près de la moitié des régions ont plus de 20 % de leur surface affectés par une érosion annuelle supérieure à 2 t/ha : les régions de cultures intensives (Centre, Haute-Normandie, Île-de-France, Nord - Pas-de-Calais, Picardie), et les plaines cultivées de Midi-Pyrénées, ainsi que les régions d'élevage intensif de l'Ouest (Bretagne, Pays de la Loire) ou extensif de Basse-Normandie. Les zones limoneuses du Nord et la vallée de la Garonne sont ainsi fortement exposées aux pertes en terre par érosion (Figure 45).

L'érosion des sols peut cependant être limitée, notamment en favorisant la constitution de mottes, en couvrant le sol par un couvert végétal en inter-culture, en binant les sols au printemps, en limitant le tassement des sols et enfin, en améliorant leur taux de matières organiques.

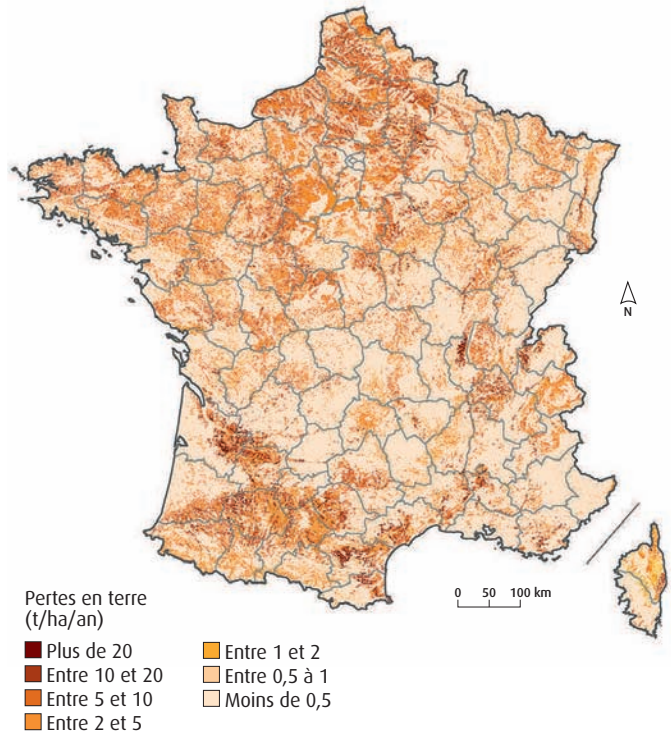
**• Près d'un cinquième du territoire métropolitain particulièrement sensible aux glissements de terrain**

Les glissements de terrain surviennent lors du déplacement de sols ou de roches déstabilisés générés par des phénomènes naturels climatiques, géomorphologiques ou géologiques, ou par les activités humaines. Les glissements de terrain apparaissent dans des éboulis fins, des moraines, ou des roches très fracturées et altérées. Certains matériaux sont particulièrement sensibles aux glissements de terrain, comme les argiles, les marnes, les gypses ou les formations superficielles d'altérites. Ces déplacements de matériaux sont généralement lents (quelques millimètres à quelques mètres par an). Toutefois, ils peuvent être plus dévastateurs (5 mètres par seconde) lorsqu'ils prennent la forme de coulées ou de laves torrentielles.

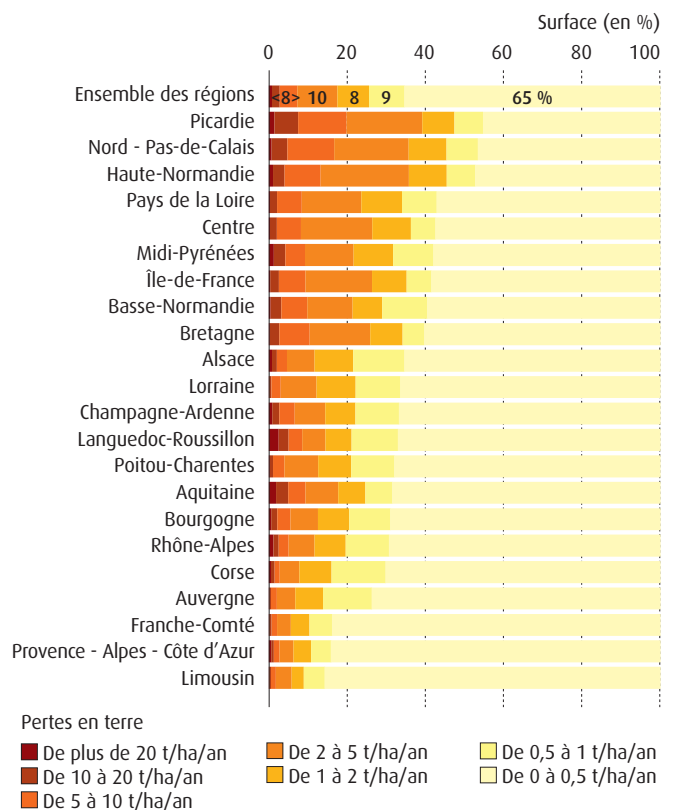
L'ensemble des régions françaises est sensible aux glissements de terrain et aux écoulements avec néanmoins de fortes disparités selon les territoires (Figure 46) - (voir chap. « Risques naturels », p. 209). La susceptibilité des versants aux glissements de terrain et aux écoulements est estimée faible ou très faible pour deux tiers du territoire de la France métropolitaine, moyenne pour environ 14 % du territoire et élevée ou très élevée pour un peu moins d'un cinquième. Les zones de montagne (Alpes, Corse, Massif central, Pyrénées, Vosges) montrent une prédisposition particulière. Trois régions sont particulièrement exposées aux glissements de terrain sur plus de 45 % de leur territoire : Corse, Provence - Alpes - Côte d'Azur, Rhône-Alpes. A contrario, cinq régions (Centre, Haute-Normandie, Île-de-France, Pays de la Loire, Poitou-Charentes) semblent assez peu sensibles aux glissements de terrain, la susceptibilité y étant estimée très faible pour plus de 80 % de leur surface.

Aux Antilles et à la Réunion, les glissements évoluent souvent en coulées de boues ou en laves torrentielles lorsque les terrains argileux sur fortes pentes sont soumis aux abondantes précipitations tropicales.

**Figure 44 : pertes en terre par érosion hydrique des sols**

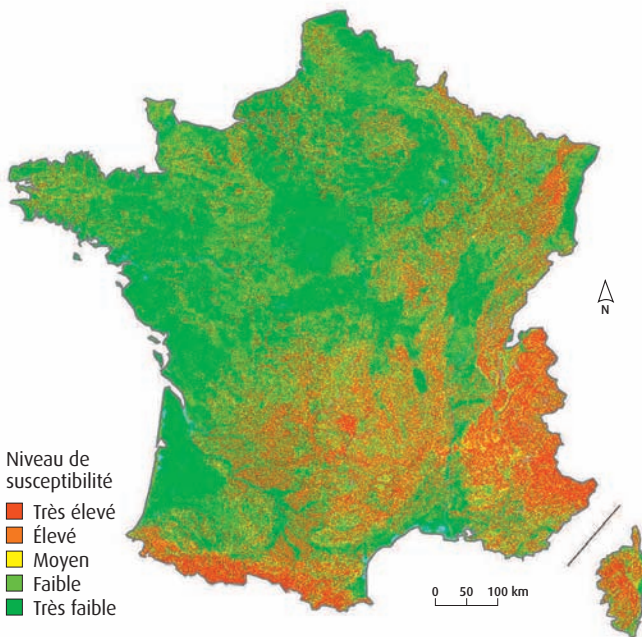


**Figure 45 : surfaces concernées par les pertes en terre par érosion hydrique des sols**





**Figure 46 : susceptibilité des versants aux glissements de terrain**



Note : la susceptibilité des versants aux glissements de terrain et aux écoulements permet de localiser les zones les plus sensibles. Elle résulte de la cartographie des 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.

Source : JRC, BGR, CNR-EOST, CNR-IRPI, © Günther, A., Reichenbach, P., Malet, J.-P., Van Den Eeckhaut, M., Hervás, J., Dashwood, C., Guzzetti, F. - ELSUS1000\_v1, 2013. Traitements : SOeS, 2013.

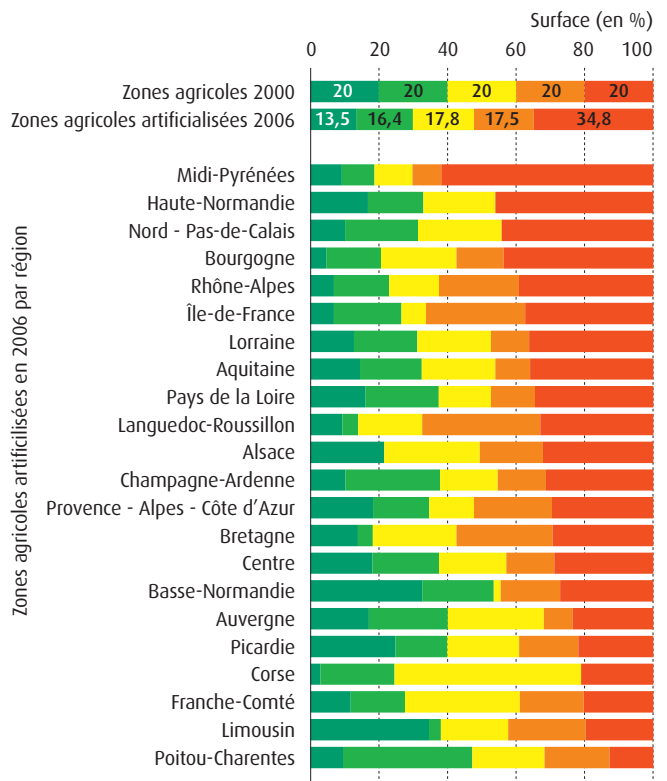
**L'artificialisation des sols s'opère aux dépens des sols agricoles aux meilleures potentialités agronomiques**

Les opérations d'aménagement mobilisent chaque année des surfaces importantes d'espaces naturels et agricoles. L'artificialisation des sols qui en résulte (impermeabilisation, restructuration, etc.) perturbe les sols et entrave leurs fonctions de manière très souvent irréversible. Au-delà, elle a des conséquences importantes sur l'environnement (voir chap. « Artificialisation des sols », p. 181). Le recouvrement des sols par des constructions ou des matériaux non poreux de type béton ou bitume imperméabilise la surface des sols. Le ruissellement de l'eau est ainsi favorisé au détriment de son infiltration. L'érosion des sols, les coulées d'eau boueuse, le risque d'inondation et le transfert de sédiments contaminés (engrais, métaux, pesticides) vers les cours d'eau augmentent alors. L'artificialisation des sols participe également au changement climatique en provoquant un déstockage rapide de carbone lorsque les sols ne sont pas très vite végétalisés ou recouverts par un revêtement. En constante augmentation, les surfaces artificialisées représentent 9,1 % du territoire métropolitain en 2012 (source : Teruti-Lucas).

Entre 2000 et 2006, la progression des espaces artificialisés s'est faite à 90 %, au détriment des terres agricoles (source : CORINE Land Cover) et a affecté, dans plus d'un tiers des cas, les sols disposant des meilleures potentialités agronomiques (Figure 47). L'analyse régionale met en exergue de fortes disparités entre les territoires. Dans un premier groupe de dix régions (Aquitaine, Bourgogne, Haute-Normandie, Île-de-France, Languedoc-Roussillon, Lorraine, Midi-Pyrénées, Nord - Pas-de-Calais,

Pays de la Loire, Rhône-Alpes), l'artificialisation a concerné, sur la période 2000-2006, en priorité les sols agricoles ayant les meilleures potentialités agronomiques (entre 33 et 62 %). Dans un second groupe (Alsace, Basse-Normandie, Bretagne, Centre, Champagne- Ardenne, Provence - Alpes - Côte d'Azur), un tiers des sols agricoles artificialisés entre 2000 et 2006 étaient de très bonne qualité agronomique. Enfin, pour les autres régions (Auvergne, Corse, Franche-Comté, Limousin, Picardie, Poitou-Charentes), l'artificialisation des sols agricoles a affecté principalement les sols de qualité agronomique intermédiaire ou médiocre.

**Figure 47 : surfaces agricoles régionales artificialisées sur la période 2000-2006, réparties par réservoir utile en eau des sols**



Potentialités agronomiques des sols estimées par leur réservoir utile en eau  
 ■ Très faible ■ Faible ■ Moyenne ■ Forte ■ Très forte

Note : les distributions régionales ordonnées des réservoirs utiles en eau (RU) des sols agricoles en 2000, pondérées par les surfaces agricoles, ont été découpées par des quintiles, représentant chacune 20 % des surfaces agricoles en 2000. Ces quintiles ont été appliqués aux RU des sols agricoles artificialisés entre 2000 et 2006, pour découper les distributions régionales en cinq groupes : RU très faible (surface régionale ayant une RU inférieure au quintile 1), etc. Le RU en eau des sols représente un volume qui peut contenir durablement une quantité d'eau retenue par le sol et que celui-ci peut restituer aux plantes, en vue de leur alimentation ou du transport des éléments nutritifs nécessaires à leur croissance (azote, phosphore, etc.). Elle donne une bonne approximation de la qualité des sols.

Source : SOeS-Gis Sol. Traitements : SOeS, 2010.

**Les fonctions des sols perturbées par de nombreux facteurs**

**Le phosphore et l'azote dans les sols : nécessité agronomique et préoccupation environnementale**

L'azote, le phosphore et le potassium sont les trois nutriments indispensables à la croissance des végétaux. Ils sont issus de l'altération des roches et de la décomposition des plantes. En

milieu cultivé, leurs teneurs dans les sols diminuent lors des récoltes. L'apport de fertilisants organiques (fumiers, lisiers, boues d'épuration) ou minéraux est alors nécessaire.

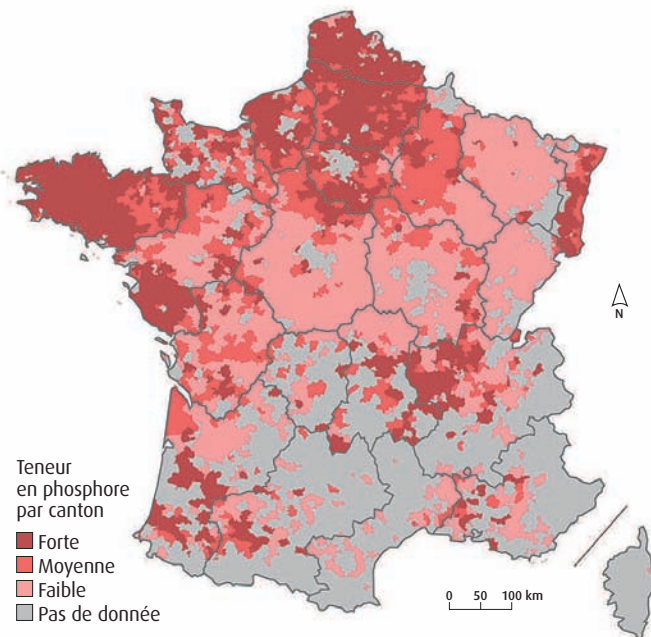
Toutefois, des apports excessifs peuvent avoir des effets néfastes pour les milieux aquatiques (voir chap. « Les eaux continentales », p. 55, et chap. « Les eaux marines », p. 73) et pour l'air. **Lorsque les excès d'azote et de phosphore se conjuguent, ils provoquent l'eutrophisation des eaux de surface** par le développement excessif de la végétation aquatique et l'asphyxie des milieux.

Les livraisons d'engrais azotés ont augmenté de 60 % entre 1970 et 1990, avant de se stabiliser et de baisser légèrement depuis les années 2000. En quarante ans, les apports azotés sont ainsi passés de 57 kg d'azote/ha fertilisable en 1972 à 77 en 2012. En 2010, les surplus azotés touchent le quart nord-ouest de la France et le sud de l'Aquitaine (voir chap. « Les eaux continentales », p. 57).

Les apports de phosphore ont chuté de 77 % sur la même période, passant progressivement de 31 à 7 kg de phosphore par hectare fertilisable en 2012 (Figure 48). Cette forte baisse s'explique d'abord par le recours aux analyses de terre pour raisonner la fertilisation, qui se diversifie par ailleurs. L'augmentation du coût des phosphates de roche (+ 700 % en 2008, puis effondrement lié à la crise économique et nouvelle hausse depuis 2011), conséquence de la hausse de la demande mondiale, explique également le moindre recours à ce fertilisant minéral.

Entre 2005 et 2009, 21,5 % des cantons présentent de fortes teneurs en phosphore dans leurs sols, 13,5 % des teneurs moyennes et 25 % des teneurs faibles (Figure 49). Trois régions sont particulièrement affectées par des fortes teneurs : la Bretagne (78 % des cantons), le Nord - Pas-de-Calais (66 %) et l'Alsace (47 %). Ainsi, pour la plupart des sols de ces territoires, quelles que soient les plantes cultivées, les teneurs en phosphore sont telles qu'elles semblent être suffisantes à leurs exigences pour plusieurs années. En Bretagne, ces surplus phosphorés s'expliquent par l'élevage intensif (concentration des élevages et épandage de leurs effluents) depuis quarante ans, alors que dans le Nord et en Alsace, ils résultent davantage de l'usage ancien des scories industrielles. Mais pour d'autres régions (Bourgogne, Franche-Comté, Midi-Pyrénées, etc.), les teneurs en phosphore des sols de la majorité des cantons semblent insuffisantes pour assurer des rendements convenables quel que soit le type de culture.

Figure 49 : teneurs en phosphore dans les sols sur la période 2005-2009



Note : les classes sont définies en fonction de l'exigence des plantes et des caractéristiques des sols. Les résultats par canton indiquent une tendance, mais peuvent néanmoins masquer une diversité intra-cantonale importante.

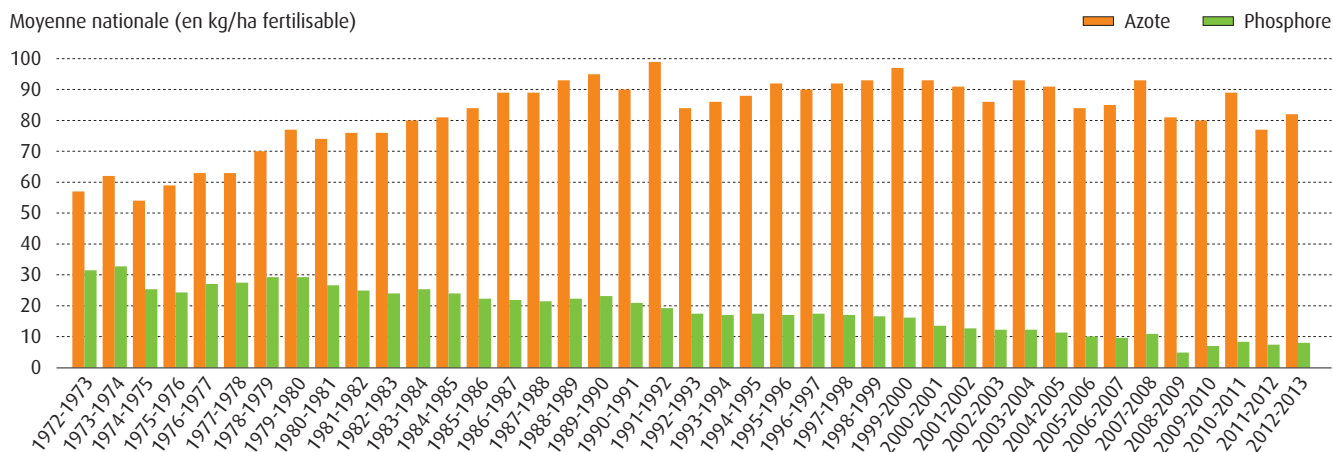
Source : Gis Sol, BDAT, 2009. Traitements : SOeS, 2013.

### • La biodiversité, un indicateur de qualité des sols

Les organismes vivants présents dans les sols assurent ensemble un rôle essentiel au bon fonctionnement des écosystèmes. Les **vers de terre** réorganisent l'agencement des composants du sol (eau, air, matières minérales et organiques) en dégradant et en brassant les matières organiques. La résistance à l'érosion, la production végétale et l'activité microbienne s'en trouvent améliorées. Certains micro-organismes décomposent la matière organique, recyclent le carbone, l'azote, le phosphore ou le potassium, tandis que d'autres dégradent les contaminants.

En termes de diversité, un sol contient plusieurs milliers d'**espèces animales** et plusieurs dizaines à plusieurs centaines de milliers d'**espèces bactériennes** et de **champignons**. La

Figure 48 : évolution des livraisons d'engrais minéraux azotés et phosphatés



Note : France métropolitaine.

Source : Unifa, 2013. Traitements : SOeS, 2013.

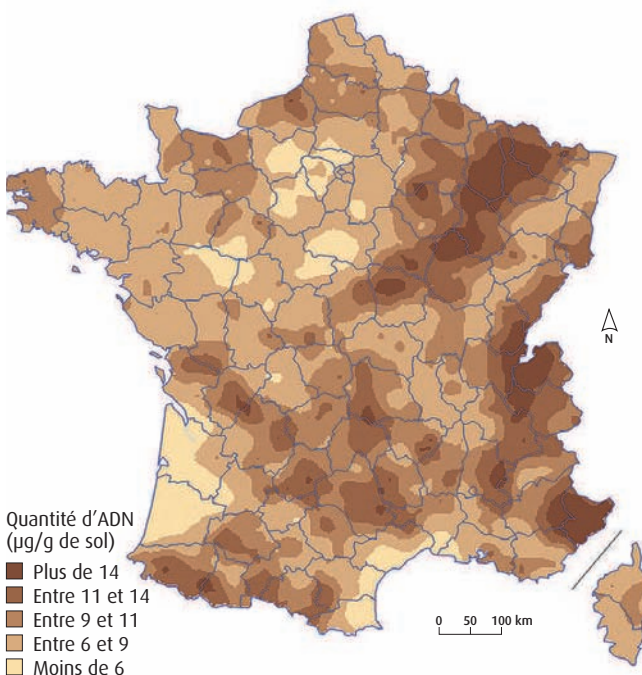
quantité (biomasse) d'organismes vivants présents dans le sol d'une prairie permanente peut représenter 1,5 t/ha de faune du sol, 2,5 t/ha de bactéries et 3,5 t/ha de champignons, soit respectivement un tiers, 60 % et 80 % de la quantité de végétation récoltée dans une prairie. Cette biodiversité est cependant menacée par les nombreuses pressions résultant des activités humaines : artificialisation et imperméabilisation des sols (routes, constructions, parkings, etc.), mise en culture, déforestation, épandages de pesticides ou de boues d'épuration chargées de métaux ou de micro-organismes pathogènes, tassement ou érosion des sols liés à la gestion agricole ou forestière.

Les vers de terre constituent d'excellents indicateurs de l'état et des usages de l'écosystème du sol de par leurs activités (recyclage de la matière organique, régulation de la circulation de l'eau, stimulation de l'activité microbienne, etc.). Les labours notamment réduisent leur nombre dans les sols cultivés, tandis que les amendements organiques au contraire les stimulent. Des programmes de recherche sur les bio-indicateurs des sols ont été financés par les pouvoirs publics. Ainsi, l'Observatoire participatif des vers de terre (OPVT) a acquis des références nationales sur cet aspect de la biodiversité ordinaire en milieu agricole ou naturel. Fin 2013, il rassemble plusieurs centaines d'observations sur les lombrics.

La biomasse microbienne des sols est en moyenne plus importante dans les prairies (12 µg/g de sol) que dans les forêts (10 µg/g de sol) ou les cultures (9 µg/g de sol) – (Figures 50 et 51).

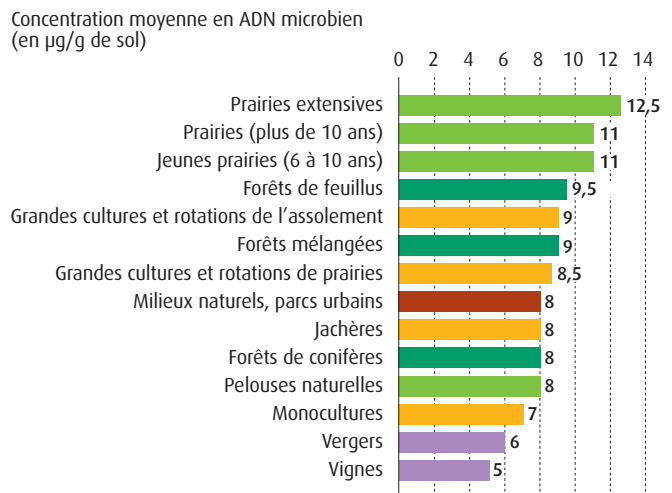
L'effet du labour altère la diversité des champignons, mais stimule au contraire la diversité bactérienne des sols cultivés, de sorte que celle-ci peut y être plus élevée que dans les sols forestiers. Les bouleversements induits par le labour peuvent, dans certains cas, stimuler plutôt des bactéries opportunistes et indicatrices d'environnements perturbés. L'abondance microbienne des sols est également améliorée par le mélange d'essences forestières en sylviculture ou par les amendements organiques, les rotations et les intercultures dans les systèmes cultivés.

Figure 50 : biomasse microbienne des sols



Source : © Inra Dijon / plate-forme GenoSol – Gis Sol, 2012. Traitements : Gis Sol – SOeS, 2012.

Figure 51 : biomasse microbienne moyenne des sols par type d'usage du sol



Note : ces résultats proviennent de l'analyse de 1974 échantillons de sols issus du Réseau de mesures de la qualité des sols (RMQS) ; France métropolitaine, hors Corse.

Source : © Inra Dijon, plate-forme GenoSol – Gis Sol, 2012.

### • Le carbone organique des sols en diminution dans plus de 20 % des cantons

Les organismes vivants des sols transforment les débris végétaux en matières organiques. Celles-ci se décomposent et se minéralisent plus ou moins rapidement (quinze ans en moyenne) selon le climat et le drainage des sols. Les matières organiques augmentent la fertilité des sols, leur résistance à l'érosion et au tassement, favorisent le développement de la biodiversité et piègent les polluants (métaux, pesticides, etc.).

Composée de 58 % de carbone organique, les matières organiques participent à l'atténuation du changement climatique en stockant le carbone dans les sols. Le stock de carbone organique est estimé à 3,75 Gt (plus ou moins 1,27 Gt) dans la couche superficielle du sol en France métropolitaine, soit en moyenne 7,4 kg/m<sup>2</sup> (soit 74 t/ha). Ce stock dépend essentiellement du type de sol et de son occupation. Plus faibles sous culture permanente (3,4 kg/m<sup>2</sup>), moyens dans les terres arables et les zones agricoles (environ 6 kg/m<sup>2</sup>), les stocks de carbone organique les plus élevés (entre 8 et 9 kg/m<sup>2</sup>) sont observés dans les sols de prairies, dans les forêts et les milieux à végétation arbustive et/ou herbacée. Les pelouses et pâturages naturels sont ainsi particulièrement riches en matières organiques.

Au-delà de la simple occupation des sols, **certaines pratiques favorisent en outre le stockage du carbone dans les sols**, comme les cultures intermédiaires, l'enherbement des inter-rangs dans les vignes et les vergers, ou l'implantation de haies. D'autres pratiques visant le même objectif en termes de stockage du carbone présentent néanmoins un impact négatif sur l'environnement. C'est notamment le cas des techniques culturales sans labours qui favorisent parfois le tassement des sols ou l'usage de pesticides pour lutter contre la prolifération d'adventices ou de ravageurs.

Cette dépendance entre occupation du sol, pratiques et niveaux de stocks de carbone se retrouve dans la distribution spatiale des stocks de carbone organique (Figure 52). Les plus importants (plus de 13 kg/m<sup>2</sup>) se rencontrent dans les sols de montagne (Alpes, Jura, Massif central, Pyrénées, Vosges, Ardennes). En

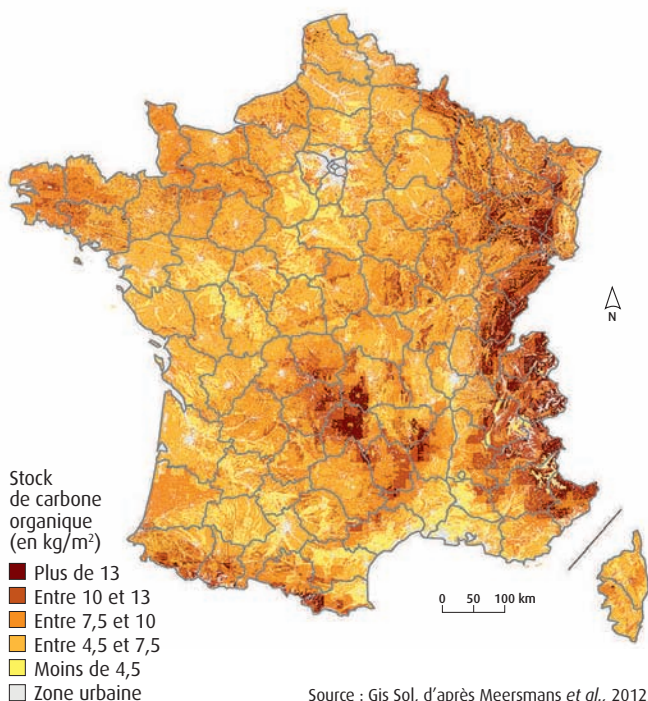


effet, la vitesse de minéralisation des matières organiques y est plus faible du fait des conditions défavorables pour l'activité des micro-organismes (faibles températures, humidité excessive).

Si l'occupation du sol et le climat déterminent les stocks de carbone des sols, la cinétique de l'évolution de ces stocks, suite à des changements d'usage ou de pratiques agricoles, n'est ni linéaire ni symétrique. Ainsi, au bout de vingt ans, la conversion de terres arables en prairie ou en forêt induit un stockage de carbone dans les sols de 0,5 t C/ha/an. À l'inverse, la mise en culture de prairie déstocke 1 t C/ha/an.

Entre les périodes 1995-1999 et 2000-2004, la teneur en carbone organique des sols a diminué dans 21,4% des cantons de France métropolitaine, notamment sur la façade atlantique, au Nord et dans l'Est.

**Figure 52 : stocks de carbone organique dans la partie superficielle du sol**



## Les sols, des réceptacles de contaminants, mais aussi des vecteurs de propagation de polluants

Au-delà des produits épandus par le secteur agricole (pesticides, métaux contenus dans certains engrais, polluants présents dans les boues), les sols sont également contaminés par les dépôts de polluants émis dans l'atmosphère par les industries, les transports, le chauffage, etc. À ces pollutions diffuses peuvent s'ajouter, localement, des pollutions ponctuelles essentiellement d'origine industrielle (rejets, accidents de maintenance ou de transport, mauvais confinements).

### • Les contaminations diffuses de pesticides

L'utilisation prolongée de polluants organiques persistants peut être à l'origine, bien après leur usage, d'une imprégnation importante des sols. C'est le cas des pesticides organochlorés, comme le lindane ou la chlordécone, qui ont surtout été utilisés

comme insecticides en agriculture et dans les jardins (traitements des sols, des semences et du système foliaire), comme produits antiparasitaires ou pour protéger le bois.

Toxiques et se dégradant difficilement, ces molécules s'accumulent dans les chaînes alimentaires. Peu solubles dans l'eau, les pesticides organochlorés se fixent également aisément sur la matière organique du sol. Particulièrement volatiles, ils se déplacent en suspension dans l'air dès le traitement, ou sous forme de particules emportées par l'érosion éolienne ou par volatilisation. Ces polluants se retrouvent dans les eaux superficielles (cours d'eau, etc.) ou les eaux souterraines (*voir chap. « Les eaux continentales », p. 58*).

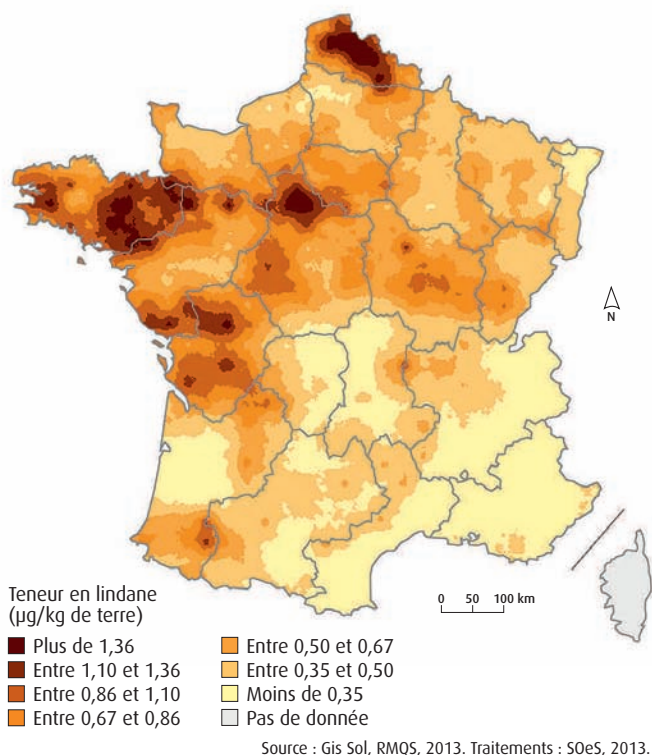
### La persistance du lindane dans le quart nord-ouest en métropole

Le lindane est un pesticide utilisé pendant plus de cinquante ans. Cette molécule de synthèse est considérée comme polluant organique persistant (Protocole d'Aarhus, 1992), toxique pour l'Homme et dangereux pour l'environnement. Globalement très peu mobile dans les sols, la nature et le degré d'humidité de ces derniers influent sur le déplacement du lindane dans l'air.

Bien que son interdiction en agriculture remonte à 1998 en France, des résidus subsistent dans les sols métropolitains (*Figure 53*) avec des valeurs estimées allant jusqu'à 5 µg/kg de sol. Les valeurs les plus élevées localisées dans le quart nord-ouest sont attribuées à un large usage du lindane comme insecticide dans les zones de culture intensive (Nord - Pas-de-Calais, Beauce) ou comme antiparasitaire dans les zones d'élevage intensif de volailles et de porcins (Bretagne). Les sols bretons, riches en matière organique, ont ainsi fortement retenu le lindane épandu *via* les effluents d'élevage.

À l'opposé, les valeurs les plus faibles sont observées dans les zones forestières (Auvergne, Limousin, Provence - Alpes - Côte d'Azur) et surtout dans les landes de Gascogne où les sols sableux, acides et pauvres en matière organique retiennent peu le lindane.

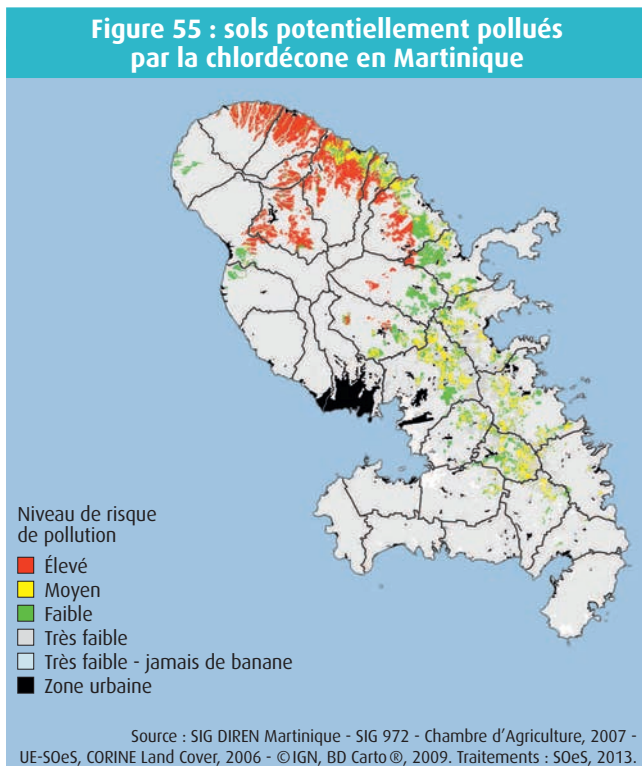
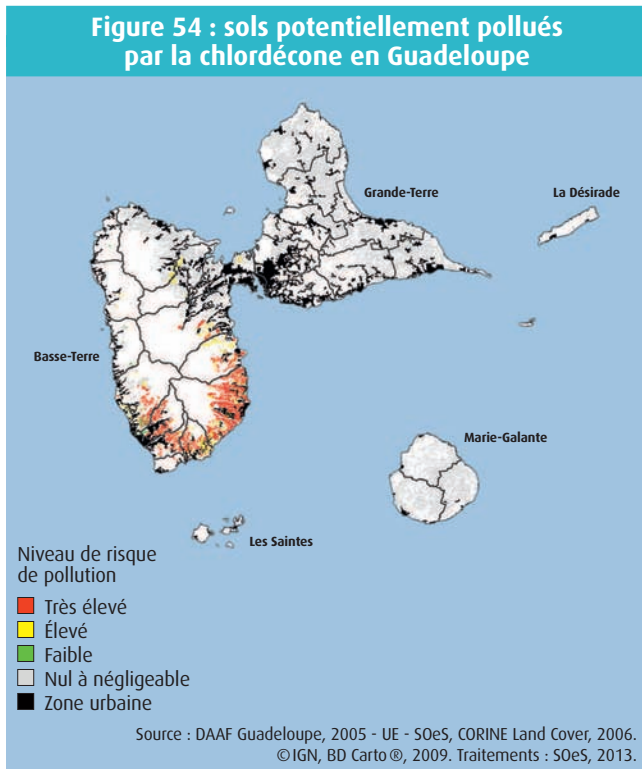
**Figure 53 : teneurs en lindane dans les sols**





### La contamination chronique par la chlordécone aux Antilles : un problème environnemental, sanitaire et économique

Aux Antilles françaises, l'utilisation de la chlordécone il y a plus de vingt ans pour lutter contre le Charançon des bananiers (*Cosmopolites sordidus*), un insecte ravageur, a contaminé les sols, les eaux et les écosystèmes. **La pollution chronique des sols concerne près d'un cinquième de la surface agricole utilisée de Guadeloupe (Figure 54) et deux cinquièmes en Martinique (Figure 55).**



Cette molécule est classée comme polluant organique persistant (Programme des Nations unies pour l'environnement, 2007). Elle est désormais reconnue comme perturbateur endocrinien et cancérigène potentiel. La population antillaise est exposée *via* l'ingestion d'eau ou d'aliments contaminés dans les chaînes alimentaires. Peu mobile, peu soluble, très peu volatile, la chlordécone se fixe durablement sur la matière organique du sol et se dégrade extrêmement lentement dans les sols aérés. La contamination des cultures par la chlordécone contenue dans les sols, qui dépend de nombreux facteurs (espèce, organe, niveau de pollution, type de sol et d'argiles, pratiques culturales, etc.), touche surtout les racines et les tubercules. L'accompagnement et le conseil des populations pour minimiser les risques de transfert de la chlordécone vers les chaînes alimentaires figurent parmi les mesures visant à limiter l'exposition des populations consommant régulièrement les légumes racines de leurs jardins. Les diagnostics du programme jardins familiaux (Jafa) ont ainsi permis de conseiller les populations en fonction des teneurs des sols en chlordécone : aucune restriction (moins de 0,1 mg/kg de sol sec), culture et consommation de légumes racines non recommandées (plus de 0,1 mg/kg), culture et consommation de légumes racines, cucurbitacées, laitues et canne à sucre fortement déconseillées (supérieures à 1 mg/kg). Les autres espèces de fruits et légumes peuvent être cultivées et consommées sans restriction, quel que soit le niveau de pollution du sol.

### • Les métaux : teneurs naturelles et apports anthropiques

Les métaux (cadmium, mercure, plomb, etc.) et métalloïdes (bore, arsenic, etc.) sont naturellement présents dans les sols suite à l'altération des roches. Les rejets industriels, urbains ou dus aux transports ainsi que les épandages agricoles (engrais minéraux, effluents d'élevage, produits phytosanitaires) accentuent la contamination diffuse des sols par ces éléments (Tableau 3). **Toxiques à des doses variables pour l'Homme, la faune et la flore, ils peuvent contaminer les écosystèmes *via* les chaînes alimentaires et la ressource en eau.** Leur mobilité dans les sols et leur biodisponibilité, autrement dit leur faculté à être absorbés par un organisme vivant, dépendent notamment de leur état chimique et des propriétés des sols. Ainsi, le zinc et le cadmium sont généralement considérés comme assez mobiles et biodisponibles, notamment en conditions acides, alors que le cuivre et le plomb sont davantage piégés par les constituants organiques et minéraux et s'accumulent dans la partie superficielle du sol.

**Tableau 3 : part des différentes sources de contamination dans l'estimation des apports de cadmium, de mercure et de zinc sur les sols agricoles**

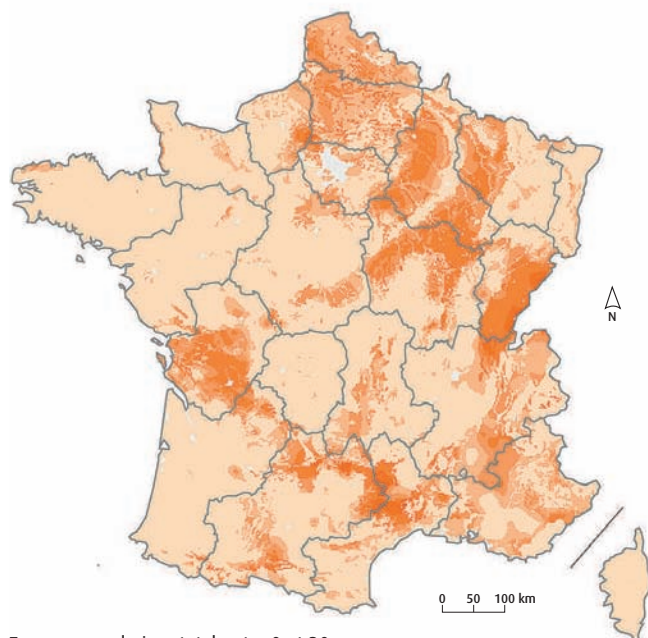
En %	Cadmium	Mercure	Zinc
Traitements phytosanitaires	0	0	3
Déjections animales	25	50	77
Boues et composts	5	17	4
Engrais minéraux	54	8	4
Amendements calciques et magnésiens	2	4	1
Retombées atmosphériques	14	21	11
<b>Total</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>

Source : Ademe-Sogreah, 2007.

Environ 15 200 t de zinc et 4 900 t de cuivre sont apportées annuellement en moyenne sur les sols agricoles. Pour le chrome, le nickel et le plomb, ces apports se situent entre 500 et 1 000 t. Ils sont bien plus faibles pour l'arsenic, le cadmium, le mercure, le molybdène et le sélénium (moins de 150 t) – (source : bilan des flux de contaminants entrant sur les sols agricoles de France métropolitaine - Ademe-Sogreah, 2007).

Les teneurs en cadmium des sols (Figure 56) résultent de l'altération des roches et de l'évolution des sols, comme ceux issus des craies et des calcaires jurassiques (Champagne, Charente, Causses, Jura), et aussi de contaminations diffuses d'origine industrielle (Nord) ou agricoles (usage d'engrais minéraux dans les régions céréalières dans le Nord et Sud-Ouest de la France et en Alsace). La part la plus importante des apports anthropiques en cadmium (environ 55 %) provient d'impuretés présentes dans les engrais minéraux et, dans une moindre mesure, d'effluents d'élevages et de retombées atmosphériques.

Figure 56 : teneurs en cadmium dans les sols



Teneur en cadmium total entre 0 et 30 cm de profondeur (mg/kg)

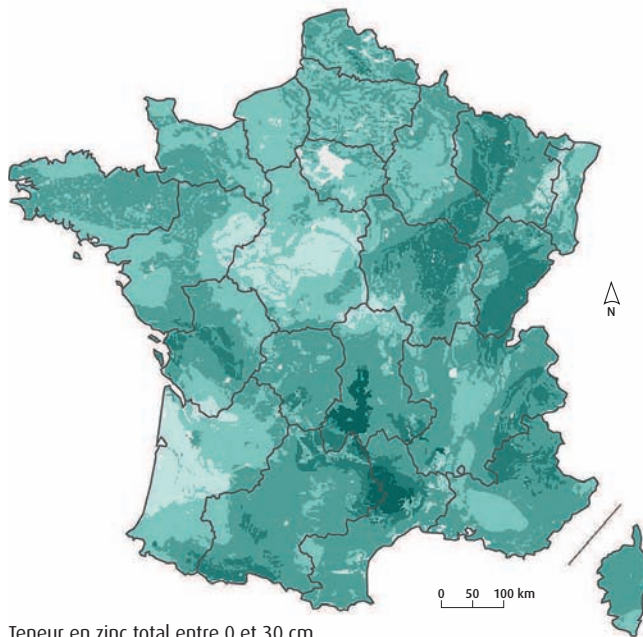
- Plus de 2
- Entre 1 et 2
- Entre 0,5 et 1
- Entre 0,35 et 0,5
- Entre 0,25 et 0,35
- Moins de 0,25
- Pas de donnée

Source : Gis Sol, RMQS, 2013. Traitements : SOeS, 2013

Les teneurs naturelles des sols en zinc sont faibles, hormis dans les sols des roches cristallines (Massif central) ou jurassiques (Causses, Jura, etc.). Aussi, les fortes teneurs en zinc mesurées en Bretagne, Lorraine, Nord - Pas-de-Calais sont d'origine anthropique (mines, industrie, épandages agricoles, trafic routier, toitures, etc.) - (Figure 57). Près de 80 % des apports de zinc sur les sols sont attribués aux déjections animales, du fait des compléments alimentaires utilisés dans les élevages bovins, porcins ou de volailles.

**L'épandage de déjections animales (50%), de boues et composts (17%), ainsi que les retombées atmosphériques (21 %) représentent la quasi-totalité des apports de mercure sur les sols (Figure 58).** Particulièrement volatil, le mercure peut être émis lors de la combustion de déchets contaminés ou de combustibles fossiles et ainsi contaminer les sols et

Figure 57 : teneurs en zinc dans les sols

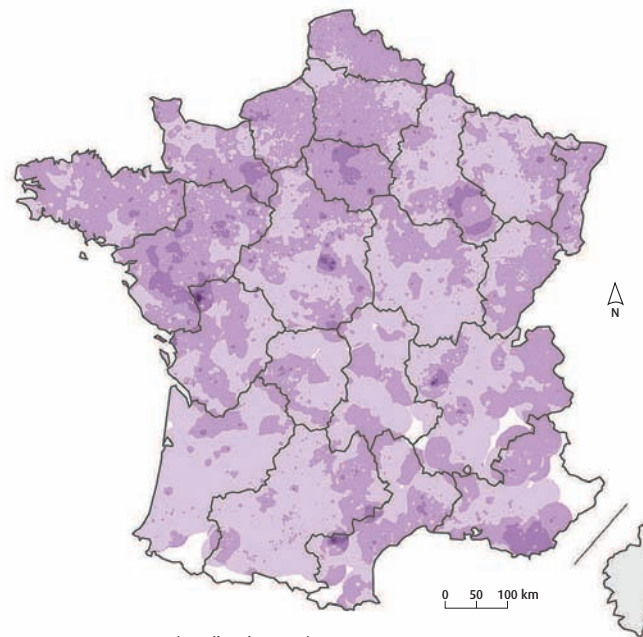


Teneur en zinc total entre 0 et 30 cm de profondeur (mg/kg)

- Plus de 250
- Entre 150 et 250
- Entre 100 et 150
- Entre 60 et 100
- Entre 30 et 60
- Moins de 30
- Pas de donnée

Source : Gis Sol, RMQS, 2013. Traitements : SOeS, 2013.

Figure 58 : teneurs en mercure dans les sols agricoles



Teneur en mercure (mg/kg de terre)

- Plus de 2,46
- Entre 0,97 et 2,46
- Entre 0,42 et 0,97
- Entre 0,15 et 0,42
- Entre 0,05 et 0,15
- Moins de 0,05
- Pas de donnée

Note : ces résultats proviennent de la collecte nationale d'analyses d'éléments traces métalliques (BDETM), qui agrège les analyses de 73 400 horizons de surface de sols cultivés susceptibles de recevoir des boues d'épuration, prélevés entre 1990 et 2010.

Source : Gis Sol, BDETM, 2010. Traitements : SOeS, 2013.

l'environnement suite aux retombées atmosphériques. Utilisé dans l'industrie pour la production du chlore et de la soude caustique (« chlore-alcali »), la métallurgie ou la transformation de pâte à papier, le mercure peut également se trouver dans certains effluents industriels. Ce métal a tendance à demeurer dans les horizons de surface du sol, car il est rapidement adsorbé sur la matière organique ou sur les oxydes (fer, aluminium, manganèse). Certaines bactéries peuvent aussi transformer le mercure présent dans les sols ou les sédiments en méthylmercure, substance toxique pour l'Homme. Les teneurs médianes en mercure dans les sols agricoles sont faibles (entre 0,01 et 0,30 mg/kg de terre fine).

En Guyane, les sols sont naturellement riches en mercure (environ 0,4 mg/kg de terre fine). L'extraction aurifère, surtout clandestine, et l'érosion des sols accélérée par la déforestation sont à l'origine de sa dispersion dans l'environnement (eau, sédiments, biodiversité).

### • Le recyclage des boues d'épuration : une valorisation agronomique mais un risque de contamination de l'environnement

L'épandage de boues, de composts et de déjections animales est une source d'émission importante de métaux dans les sols (Tableau 3). En sus des métaux, ces déchets organiques peuvent également contenir des micropolluants organiques (pesticides, HAP), des micro-organismes pathogènes et des polluants émergents (résidus pharmaceutiques, perturbateurs endocriniens). Aussi, malgré l'intérêt environnemental que

représente l'épandage de boues d'épuration sur des parcelles agricoles, s'agissant en effet d'une alternative à l'incinération ou à l'enfouissement des déchets, cette solution peut présenter un risque sanitaire pour l'Homme et pour l'environnement. C'est pourquoi la réglementation relative à l'épandage agricole des boues d'épuration impose de respecter des seuils pour différents contaminants métalliques et organiques afin de limiter les risques de contamination des sols.

Les **boues d'épuration** proviennent du traitement des eaux usées issues de l'assainissement collectif, des activités industrielles ou agricoles. Près de 1 Mt de matière sèche (ms) issue du traitement des eaux usées domestiques ont été produites en 2012. Le secteur agricole en a recyclé près de 70 % comme fertilisant (soit 725 000 t ms). Les teneurs en métaux (cadmium, chrome, cuivre, mercure, nickel, plomb, zinc) sont analysées dans les boues et dans les sols avant tout épandage. Pour le mercure, la teneur limite est de 10 mg/kg de ms dans les boues et de 1 mg/kg de ms dans les sols avant épandage.

Les **exploitants d'installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE)** sont tenus de déclarer chaque année les quantités de polluants qu'ils rejettent dans les milieux, notamment ceux destinés à l'épandage. Cette déclaration précise les polluants contenus dans les déchets soumis aux opérations d'élimination de type « traitement en milieu terrestre » (biodégradation de déchets liquides ou de boues, hors effluents d'élevage). Ainsi, en 2011, 164 exploitants ont déclaré avoir émis, via l'épandage de déchets, environ 3 000 t de métaux, 3 000 t de phosphore total, 3 000 t d'azote total, ainsi que 17 kg de polychlorobiphényles (PCB) - (Tableau 4). 46 % de ces exploitants relèvent de l'industrie agroalimentaire, 30 % du

Tableau 4 : émissions de polluants dans le sol en 2011, déclarées par les ICPE

En kg		Secteur						
Famille de polluants	Polluant	Bois, papier, carton, imprimerie	Construction	Eau, déchets et dépollution	Industries agroalimentaires	Industries chimiques et pharmaceutiques	Tertiaire et services	Total
Alkylphénols	Nonylphénols			38	1			39
<b>Azote total (N)</b>		<b>121 608</b>	<b>52 886</b>	<b>1 651 791</b>	<b>805 109</b>	<b>221 992</b>	<b>311 628</b>	<b>3 165 014</b>
<b>Biphényles polychlorés (PCB)</b>		<b>7</b>		<b>9</b>		<b>1</b>	<b>1</b>	<b>17</b>
<b>Phosphore total (P)</b>		<b>64 302</b>	<b>76 003</b>	<b>1 988 434</b>	<b>551 963</b>	<b>21 555</b>	<b>279 317</b>	<b>2 981 574</b>
<b>Métaux et leurs composés</b>		<b>810 728</b>	<b>74 368</b>	<b>1 219 872</b>	<b>566 675</b>	<b>160 596</b>	<b>153 501</b>	<b>2 985 740</b>
	Aluminium (Al)	545 640		14 524				560 164
	Arsenic (As)	185		209	292		59	746
	Cadmium (Cd)	170		50	15			236
	Chrome (Cr)	4 417		3 872	637	211	475	9 612
	Chrome hexavalent (Cr)	35		56				91
	Cuivre (Cu)	20 075	389	26 697	4 842	1 473	2 849	56 324
	Fer (Fe)	138 172	72 840	1 085 102	121 779	155 721	140 306	1 713 919
	Manganèse (Mn)	34 047		2 246	152 962		1 642	190 897
	Mercure (Hg)	15	2	100	4		15	135
	Nickel (Ni)	2 296	31	2 354	565	181	354	5 781
	Plomb (Pb)	12 947	79	8 019	527	22	714	22 308
	Titane (Ti)	5 427		210				5 637
	Zinc (Zn)	47 302	1 027	76 432	285 052	2 988	7 087	419 889

Note : il s'agit des masses émises supérieures aux seuils de déclaration réglementaires, déclarées par les ICPE soumises à la déclaration annuelle de polluants. Les stations d'épuration qui traitent exclusivement les eaux résiduaires domestiques ne sont pas des ICPE et sont donc exclues de cette déclaration. Les stations de type ICPE sont soit des installations collectives de traitement d'effluents industriels (dont au moins une installation industrielle est une ICPE soumise à autorisation) soit des stations mixtes (stations traitant des eaux résiduaires domestiques et industrielles à partir de certains seuils).

Source : DGPR, registre national des émissions polluantes et des déchets. Traitements : 50eS, 2013.



secteur « eau déchets et dépollution » (essentiellement des stations de traitement des eaux usées et quelques installations de traitement de déchets), 11 % du secteur « bois, papier, carton et imprimerie » et 6 % des industries chimiques et pharmaceutiques.

Les installations de la région Nord - Pas-de-Calais contribuent à hauteur de 39 % des rejets en phosphore total et à 36 % des rejets en azote total et ceux d'Île-de-France à hauteur respectivement 20 % et 17 %. Les autres principaux contributeurs à ces rejets sont issus des régions Pays de la Loire, Bretagne, Centre et Champagne-Ardenne.

La répartition des rejets en métaux n'est pas homogène sur le territoire : 47 % concernent l'Île-de-France, 18 % la Champagne-Ardenne, 11 %, les Pays de la Loire et 9 % l'Aquitaine. Les rejets de métaux sont composés essentiellement de fer (57 %), d'aluminium (19 %) et de zinc (14 %), le mercure et le cadmium représentant moins de 0,01 % chacun.

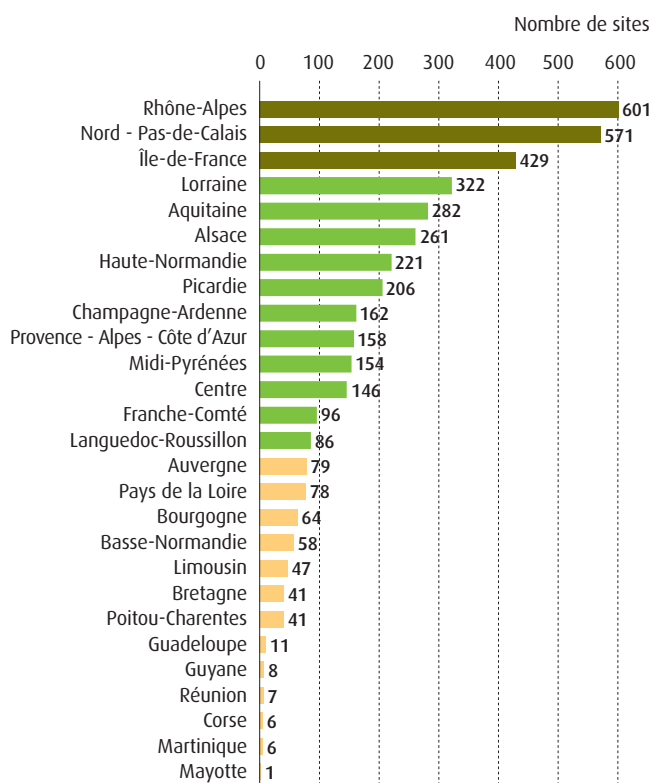
### • Les métaux, métalloïdes et hydrocarbures impliqués dans 95 % des pollutions ponctuelles des sols ou des nappes

**Les activités humaines, principalement industrielles, peuvent provoquer des pollutions localisées :** accidents de manutention ou de transport de matières polluantes, mauvais confinements de produits toxiques sur des sites industriels, retombées des panaches des cheminées d'usines. Ces **sites et sols pollués (SSP)**, qui peuvent résulter d'une activité actuelle ou ancienne, présentent un risque réel ou potentiel pour l'environnement et pour la santé humaine en fonction des usages qui en sont faits. Chaque pollution, issue d'une source locale ou ponctuelle des sols, affecte en général quelques dizaines d'hectares au maximum. La zone polluée peut cependant s'étendre autour de certains sites sous l'effet de la dispersion par l'air et par les eaux percolant dans le sol.

Depuis le début des années 1990, les sites et sols pollués appelant une action de l'administration à titre préventif ou curatif sont inventoriés (constitution de la base de données Basol des sites et sols pollués ou potentiellement pollués). Début 2012, cette base de données comptabilise 4 142 sites et sols pollués (voir chap. « La gestion des sites et sols pollués », p. 322). Ce sont les anciennes régions minières et les régions les plus urbanisées qui concentrent le plus de SSP. L'Île-de-France, le Nord - Pas-de-Calais et Rhône-Alpes comptent ainsi à elles seules 40 % des SSP (soit environ 1 600 sites). *A contrario*, les départements d'outre-mer (Guadeloupe, Guyane, Martinique, Mayotte, Réunion) et la Corse comptent chacun moins de 11 SSP. Ensemble, ces 6 régions recensent moins de 1 % de l'ensemble des SSP français (soit environ 40 sites) - (Figure 59).

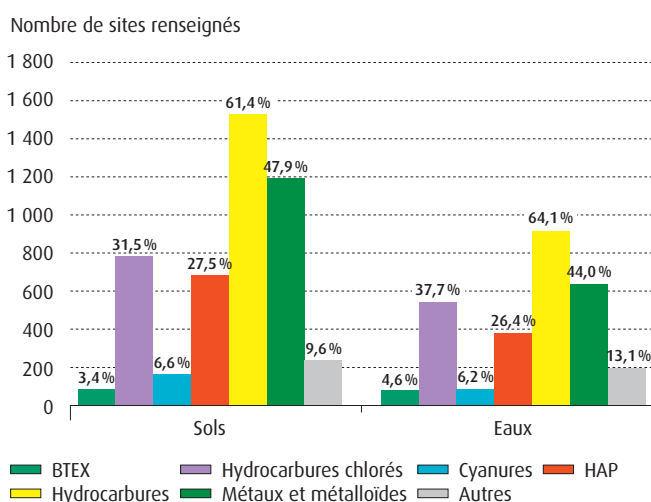
Les hydrocarbures et les métaux et métalloïdes sont les deux principales familles de polluants identifiées aussi bien dans les sols que dans les nappes (Figure 60). La pollution par les hydrocarbures affecte 61 % des sols des sites pollués et 64 % des nappes associées. Dans des proportions moindres, les métaux et métalloïdes sont également souvent responsables de la pollution des milieux : respectivement 48 % des sols des sites pollués et 44 % des eaux (nappes, rivières, etc.).

Figure 59 : nombre de sites et sols pollués recensés par région, début 2012



Source : DGPR (Basol au 16 janvier 2012), 2012. Traitements : SOeS, 2012.

Figure 60 : répartition des 7 familles de polluants identifiées dans les sols ou dans les nappes des sites pollués évalués, début 2012



Note de lecture : plusieurs polluants pouvant être présents sur un même site, le total est supérieur à 100 %. Par exemple, des hydrocarbures sont identifiés dans plus de 60 % des sols des sites pollués renseignés (soit dans 1 527 sites).

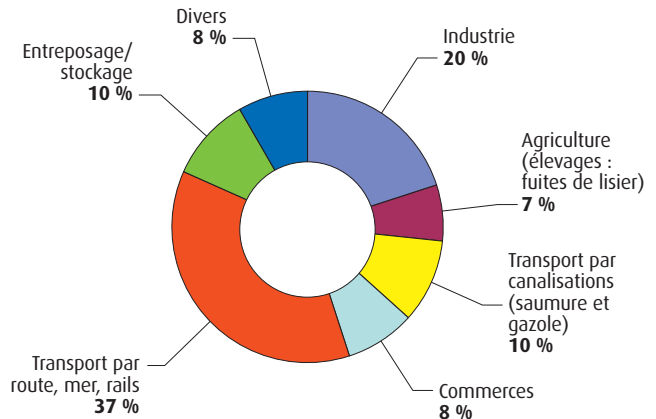
Note : les 7 grandes familles de polluants recensées en termes de présence ou d'absence dans les sols ou dans les nappes de chaque site pollué résultent du regroupement des 24 polluants identifiés dans Basol : les BTEX (benzène, toluène, éthylbenzène, xylène), les Cyanures, les HAP (Hydrocarbures aromatiques polycycliques), les Hydrocarbures, les Hydrocarbures chlorés (PCB-PCT : produits organiques polychlorés, solvants halogénés, TCE : Trichloréthylène), les Métaux et métalloïdes (Arsenic, Baryum, Cadmium, Chrome, Cobalt, Cuivre, Mercure, Molybdène, Nickel, Plomb, Sélénium, Zinc) et les autres contaminants (Ammonium, Chlorures, Pesticides, Solvants non halogénés, Sulfates).

Source : DGPR (Basol au 16 janvier 2012), 2012. Traitements : SOeS, 2012.

**Les contaminations des sols peuvent résulter de la dispersion accidentelle de divers produits et substances dangereuses.** Les différents incidents ou accidents à l'origine de conséquences matérielles, humaines ou encore environnementales en France sont recensés dans la base de données Aria (Figure 61).

En 2011, 60 incidents à l'origine d'une pollution des sols en France sont recensés. Ils représentent 19% des incidents ayant eu des conséquences environnementales (pollution des eaux, de l'air, etc.). 34% des incidents répertoriés ont provoqué une dispersion de produits chimiques, utilisés ou produits par l'industrie chimique et pharmaceutique, 36% d'hydrocarbures (fioul, gazole, etc.), 8% de saumure, 8% de PCB (transformateurs électriques) et 5% des fuites de lisier dans des élevages. Plus d'un tiers d'entre eux résultent d'incidents de transport de matières dangereuses, essentiellement sur route (20 au total) et 10% de fuites de canalisations de transport de fluides (dont 5 fuites de saumure et 1 de gazole). Douze incidents ont eu lieu sur les sites d'ICPE industrielles et 11 dans des garages, stations service, grands magasins ou entrepôts. Les secteurs industriels à l'origine d'incidents sont tout d'abord la « chimie/pharmacie », des industries agroalimentaires, des industries de fabrication de « caoutchoucs/plastiques », des sites de « cokéfaction/raffinage » ou encore de récupération de déchets.

**Figure 61 : répartition des secteurs ou activités à l'origine des incidents ayant contaminés les sols en 2011**



Source : DGPR/Barpi, base Aria, octobre 2012. Traitements : SOeS, 2013.

**COMPARAISON INTERNATIONALE**

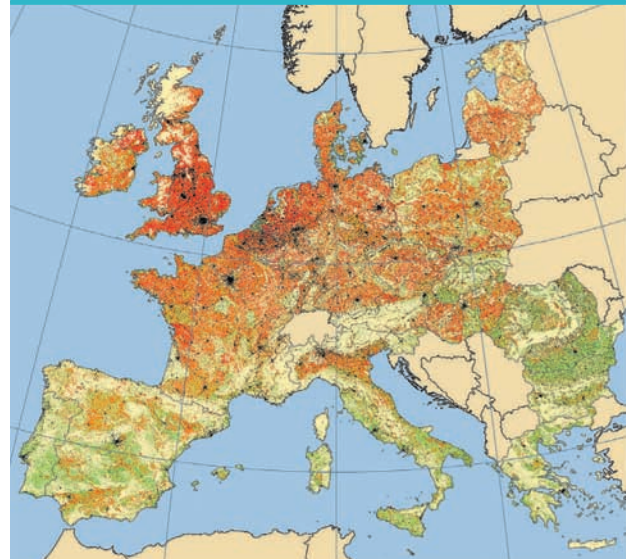
**La qualité des sols en Europe**

**L'érosion hydrique** est une des principales menaces qui pèse sur les sols en Europe. En moyenne, elle est estimée à 3,6 t/ha/an pour les terres cultivées. Elle atteint même 17 t/ha/an dans les vignobles. Les pays les plus touchés par ce phénomène sont la Slovaquie, le Danemark, la République tchèque et l'Italie avec une moyenne supérieure ou égale à 2,3 t/ha/an, soit pratiquement le double de la moyenne européenne (1,2 t/ha/an). Les zones méditerranéennes sont caractérisées par des taux d'érosion plutôt faibles, en raison de l'effet protecteur des nombreux fragments rocheux dans ces sols. Néanmoins, l'érosion est particulièrement préjudiciable pour les sols méditerranéens souvent peu épais.

L'arc alpin et le massif pyrénéen sont particulièrement sensibles aux **glissements de terrain** et aux écoulements. Pour cinq pays (Autriche, Italie, Liechtenstein, Suisse, Slovénie), la susceptibilité aux glissements de terrain est estimée élevée ou très élevée pour plus de 45 % de leur territoire, soit le double par rapport à la moyenne européenne.

Enfin, **parmi les nombreux facteurs qui menacent la biodiversité des sols**, les plus importants à l'échelle européenne sont l'exploitation agricole intensive, la perte de matière organique, la perturbation des habitats, l'artificialisation des sols, la pollution et les changements d'usage. La Grande-Bretagne et les pays d'Europe centrale sont les plus concernés (Figure 62), car l'agriculture intensive y est combinée à un grand nombre d'espèces invasives et au risque de perte de carbone organique.

**Figure 62 : menaces potentielles sur la biodiversité des sols en Europe**



- Menaces
- Extrêmement fortes
  - Très fortes
  - Fortes
  - Modérées/Intermédiaires
  - Faibles
  - Très faibles
  - Extrêmement faibles
  - Aucune
  - Pas de donnée
  - Zone urbaine

Note : l'atlas européen de la biodiversité du sol, traduit en français dans le cadre du programme Gessol du Medde, est disponible en téléchargement libre sur le portail européen des sols ([eu soils.jrc.ec.europa.eu/](http://eu soils.jrc.ec.europa.eu/)), ainsi que sur le site de Gessol ([www.gessol.fr/atlas](http://www.gessol.fr/atlas)).

Source : UE, atlas européen de la biodiversité des sols, 2010 (version française : UE-Gessol, 2013).

## Pour en savoir plus...

### Bibliographie

- Ademe, 2012. – **Bioindicateurs pour la caractérisation des sols : recueil des interventions et fiches outils (actes des journées techniques nationales, 16 et 17 octobre 2012, Maison de la Chimie, Paris)** – Angers : Ademe – n.p. (<http://www2.ademe.fr/servlet/getDoc?id=81046&cid=96&m=3&p1=3&ref=17205>)
- Ademe-Sogreah, 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 composés traces organiques et application quantitative pour les éléments traces métalliques (Rapport final)** – Ademe : Angers 211 p. + ann. (<http://www2.ademe.fr/servlet/getDoc?cid=96&m=3&id=57992&p1=02&p2=11&ref=17597>)
- Cerdan O., Govers G., Le Bissonnais Y. et al., 2010. – « Rates and spatial variations of soil erosion in Europe: A study based on erosion plot data », *Geomorphology*, vol.122, n°1-2 – pp.167-177.
- Dequiedt S., Thioulouse J., Jolivet. et al., 2009. – « Biogeographical patterns of soil bacterial communities », *Environmental Microbiology Reports*, vol.1, n°4 - pp.251-255. ([http://pbil.univ-lyon1.fr/JTHome/Biblio/DequiedtEM\\_R2009.pdf](http://pbil.univ-lyon1.fr/JTHome/Biblio/DequiedtEM_R2009.pdf))
- European Environment Agency, Joint Research Center, European Commission, 2012. – **The state of soil in Europe: A contribution of the JRC to the European Environment Agency's Environment State and Outlook Report – SOER 2010**. 80 p. ([http://ec.europa.eu/dgs/jrc/downloads/jrc\\_reference\\_report\\_2012\\_02\\_soil.pdf](http://ec.europa.eu/dgs/jrc/downloads/jrc_reference_report_2012_02_soil.pdf))
- Gis Sol, 2011. – **L'état des sols de France** - Groupement d'intérêt scientifique sur les sols - 188 p. ([http://www.gissol.fr/RESF/Rapport\\_BD.pdf](http://www.gissol.fr/RESF/Rapport_BD.pdf))
- Lesueur Jannoyer M., Cattan P., Monti D. et al., 2012. – « Chlordécone aux Antilles : évolution des systèmes de culture et leur incidence sur la dispersion de la pollution », *Agronomie, Environnement et sociétés*, Vol.2, n° 1 - Juin 2012 – pp.45-58. (<http://www.agronomie.asso.fr/carrefour-inter-professionnel/evenements-de-lafa/revue-en-ligne/revue-aes-vol2-n1-juin-2012-agriculture-et-ecologie-tensions-synergies-et-enjeux-pour-lagronomie/revue-aes-vol2-n1-5/>)
- Meersmans J., Martin M. P., Lacarce E. et al., 2012. – « Agronomy for sustainable development. A high resolution map of French soil organic carbon », *Agronomy for Sustainable Development*, vol.32, n°4 – pp.841-851.
- Orton T.G., Saby N.P.A., Arrouays D. et al., 2013. – « Spatial distribution of lindane concentration in topsoil accross France », *Science of the total environment*, vol.443 – pp.338-350.
- Ouvry J.-F., Coufourier N., Riche J.-B. et al., 2012. – **Maîtrise du ruissellement et de l'érosion des sols en Haute-Normandie : Expérimentations sur les pratiques culturales 2001-2010 (Synthèse des résultats de ruissellement et d'érosion. Groupe Maîtrise du ruissellement par les pratiques culturales)** – Saint-Valery-en-Caux : Association Régionale pour l'Étude et l'Amélioration des Sols – 36 p. ([http://www.seine-maritime.chambagri.fr/iso\\_album/brochure\\_erosion\\_pratiques\\_culturales\\_bd.pdf](http://www.seine-maritime.chambagri.fr/iso_album/brochure_erosion_pratiques_culturales_bd.pdf))
- Saby N.P.A., Marchant B.P., Lark R.M. et al., 2011 – « Robust geostatistical prediction of trace elements accross France », *Geoderma*, vol.162, n°3-4 – pp.303-311.

### Sites internet utiles

- Agence régionale de santé en Martinique, Jafa : [www.ars.martinique.sante.fr/Jafa-Jardins-Familiaux.93583.0.html](http://www.ars.martinique.sante.fr/Jafa-Jardins-Familiaux.93583.0.html)
- Analyse, Recherche et Information sur les accidents technologiques, Aria : [www.aria.developpement-durable.gouv.fr/](http://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/)
- Base de données sur les sites et sols pollués ou potentiellement pollués, Basol : <http://basol.developpement-durable.gouv.fr/>
- Commissariat général au développement durable/Service de l'Observation et des Statistiques/**L'essentiel sur l'environnement** : [www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/lessentiel/t/environnement.html](http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/lessentiel/t/environnement.html) - Rubrique > Milieux > Sol et sous-sol
- Direction de l'environnement, de l'aménagement et du logement de Martinique - Les risques liés aux pesticides : [www.martinique.developpement-durable.gouv.fr/les-risques-lies-aux-pesticides-a46.html](http://www.martinique.developpement-durable.gouv.fr/les-risques-lies-aux-pesticides-a46.html)
- Direction de l'Alimentation, de l'Agriculture et de la Forêt de Guadeloupe - Chlordécone : <http://daaf971.agriculture.gouv.fr/Chlordecone>
- European Soil Portal – Soil data and information systems, Joint research centre JRC : <http://eussoils.jrc.ec.europa.eu/>
- Gessol, programme de recherche « Fonctions environnementales et Gestion du patrimoine SOL » : [www.gessol.fr/](http://www.gessol.fr/)
- Gis Sol, Groupement d'Intérêt Scientifique Sol : [www.gissol.fr/](http://www.gissol.fr/)
- Observatoire des résidus de pesticides (Anses) - Chlordécone-infos : [www.chlordecone-infos.fr/](http://www.chlordecone-infos.fr/)
- Observatoire participatif des vers de terre : [http://ecobiosoil.univ-rennes1.fr/OPVT\\_accueil.php](http://ecobiosoil.univ-rennes1.fr/OPVT_accueil.php)
- Plate-forme Genosol : [www2.dijon.inra.fr/plateforme\\_genosol/](http://www2.dijon.inra.fr/plateforme_genosol/)
- Portail Sites et sols pollués du ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie (Medde) : [www.developpement-durable.gouv.fr/-Sites-et-sols-pollues-.html](http://www.developpement-durable.gouv.fr/-Sites-et-sols-pollues-.html)
- Registre français des émissions polluantes : [www.irep.ecologie.gouv.fr/IREP/index.php](http://www.irep.ecologie.gouv.fr/IREP/index.php)
- Union des industries de la fertilisation, Unifa : [www.unifa.fr/](http://www.unifa.fr/)