

Le sol et le sous-sol

Le sol et le sous-sol sont des ressources naturelles qui doivent être gérées durablement car elles sont particulièrement sollicitées par le développement des sociétés humaines. Le sous-sol est une source d'énergie et de matériaux pour l'industrie, le bâtiment et les infrastructures. Le sol est un réservoir d'éléments nutritifs nécessaires à la croissance des plantes, constituants des écosystèmes ou de systèmes de production agricole. Le sol et le sous-sol sont amenés à jouer de nouveaux rôles ou à voir se renforcer l'utilisation de certaines de leurs fonctions : réservoirs pour des fluides ou des gaz, production d'énergie géothermique et production de biomasse pour les carburants verts, système d'épuration pour les effluents*, piégeage des pollutions, réserve de biodiversité, etc. Ils peuvent également présenter des dangers pour les communautés humaines, en raison de leur nature même ou de leur instabilité liées aux phénomènes géodynamiques ou à l'exploitation dont ils ont été l'objet. Pour que ces milieux puissent contribuer au bien-être des populations actuelles et futures, il est nécessaire de maîtriser les risques* liés à une dégradation de leur qualité. Dans ce but, des systèmes d'alerte et de surveillance ont été mis en place ou sont en cours de déploiement. Par ailleurs, garantir la pérennité de ces milieux et continuer à en développer la connaissance sont des enjeux majeurs.

Le sol et le sous-sol constituent le support de toutes les activités humaines et de la plupart des écosystèmes. Ils sont en effet intimement liés aux autres compartiments* de l'environnement : eau, air, biosphère*. Ils remplissent également des fonctions essentielles pour l'économie : production de matériaux, production agricole, support des infrastructures, etc. Ils jouent aussi un rôle important pour l'environnement : épuration de l'eau, biodiversité, etc. Tant d'un point de vue physique que fonctionnel, il s'agit d'une ressource non renouvelable. Pour toutes ces raisons, en ménager l'utilisation

et en préserver les fonctionnalités sont une manière de protéger durablement les autres milieux et ressources.

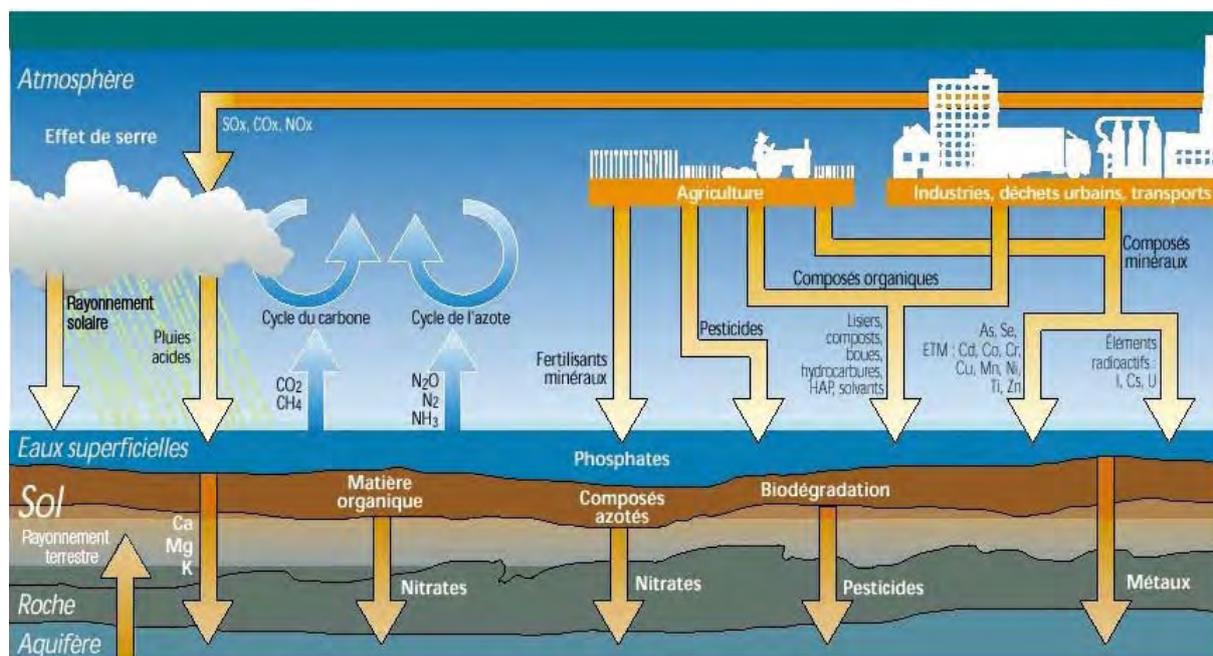
Sous-sol et sol : des milieux à ménager, des ressources à gérer

Le sous-sol, infrastructure des territoires

Le sous-sol constitue l'infrastructure de notre territoire. Du sous-sol métropolitain ont été extraites, jusqu'à une époque récente, des matières premières utiles au développement industriel. Aujourd'hui, l'approvisionnement en matériaux de construction, minéraux industriels, métaux et une part des ressources en eau et énergétiques en dépendent encore. La raréfaction de certains gisements de matériaux (granulats alluvionnaires), l'envolée du cours de certains métaux (cuivre, etc.) ou des hydrocarbures rappellent que les ressources minérales et minières sont limitées et que leur exploitation doit être repensée dans le cadre du développement durable*.

Même si le développement économique, autrefois fortement dépendant du sous-sol, semble, avec la tertiarisation de l'économie, s'en être aujourd'hui quelque peu affranchi, les dynamiques territoriales restent partiellement conditionnées par la géologie. Cette dernière impose des contraintes physiques et détermine la répartition des zones d'aléa* et des ressources naturelles, notamment des ressources en eau. L'instabilité du sous-sol, qu'elle soit d'origine naturelle (séismes, cavités souterraines, etc.) ou qu'elle résulte de l'action humaine (mines, etc.), peut présenter des risques pour les populations. Enfin, la nature de la roche est un déterminant fondamental du type de sol. Elle influence ses propriétés physiques et chimiques et joue un rôle important pour l'agriculture (*voir le chapitre « Agriculture »*). Elle détermine des types de paysages auxquels sont liées des problématiques environnementales spécifiques.

Les flux de matière et d'énergie transitant par le sol



Note : Le sol est traversé par de nombreux flux de matières, de volume et de vitesse très variables, et très dépendants des caractéristiques des sols. Selon ses propriétés physico-chimiques et biologiques, le sol va plus ou moins interagir avec ces flux et en modifier les caractéristiques. Vis-à-vis de substances polluantes, il peut notamment jouer un rôle de dépollution ou de stockage. Dans ce dernier cas, le temps de résidence des substances est plus ou moins long et les pollutions peuvent être remises en mouvement si les propriétés du sol sont modifiées. Le sol est également traversé par des flux d'énergie, issus du rayonnement solaire ou terrestre.

Source : Ifen, d'après Robert M., 1996. Le sol : interface dans l'environnement, ressource pour le développement. Paris, Masson. 244 p.

Le sol, une interface dans l'environnement

Le sol résulte de l'altération des roches par l'action conjuguée des climats successifs et des activités biologiques et humaines. Ce processus, appelé pédogenèse, aboutit à une différenciation verticale et spatiale des sols qui se traduit par une sensibilité différente aux pressions environnementales.

À l'interface avec le sous-sol, la biosphère, l'hydrosphère* et l'atmosphère*, le sol est traversé de flux de matières et d'énergie, liés aux grands cycles biogéochimiques. Il joue un rôle économique de premier plan, en particulier dans l'alimentation des populations, et occupe une place très importante au cœur des problématiques du changement climatique ou dans la protection des autres ressources, en raison notamment de ses capacités d'épuration de l'eau.

Les huit principales menaces qui pèsent sur le sol

Dans le cadre des travaux liés à la communication sur les sols « Vers une stratégie thématique pour la protection des sols », adoptée par le Conseil européen de juin 2002, la Commission européenne a dressé la liste, par ordre de gravité décroissante, des principales menaces qui pèsent sur les sols :

- **érosion**, qui affecterait 17 % du territoire européen ;
- **diminution** des teneurs en matières organiques, qui a pour conséquences la baisse de productivité agricole et la fragilisation des sols vis-à-vis de l'érosion ;
- **contamination**, diffuse et locale ;
- **salinisation** : la France est pour l'instant assez peu concernée par cette menace, plus répandue dans les zones méditerranéennes ;
- **diminution de la biodiversité** ;
- **tassement**, c'est-à-dire compaction des sols ;
- **imperméabilisation**, sous l'effet de la croissance urbaine ;
- **inondations et glissements de terrain**.

Une grande diversité géologique et pédologique

Répartition des grands types de roches en France



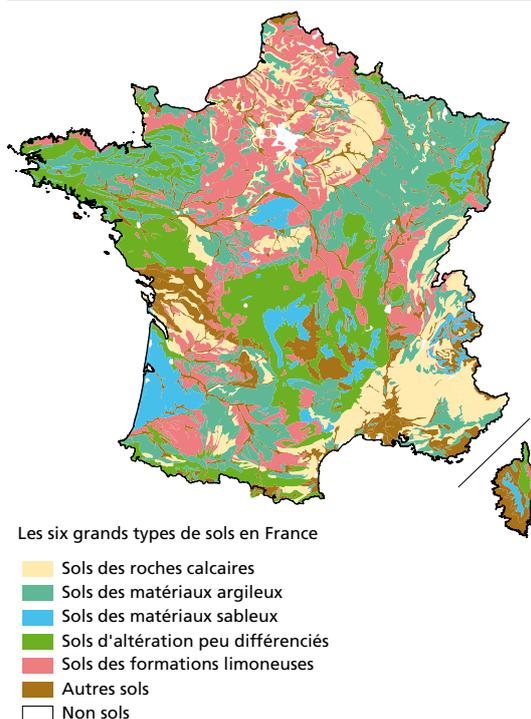
Ma : Millions d'années.

Note : Simplification de la carte géologique au 1/1 000 000.

Source : Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM).

Le territoire métropolitain est constitué de roches de natures variées réparties schématiquement en quatre grands ensembles. Les ensembles sédimentaires, déformés ou non, représentent 79 % de la surface territoriale ; les ensembles plutoniques (comme le granite) et métamorphiques (comme les gneiss), 19 % du territoire ; et les formations volcaniques, 2 % du territoire. La structure géologique de la France est marquée, en outre, par des massifs cristallins, témoins d'anciennes chaînes de montagnes aujourd'hui érodées (Massif armoricain, Massif central, Vosges et Ardennes), de vastes bassins sédimentaires (bassins de Paris et d'Aquitaine), des chaînes de montagnes récentes (Alpes, Jura, Pyrénées) et des volcans temporairement inactifs situés principalement dans le Massif central. Ces ensembles géologiques ont été ou sont encore exploités plus ou moins intensément par l'homme. En raison de cette exploitation ou de leur nature, on y rencontre des problématiques environnementales spécifiques : glissements de terrain en zones montagneuses pour des formations sédimentaires peu consolidées (marnes et schistes), effondrements dans les anciennes zones minières, résistance plus ou moins grande à l'érosion côtière, vulnérabilité de la ressource en eau souterraine dans les régions calcaires très fracturées...

Répartition des grands types de sols en France



Source : Institut national de la recherche agronomique (Inra)/Infosol.

La grande variété des sols reflète la diversité géologique du pays. Cela implique un usage, une vulnérabilité et des réponses différentes aux pressions qui s'exercent sur les sols : un sol sableux sera, le plus souvent, en raison de sa grande perméabilité, beaucoup moins apte à piéger les pollutions et donc à protéger les ressources en eau souterraines. Un sol limoneux, en raison de sa capacité de stockage en eau, présente le plus souvent un grand intérêt pour la production agricole, mais est également plus sensible à l'érosion.

Les grands types de sols du territoire métropolitain

Grands types de sols	Caractéristiques principales et sensibilité environnementale	En % du territoire
Sols des roches calcaires	Sols carbonatés ou calciques, décalcifiés pour certains mais cependant saturés, argilo-limoneux, parfois limono-graveleux ou très caillouteux et très superficiels. Faibles réserves en eau	15
Sols des matériaux argileux	Sols « lourds » sur argiles sédimentaires ou alluviales, fréquemment peu perméables, de saturation moyenne à forte et fortes réserves en eau. Meilleure protection des ressources en eau	23
Sols des matériaux sableux	Sols « légers » sur formations sédimentaires ou d'altération de roches siliceuses, fréquemment très perméables, peu saturés ou acides, à faible capacité de fixation d'éléments chimiques et faible réserve en eau	6
Sols d'altération peu différenciés	Sols limoneux à argilo-limoneux, homogènes, de profondeur variable, de saturation moyenne à faible, issus de l'altération de roches variées	19
Sols des formations limoneuses	Sols hétérogènes sur leur profondeur, bien structurés, de perméabilité modérée à faible lorsque fortement différenciés, de saturation moyenne à faible. Bonnes réserves en eau. Forte sensibilité à l'érosion	21
Autres sols	Sols variés : de climat méditerranéen, sur matériaux volcaniques riches en sodium, superficiels ou de formations alluviales diverses	15
Non sols	Surfaces fortement anthropisées et importantes étendues d'eau	1

Source : Inra.

Le sol

Le sol, réserve de biodiversité

Le sol est un milieu vivant. L'abondance, la diversité et l'activité des organismes (faune et flore) que l'on y trouve, dans les premiers trente centimètres, sont un des facteurs de sa qualité. Tous ces organismes, et plus particulièrement les micro-organismes, jouent un rôle primordial dans la formation des sols et leur évolution en décomposant les résidus d'animaux et de végétaux, en les minéralisant et en les incorporant au sol. Ils participent ainsi au recyclage du carbone et des nutriments minéraux.

On estime qu'un sol de prairie permanente recèle, en moyenne, 260 millions d'individus par mètre carré, soit une biomasse de 1,5 t/ha répartie entre plusieurs milliers d'espèces. Les bactéries y forment le groupe le plus abondant. Dans 1 m² de sol d'une forêt (hêtraie), on peut compter plus de 1 000 espèces d'invertébrés. Un très grand nombre d'insectes sont dépendants du sol pour une partie au moins de leur cycle de vie.

La faune du sol reste généralement peu étudiée et moins de 10 % de ses micro-organismes, notamment les bactéries, sont aujourd'hui connus. Ceux qui restent à découvrir constituent un immense patrimoine génétique à explorer. De nombreux micro-organismes isolés à partir du sol sont déjà utilisés dans les processus de dépollution.

Certains organismes, comme les vers de terre, ont un rôle déterminant dans le maintien de la structure

des sols, dans la circulation de l'eau dans le sol. Ils favorisent l'enracinement des plantes. Certaines pratiques agricoles peuvent conduire à la réduction quantitative et qualitative des populations de vers de terre. Cela entraîne la réduction de l'infiltrabilité du sol et de l'activité microbienne et affecte la capacité du sol à dégrader les composants organiques, ce qui peut avoir pour conséquence la dégradation de la qualité des eaux.

Préserver la fraction vivante des sols c'est garantir leur fertilité, mais également leur capacité à remplir des fonctions de recyclage, voire de dépollution. En 2004, plusieurs projets de normes ISO ont vu le jour concernant l'utilisation des vers de terre, collemboles et acariens en tant que bio-indicateurs* pour détecter les impacts liés aux pratiques agricoles et aux pollutions.

L'évolution de la teneur en matière organique, un enjeu local et planétaire

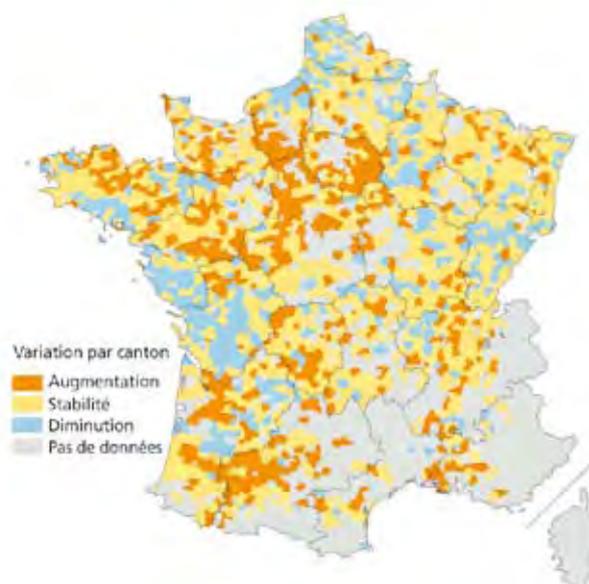
La matière organique du sol est constituée par les organismes qui y vivent et, majoritairement, par leurs résidus organiques. Composante importante de la fertilité, elle joue un rôle environnemental de premier plan : elle contribue à préserver les sols de l'érosion en favorisant le développement des végétaux et en stabilisant les matériaux des couches de surface. La matière organique est une source d'énergie et de nutriments pour nombre d'organismes

vivant dans le sol. L'activité biologique et la stabilité des écosystèmes sont donc étroitement liées à la présence de matière organique.

Le maintien, voire l'augmentation du stock de matière organique du sol, s'accompagne le plus souvent de bénéfices environnementaux et agronomiques connexes.

L'exploitation de la banque nationale d'analyses des terres (BDAT) montre que, dans les régions de l'ouest et du nord de la France, la teneur en carbone organique a tendance à diminuer alors qu'elle semble à la hausse à la périphérie de la région parisienne, dans un corridor entre Angers et Nantes, au sud de Bordeaux et à l'est de Toulouse.

Variation de la teneur en carbone organique entre les périodes 1990-1995 et 1996-2000



Note : La BDAT collecte les données des analyses de sols agricoles réalisées en France (250 000 par an), essentiellement par les agriculteurs. Elle contient aujourd'hui environ 900 000 analyses pour la période 1990 à 2003 et permet de dresser la carte des évolutions de la teneur en carbone organique des sols agricoles entre deux périodes de collecte de données pour les cantons.

Source : Groupement d'intérêt scientifique sur les sols (Gis Sol), BDAT, 2005.

La matière organique des sols est, avec la biomasse végétale, l'un des principaux compartiments de la biosphère stockant le carbone. Le stock de carbone du sol peut être modifié en raison des pratiques agricoles ou sylvicoles. Le sol peut jouer alors le rôle de puits ou d'émetteur de carbone, principalement sous forme de dioxyde de carbone (CO₂). Le protocole de Kyoto, qui vise à réduire les émissions de CO₂, inclut la possibilité de comptabiliser le carbone stocké dans les sols de façon vérifiable. On

peut donc s'attendre à ce que ce protocole influe sur les politiques de gestion des terres.

L'expertise collective scientifique menée par l'Institut national de la recherche agronomique (Inra) (2002) a montré que, pour la couche de 0 à 30 cm, le stock global en carbone des sols de France peut être estimé à 3,1 milliards de tonnes au moins, soit 1/500^e des stocks mondiaux. Les stocks les plus faibles sont observés en Languedoc-Roussillon et dans quelques zones de cultures très intensives, les stocks faibles dans les grandes plaines de cultures intensives, les stocks moyennement élevés dans les régions forestières ou fourragères, et enfin les stocks les plus élevés en zones montagneuses. Le potentiel maximal de stockage additionnel du carbone dans le sol pourrait être de l'ordre de 1 à 3 millions de tonnes par an. Mais le stockage dans le sol ne peut être présenté comme une solution durable de réduction du CO₂ atmosphérique. En effet, les stocks cessent de croître au bout de quelques années et les surfaces agricoles sont limitées. Tout au plus peut-il permettre un peu de flexibilité vis-à-vis des engagements pris dans le cadre du protocole de Kyoto.

Une capacité de rétention des nitrates et des phosphates dépendante de la nature des sols

Il n'y a pas à proprement parler de pollution du sol par les nitrates et les phosphates. Celui-ci ne joue en effet qu'un rôle de « réserve » ou de tampon vis-à-vis des plantes qui utilisent l'azote et le phosphore, éléments essentiels à leur croissance. En revanche, de ses propriétés dépend la migration de ces éléments vers les eaux souterraines ou superficielles (lacs, rivières), dont l'eutrophisation est un phénomène préoccupant. Celle-ci résulte pour partie d'apports excessifs de phosphore et d'azote qui sont épandus en quantités importantes sur les sols cultivés et dont l'excédent n'a pas été prélevé par les plantes. L'excédent peut s'infiltrer dans le sol ou ruisseler sur celui-ci sous différentes formes et venir contaminer les eaux de surface ou souterraines.

La capacité de rétention des composés azotés est fortement dépendante de la nature du sol et du sous-sol. Ainsi, pour les nitrates, la vulnérabilité vis-à-vis de l'hydrosphère sera maximale pour un sol mince (moins de 40 cm), très filtrant (textures sableuses) et recouvrant des roches filtrantes ou très fissurées. Le phosphore est surtout entraîné sur les particules du

sol (adsorption*) : la vulnérabilité du sol vis-à-vis de l'érosion constitue le critère déterminant à sa migration ou son immobilisation.

Épandre les déchets, mais dans l'intérêt des sols

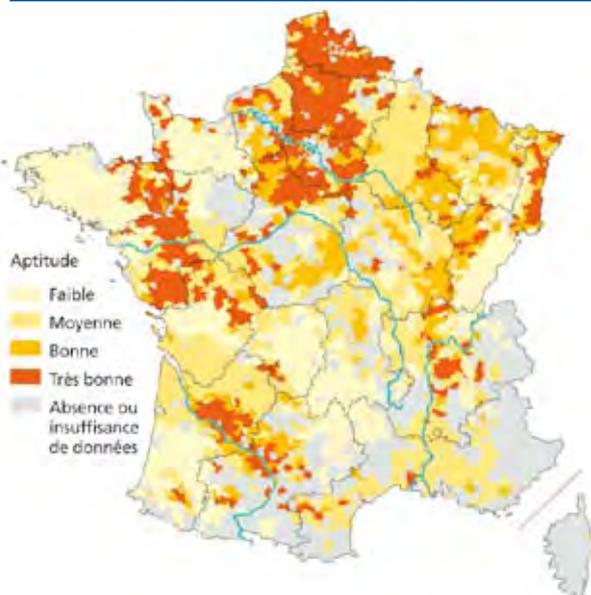
Chaque année, environ 1,8 million de tonnes de matières sèches de boues de stations d'épuration (Step) sont produites en France, dont 48 % de boues urbaines et 52 % de boues industrielles. 55 % de ces boues sont épandues sous une forme ou une autre sur les sols agricoles, ce qui constitue une baisse sensible par rapport à 1998 (62 %). Ces épandages se font sur 3 % de la surface agricole utile. Jusque-là surtout pratiqués sur les terres agricoles, les épandages sont de plus en plus répandues sur les parcelles boisées.

Épandre les boues de stations d'épuration sur sol apparaît, aujourd'hui, comme la solution la moins coûteuse : 1 à 2,5 fois moins chère que l'incinération. L'épandage permet de recycler les boues et de profiter de leurs propriétés fertilisantes. Cette pratique, qui permet aussi de boucler le cycle de la matière organique par retour vers le sol, est strictement encadrée du

point de vue sanitaire et environnemental. Il faut en effet s'assurer de l'aptitude des sols à remplir cette fonction environnementale. Il faut aussi s'assurer de l'innocuité des épandages de boues vis-à-vis des sols et de la chaîne alimentaire ou des autres compartiments de l'environnement, en particulier les eaux. Il y a quelques années, la pratique de l'épandage a suscité de nombreuses interrogations sur le comportement à long terme des éléments traces métalliques (ETM), toujours présents en quantités variables dans les boues. Ne risquent-ils pas, à la suite d'un changement des conditions physico-chimiques du sol, d'affecter à plus ou moins long terme la qualité des eaux, la faune et la flore, ou d'être transférés dans les chaînes alimentaires ?

La France s'est doté d'un dispositif réglementaire qui va au-delà des normes européennes : décret n° 97-1133 du 8 décembre 1997 et arrêté du 8 janvier 1998. Un traitement informatique, tenant compte des distances d'isolement¹ définies par ces textes, a permis de constater que, indépendamment de la nature des sols, 22 % de la surface du territoire doivent être exclus de l'épandage des boues. Les statistiques révèlent une grande hétérogénéité dans la répartition de ces zones d'exclusion. Les surfaces sont restreintes dans les zones les plus fortement urbanisées : Île-de-France, départements du Nord, Provence-Alpes-Côte d'Azur, Languedoc-Roussillon et dans les massifs montagneux : quart sud-est, Vosges, Pyrénées.

Indice d'aptitude des sols à l'épandage des boues

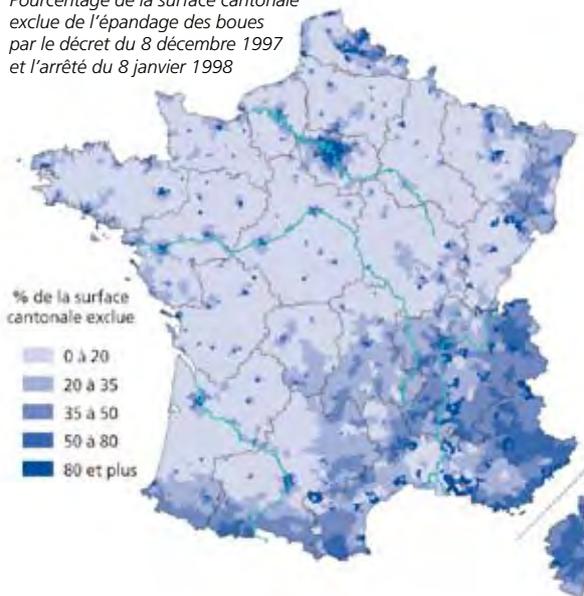


Note : Les contraintes à l'épandage sont le plus souvent liées à l'acidité trop élevée du sol ou à sa faible épaisseur qui accentuent les possibilités de fuites d'éléments potentiellement toxiques vers les eaux souterraines. Les zones présentant des contraintes à l'épandage correspondent, d'une part, à des formations sableuses (Landes, Sologne) et, d'autre part, aux massifs anciens constitués de roches de type granitique et à leurs piémonts (Massif armoricain, Massif central, Vosges), qui donnent des sols acides (pH<6). Dans ce dernier cas, seules les boues chaulées hygiénisées sont épandables, soit 30 % de la production.

Source : Institut supérieur d'agriculture (Isa) de Lille - Gis Sol, BDAT, 2005.

Les zones exclues de l'épandage des boues

Pourcentage de la surface cantonale exclue de l'épandage des boues par le décret du 8 décembre 1997 et l'arrêté du 8 janvier 1998



Source : Ifen - Réseau national des données sur l'eau (RNDE).

1 - Zones dans lesquelles on ne peut étendre les boues.

Par ailleurs, un modèle développé par l'Institut supérieur d'agriculture (Isa) de Lille, utilisant les informations de la BDAT, permet d'attribuer, par canton, un indice d'aptitude des sols à l'épandage des boues, en fonction de leurs caractéristiques physico-chimiques.

La France dispose d'un potentiel important de sols aptes à l'épandage, mais inégalement réparti. Dans les régions méditerranéennes, le facteur limitant l'épandage est le manque de terrains. Des transferts vers des zones plus favorables ou la mise en place de solutions alternatives viables devront être envisagées. À l'ouest, la nature des terrains acide restreint l'épandage : le chaulage y est une solution bien adaptée. Il est impératif, pour disposer de boues de qualité acceptable à l'épandage, de veiller à ce que des polluants ne puissent être introduits, en amont, dans les réseaux de collecte des eaux usées.

Le devenir des pesticides dans les sols, des précautions à prendre

Les pesticides* sont utilisés comme moyen de prévention et de lutte contre les organismes nuisibles aux végétaux et aux élevages (*voir le chapitre « Agriculture »*). Les trois principaux types de produits sont les fongicides, herbicides et insecticides. La composition des pesticides est extrêmement variée, ce qui explique que leurs propriétés physiques, chimiques et biologiques le soient également. Les difficultés pour décrire et prévoir leur comportement et leur devenir dans les sols en font des substances dont l'usage doit être entouré de précautions, pour éviter les pollutions potentielles des autres compartiments et de la chaîne alimentaire. Le caractère polluant d'un pesticide est fonction de sa toxicité* propre (liée à sa nature et à sa concentration), de sa rétention par le sol et de sa persistance dans celui-ci.

Lors du traitement effectué par l'agriculteur, une partie seulement du produit atteint sa cible (partie aérienne ou souterraine des végétaux, ravageurs des plantes cultivées...). Les quantités résiduelles arrivent au sol, s'y fixent ou sont dégradées par la biomasse. L'aptitude à fixer et dégrader les pesticides varie suivant les types de sols et les caractéristiques des molécules : les sols riches en matière organique retiennent plus efficacement les pesticides. Plus un pesticide sera retenu par le sol et moins il présentera de risque de pollution, notamment vis-à-vis de l'hydrosphère.

La fixation des pesticides est cependant en partie réversible et les plus persistants d'entre eux ou les produits issus de leur dégradation (métabolites)

peuvent être relargués longtemps après un traitement. C'est le cas pour l'atrazine (herbicide du maïs) et ses métabolites, que l'on retrouve plus de dix ans après une culture de maïs.

Guadeloupe : le problème du chlordécone

Des études sur la qualité des eaux de surface, souterraines ou littorales de la Guadeloupe ont mis en évidence une contamination de la ressource en eau potable, notamment par le chlordécone (famille des organochlorés), à des teneurs largement supérieures aux normes en vigueur. Ce pesticide, qui a été utilisé dans les bananeraies, est interdit depuis 1993. Il a été retrouvé à des teneurs assez élevées dans des échantillons de sol. Cela est probablement dû à la forte rémanence du produit, à son piégeage par les minéraux argileux et éventuellement à un usage illicite postérieur à 1993. Pour permettre la mise en place de mesures de remédiation*, un zonage des terrains ayant été utilisés pour la culture de la banane et pouvant être contaminés par le chlordécone est en cours, en tenant compte de la nature des argiles des sols et de leur teneur en matière organique. La vente de légumes racines, tels que la patate douce, fait l'objet d'un contrôle sanitaire renforcé.

L'entraînement des matières actives* par les eaux de ruissellement dépend de l'état structural de la surface du sol (croûte de battance*) et de l'abondance des pluies qui suivent le traitement. Des pluies arrivant juste après un apport sur un sol battu peuvent en partie ruisseler et entraîner jusqu'à 20 ou 30 % de la dose apportée. Les modèles d'érodibilité des sols, utilisés à l'échelle locale, trouvent ici un intérêt particulier. Les codes de bonnes pratiques conseillent aux agriculteurs d'éviter les traitements lorsqu'un épisode pluvieux est prévu.

L'entraînement des matières actives en profondeur est moins intense mais plus continu et généralisé à la plupart des sols. Les quantités qui s'infiltrent ne correspondent qu'à environ 1 % de la dose apportée, mais sont suffisantes pour que l'eau des aquifères libres situés à faible profondeur et à l'aplomb des régions de grandes cultures présentent des teneurs en pesticides (*voir le chapitre « Eau »*) qui les rendent impropres à la consommation humaine (valeur limite de 0,1 µg/l par matière active).

Les situations les plus vulnérables correspondent à des sols peu épais, très perméables, situés sur des substratums géologiques perméables : Champagne crayeuse, Petite Beauce, Champagne berrichonne, Plateau lorrain... Mais les sols très peu perméables ne sont cependant pas épargnés car ils ont fréquemment été drainés pour les rendre propres à la culture. Les molécules présentes dans la solution du sol sont alors interceptées par le réseau de drainage et rapidement dirigées vers les eaux superficielles. Les sols les moins sensibles sont les sols profonds dans lesquels les processus de dégradation des matières actives sont plus aboutis.

La pollution diffuse des sols par les éléments traces

Présents dans les sols à des teneurs inférieures à 100 mg/kg, les éléments traces (ET) résultent soit de l'altération des roches originelles, soit d'apports naturels ou anthropiques.

La plupart des ET deviennent toxiques à forte dose, les seuils de toxicité différant selon les plantes ou les espèces animales considérées. Leur toxicité dépend généralement de leur état chimique (spéciation), qui conditionne aussi leur mobilité dans le sol ou leur capacité à être absorbés par les végétaux (phytoaccessibilité).

Le fond pédogéochimique naturel (FPGN) correspond à la concentration de l'ET dans le sol

Que sont les éléments traces ?

Les éléments traces peuvent être des métaux (cuivre, cadmium, chrome, nickel, plomb), des métalloïdes (bore, sélénium, arsenic) ou des non-métaux (fluor, chlore, brome). Certains de ces éléments, appelés oligoéléments (cuivre, cobalt, arsenic, etc.), sont nécessaires à la vie en quantité infinitésimale, alors que d'autres ne sont pas indispensables aux processus biologiques (cadmium, mercure, plomb, etc.).

résultant de son évolution naturelle à partir de la roche initiale. Sa concentration se diversifie verticalement et horizontalement lors de la pédogenèse. On parle de contamination des sols pour un ET lorsque sa teneur est supérieure à la valeur du FPGN local, mais sans influence sur la qualité du sol. Une pollution se définit comme une accumulation en ET à une dose constituant une menace pour l'activité biologique ou les fonctions du sol.

Origine des contaminations diffuses par les éléments traces

Les contaminations diffuses, qui affectent les niveaux superficiels des sols, résultent de phénomènes naturels tels que les retombées atmosphériques d'aérosols d'origine volcanique, ou d'actions anthropiques intentionnelles ou non : poussières et dépôts atmosphériques

Teneurs naturelles dans les sols de quelques éléments traces, apports anthropiques et valeurs seuils réglementaires

	Teneurs naturelles en ET dans les sols			Apports anthropiques	Normes et réglementations				
	Concentration moyenne dans la croûte terrestre*	Valeurs extrêmes relevées dans les roches*	Type de roches*		Nature des apports anthropiques*	Norme Afnor d'épandage de boues de Step U 44-041 (1985)	Règlement (CE) n° 466/2001 portant fixation de teneurs maximales pour certains contaminants dans les denrées alimentaires		
							Viandes	Crustacés	Céréales
Cadmium (Cd)	0,2	46	Sédimentaires	2 - 4 - 5	2	0,05 à 1,0	0,5	0,1	
Cobalt (Co)	23	100-200	Magmatiques basiques	3 - 2	-	-	-	-	
Chrome (Cr)	100-200	1 500-3 000	Ultrabasiqes	1 - 2	150	-	-	-	
Cuivre (Cu)	45-70	80-150	Magmatiques	3 - 4 - 5	100	-	-	-	
Nickel (Ni)	80	2000	Éruptives	3	50	-	-	-	
Plomb (Pb)	13-16	30	Schistes noirs	1 - 2 - 3 - 4 - 5 - 6	100	0,1 à 0,5	0,5	0,2	
Zinc (Zn)	70-132	120	Magmatiques et sédimentaires	3 - 4 - 5 - 6	300	-	-	-	

Nature des apports anthropiques

1 : Retombées atmosphériques

3 : Activités industrielles

5 : Activités agricoles

2 : Épandages boues Step

4 : Activités urbaines et trafic routier

6 : Activités minières

* Source : Baize D., 1997. Teneurs totales en éléments traces métalliques dans les sols de France. Versailles, Inra Éditions, 408 p.

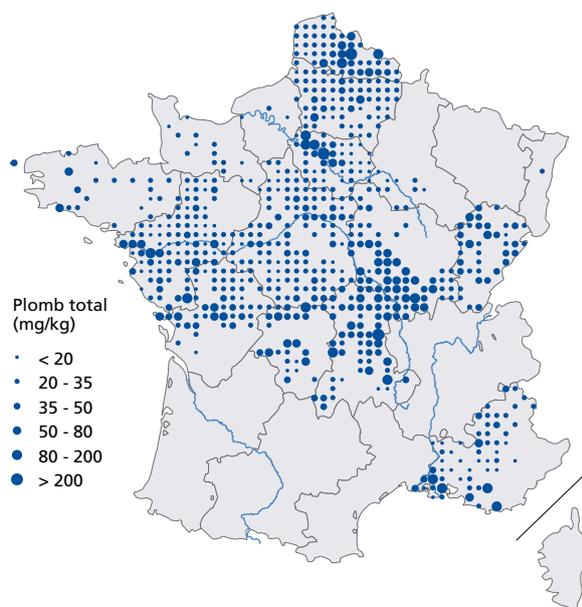
Note : Les teneurs sont exprimées en mg/kg.

Source : Compilation Gis Sol.

(volcanisme), fertilisants minéraux (cuivre contenu dans les phosphates), fongicides, pesticides, lisiers et fumiers riches en cuivre et zinc, déchets* industriels (bâtiments) ou urbains, transports, etc.

Les contaminations diffuses, même si elles sont faibles, affectent des superficies considérables et ont des impacts à long terme sur les sols et les autres milieux. En effet, les ET, en fonction de la mobilité, migrent en profondeur dans le sol. Certains d'entre eux, comme le zinc, sont particulièrement mobiles, d'autres, comme le plomb, très peu mobiles. D'autres encore montrent une mobilité différenciée en fonction des paramètres physico-chimiques du sol : le cadmium est par exemple mobile en milieu acide.

Les teneurs totales en plomb dans la partie superficielle des sols (0-30 cm)



Note : Il s'agit des premiers résultats du RMQS (programme du Gis Sol en cours de déploiement sur l'ensemble du territoire français) selon une maille carrée de 16 km de côté. Ces teneurs reflètent à la fois les teneurs naturelles en plomb des sols, et les contaminations locales ou diffuses d'origine humaine. Les teneurs sont comprises entre 8 et 20 mg/kg de plomb. Les plus fortes valeurs laissent suspecter des contaminations anthropiques dans les grandes agglomérations, mais sont plus probablement liées à des anomalies naturelles lorsqu'elles sont situées dans les zones granitiques du Morvan et du Massif central.

Source : Gis Sol, réseau de mesure de la qualité des sols (RMQS), 2006.

Les ET peuvent donc s'accumuler puis être « relargués » dans le sol lors d'un changement des conditions physico-chimiques. Il est donc indispensable de maîtriser la qualité des produits épandus sur le sol et de se doter des moyens de mesure des teneurs en éléments traces, afin de prévenir toute accumulation et relargage.

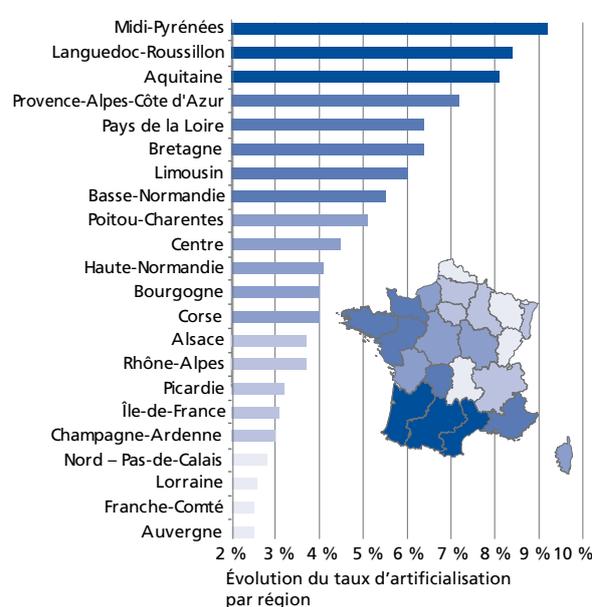
Le réseau de mesure de la qualité des sols (RMQS) et la BDAT, qui collectent selon des protocoles bien

définis des informations sur les teneurs des sols en ET, répondent à cet objectif de surveillance.

La pression urbaine sur les sols

L'artificialisation des sols, c'est-à-dire leur destruction du fait de l'urbanisation au sens large (habitat mais aussi infrastructures de transports et locaux d'entreprises), est identifiée comme une menace importante. Au niveau national, les zones urbaines ont augmenté de 4,8 % de 1990 à 2000 (voir le chapitre « Territoires »). L'artificialisation est d'autant plus préoccupante que les terres grignotées autour des centres urbains sont, en général, d'un grand intérêt pour la production agricole. On observe un mitage urbain important des zones de production agricole à forte valeur ajoutée entourant de grandes villes : comme par exemple pour les vignobles aux alentours de Bordeaux. Il paraît donc essentiel de mieux prendre en compte le potentiel agricole des sols ou leur capacité à remplir des fonctions environnementales dans les politiques d'aménagement du territoire ou les opérations d'urbanisme.

Évolution des terres artificialisées de 1990 à 2000



Source : Union européenne - Ifen, CORINE Land Cover, 2000.

Sites et sols pollués, les inventaires continuent

La pollution locale (quelques dizaines d'hectares au maximum) ou ponctuelle des sols est généralement d'origine industrielle. Sous l'effet de la dispersion par

l'air ou par les eaux percolant dans le sol, elle peut affecter des portions de territoire ou des volumes de sol plus importants. Son origine peut être très variée : rejet dans les panaches des cheminées d'usines, accident de manutention et de transport de matières polluantes, mauvais confinement de produits toxiques sur des sites industriels actuels ou anciens, etc.

La pollution du sol dans les sites industriels, généralement situés en zone urbaine ou périurbaine*, peut avoir des conséquences directes ou indirectes, à plus ou moins long terme, sur la santé humaine. Le sol peut jouer aussi le rôle de réservoir de polluants susceptibles, sous certaines conditions, de devenir mobiles et d'affecter les écosystèmes, les ressources

en eau, puis la chaîne alimentaire. Ces pollutions ont pour effet de stériliser durablement les sols pour certains usages : habitations, espaces récréatifs...

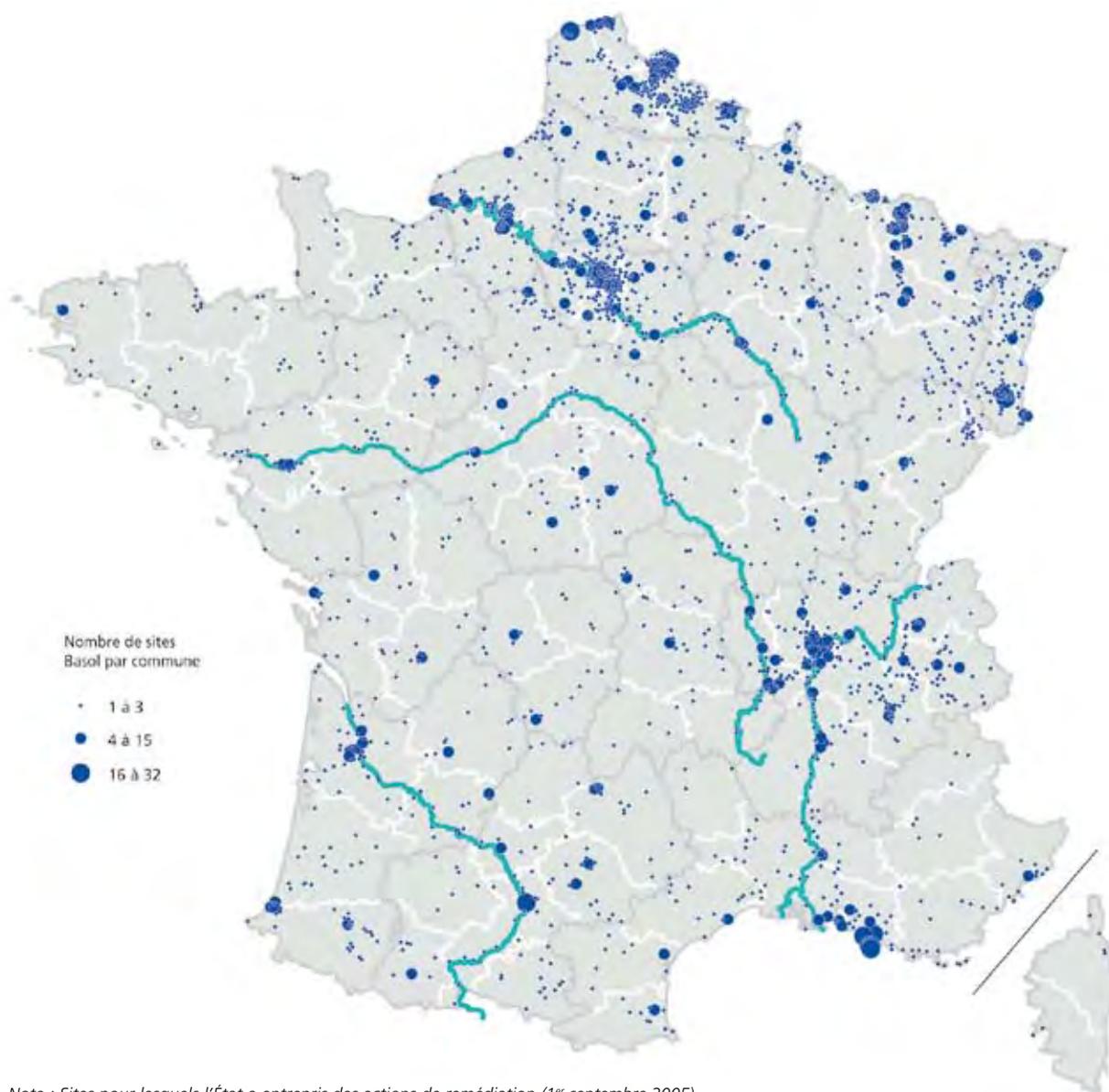
Aujourd'hui, les sols des sites industriels en activité font l'objet d'une attention particulière afin de prévenir toute pollution qui dévaloriserait leur valeur foncière.

Qu'est-ce qu'un site pollué ?

C'est un site présentant un risque, réel ou potentiel, pour la santé humaine ou l'environnement du fait d'une pollution résultant de l'activité actuelle ou ancienne.

Source : Medd (DPPR).

Les sites et sols pollués



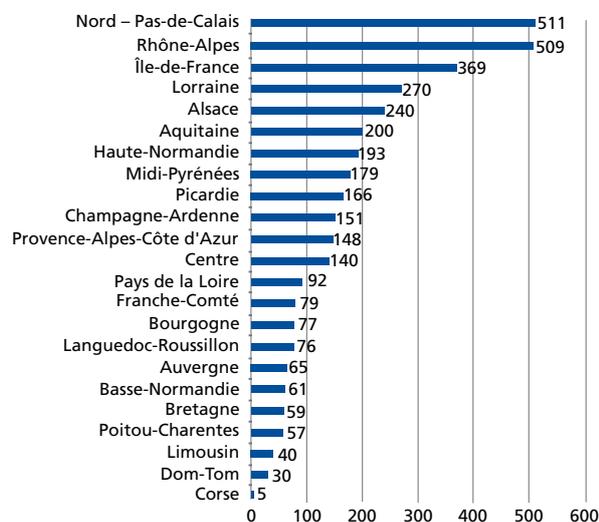
Note : Sites pour lesquels l'État a entrepris des actions de remédiation (1^{er} septembre 2005).

Source : ministère de l'Écologie et du Développement durable - Medd - (direction de la Prévention des pollutions et des risques - DPPR).

La politique française en matière de sites et sols pollués s'appuie sur trois axes : prévenir, traiter-réhabiliter, connaître. La prévention est prise en charge au travers d'une réglementation concernant les installations classées. Le traitement est à la charge des industriels ayant opéré sur les terrains, sauf dans le cas de sites orphelins où l'État peut entreprendre lui-même des opérations de sécurisation ou de remédiation. La mise en œuvre de cette politique passe par la réalisation d'inventaires et une diffusion de l'information la plus large possible. Deux bases de données sont actuellement disponibles sur Internet :

- Basol² (<http://basol.environnement.gouv.fr>), qui recensait, en septembre 2005, 3 717 sites pollués pour lesquels l'État a entrepris une action de remédiation ;
- Basias³ (<http://basias.brgm.fr>), qui dresse l'inventaire des anciens sites industriels et activités de service pouvant éventuellement être à l'origine d'une pollution. Cette dernière sera achevée en 2007 et devrait contenir entre 300 000 et 400 000 sites (voir le chapitre « Industrie »).

Nombre de sites pollués par région



Source : Medd (DPPR), Basol.

La radioactivité du sol et du sous-sol

La radioactivité peut être d'origine naturelle (rayonnements cosmiques, type de roche) ou artificielle. Les sols peuvent hériter des radio-isotopes de la roche dont ils sont dérivés ou subir une contamination radioactive. Ils peuvent constituer pour

2 - Base de données sur les sites et sols pollués.

3 - Base de données des anciens sites industriels et activités de service.

l'homme et l'environnement une barrière atténuant les effets de la radioactivité ou, au contraire, devenir des sources de pollution radioactive aux effets dommageables pour les êtres vivants (voir le chapitre « Environnement et santé »). Aujourd'hui, la perception du risque lié à la radioactivité se focalise le plus souvent sur les effets des radio-isotopes artificiels, mais les émissions radioactives naturelles sont également une préoccupation sanitaire.

Radioactivité naturelle : le radon, un gaz radioactif lié aux formations magmatiques

Le radon, gaz radioactif lié plus particulièrement aux roches magmatiques (granites) présentes dans les massifs anciens, est susceptible de s'accumuler dans des espaces confinés tels que les caves des habitations et constitue un risque important pour l'homme (voir le chapitre « Environnement et santé »). Lorsque les sols ont une perméabilité faible, ils peuvent jouer un rôle de barrière vis-à-vis des émanations de radon.

Radioactivité artificielle : le césium 137 dans les sols français

Le césium 137 (¹³⁷Cs) présent dans l'environnement français a deux origines principales : les retombées des essais atmosphériques d'armes nucléaires effectués entre 1945 et 1980, auxquelles se sont ajoutés en mai 1986 les dépôts consécutifs à l'accident de Tchernobyl. Ces deux origines font du ¹³⁷Cs le radionucléide* artificiel le plus abondant et dont la répartition est la plus hétérogène.

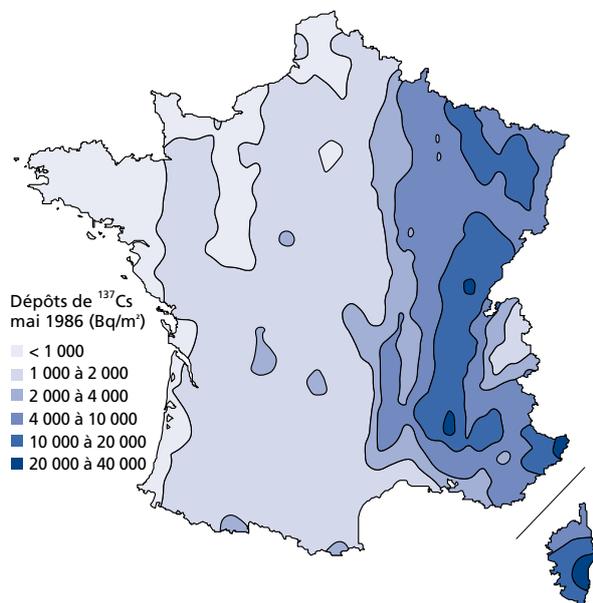
Les dépôts radioactifs consécutifs à l'accident de Tchernobyl (voir le chapitre « Environnement et santé ») ont été très hétérogènes en France en relation avec la trajectoire des masses d'air contaminées et surtout avec l'importance des pluies survenues durant la première semaine de mai 1986. C'est sur le tiers est du pays que les dépôts de ¹³⁷Cs ont été les plus importants, dépassant 10 000 Bq/m² (becquerel* par mètre carré) et atteignant localement 30 000 à 40 000 Bq/m² sur les régions où les pluies ont été les plus importantes. Sur cette partie du territoire et à l'exception de certaines régions de Savoie et Haute-Savoie moins touchées, le césium mesuré aujourd'hui dans l'environnement provient essentiellement de ces dépôts de mai 1986. Plus à l'ouest, les faibles teneurs en césium de l'air ont conduit à des dépôts également plus faibles, ne dépassant pas le plus souvent 4 000 Bq/m². Sur certaines régions comme les monts d'Arrée, la Montagne noire

ou au pied des Pyrénées, le ^{137}Cs mesuré aujourd'hui est principalement attribuable aux essais atmosphériques d'armes nucléaires effectués par le passé.

Jusqu'au début des années quatre-vingt-dix, le milieu atmosphérique constituait le réservoir principal de ^{137}Cs . Après dépôt progressif, le sol est devenu aujourd'hui le réservoir principal pour ce radioisotope qui peut être remobilisé sous l'effet de l'érosion aérienne ou d'inondations.

Le césium, dont la période radioactive est relativement longue (30,2 ans), est un contaminant durable des milieux. Après dépôt sur le sol, il est rapidement adsorbé par les minéraux argileux. Mais en condition acide, il peut passer dans la phase liquide du sol et devenir assimilable par les organismes vivants et, notamment par la végétation, par substitution avec le potassium, élément essentiel aux cycles biogéochimiques. Il y a alors risque d'accumulation et de concentration de polluants radioactifs pour les organismes vivants. Cependant, d'après des mesures de terrain, il semble que la biodisponibilité du ^{137}Cs diminue au cours des années.

Évaluation du dépôt de ^{137}Cs en France consécutif à l'accident de Tchernobyl



Source : Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN).

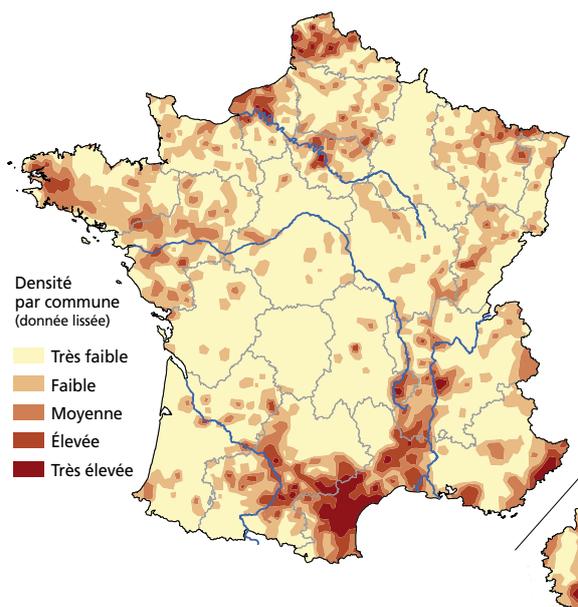
Érosion et coulées boueuses, un phénomène à surveiller

L'érosion est un phénomène naturel, dû au vent, à la glace et surtout à l'eau, qui s'exprime sur l'ensemble des terres émergées. Le phénomène peut parfois

prendre des tournures catastrophiques, soit par l'expression exceptionnelle de l'un de ces facteurs (très fortes pluies...), soit en raison du travail du sol ou de modifications apportées par l'homme aux paysages. Il engendre des dégâts sur les exploitations agricoles, les infrastructures ou les zones résidentielles : apparition, en amont, de ravines profondes s'accompagnant de la perte de la couche fertile superficielle des sols ; submersion, à l'aval, de cultures ou d'infrastructures par des coulées boueuses. Lorsque ces dégâts sont graves, ils font l'objet de demandes d'indemnisation pour catastrophe* naturelle. L'érosion a aussi pour conséquence la dégradation de la qualité de l'eau par les matières en suspension ou les molécules adsorbées sur celles-ci, pouvant conduire à l'interruption de la distribution d'eau potable. De façon moins visible, et sur le plus long terme, un départ progressif de matière et d'éléments fertiles entraîne une perte durable de la fertilité et un déclin de la biodiversité des sols.

Les coulées boueuses sont un phénomène saisonnier, lié notamment aux précipitations et à l'état de la couverture végétale du sol. Il s'exprime fortement en automne dans les régions méditerranéennes. En hiver, ce sont les régions du nord de la France, de l'ouest (Bretagne, Haute et Basse-Normandie), la Lorraine et le Languedoc-Roussillon qui sont les plus exposées.

Densité des coulées boueuses pour la période 1985 à 2000



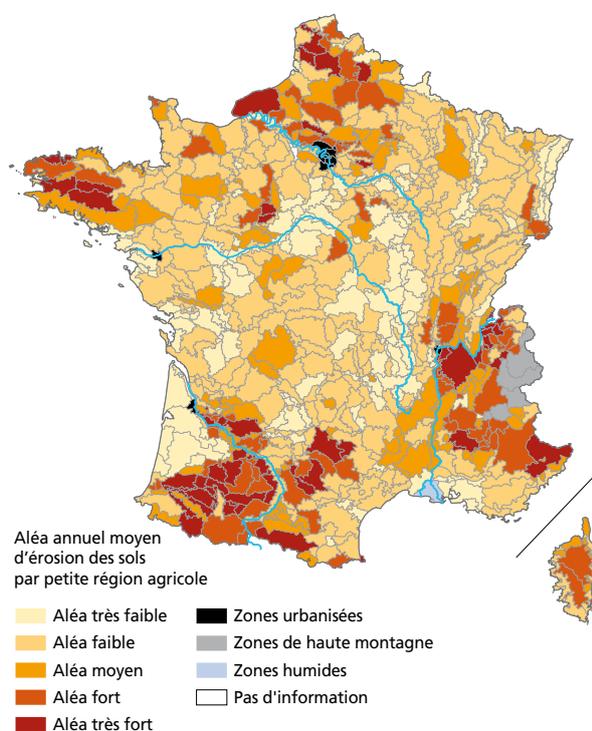
Note : De 1985 à 2000, 17 282 demandes d'indemnisation au titre des catastrophes naturelles pour « coulées boueuses », émanant de 11 415 communes, ont été déposées.

Source : Medd - Inra - Ifen.

En été et au printemps, les régions de grandes cultures (Nord - Pas-de-Calais, Haute-Normandie, Aquitaine) subissent une érosion due aux orages.

Le modèle d'aléa d'érosion développé à l'Inra d'Orléans montre que 18 % de la surface du territoire français sont concernés par un aléa moyen à très fort. Dans les régions où l'aléa d'érosion est fort à très fort, la pression démographique, si elle se traduit par une forte extension de l'habitat, pourrait entraîner l'augmentation du nombre de demandes d'indemnisation.

L'aléa d'érosion des sols



Note : Ce modèle combine différentes bases de données sur les sols, les précipitations et les pentes. Il décrit la facilité avec laquelle les sols sont susceptibles de s'éroder.

Source : Gis Sol.

On observe sur la période 1985-2000 un accroissement du nombre de demandes d'indemnisation pour coulées boueuses. Il peut être lié à l'augmentation de la vulnérabilité des populations par l'extension de l'urbanisation dans des zones sensibles à l'érosion, induisant une recrudescence des demandes d'indemnisation pour coulées boueuses. Ainsi, la croissance de la population (+14,10 %) de 1982 à 1999 dans les communes affectées par des coulées boueuses est supérieure à la croissance nationale (+11,4 %). 54 % des coulées boueuses observées de 1985 à 2000 se sont produites dans l'espace à dominante rurale*.

Pour le Languedoc-Roussillon, dont la population pourrait croître de plus de 30 % d'ici 2030, la maîtrise des risques liés à l'érosion représentera un enjeu très important. On peut s'attendre à une recrudescence des problèmes liés à l'érosion, pour les régions qui présentent des surfaces importantes qualifiées en aléa fort à très fort, une densité de coulées moyenne et des taux d'accroissement de la population élevés à très élevés : Aquitaine, Midi-Pyrénées, Paca, Rhône-Alpes, Corse.

L'augmentation du risque d'érosion peut aussi être la conséquence d'un développement de l'aléa sous l'effet d'autres facteurs tels que les modifications des pratiques agricoles ou l'évolution climatique (intensité et répartition des pluies). Les modèles de prévision de Météo France et de l'Institut Pierre-Simon Laplace indiquent une augmentation probable des pluies intenses sur le nord de la France et, à l'horizon 2070-2100, un doublement de la fréquence des pluies fortes en hiver sur toute la façade ouest du pays. Le nombre de coulées boueuses pourrait donc s'accroître en Aquitaine et en Bretagne.

L'érosion est, pour la Commission européenne, la principale menace pesant sur les sols. On évalue à environ 17 % la surface du territoire européen affectée par l'érosion, à des degrés divers. Partout, une aggravation des phénomènes d'érosion a été observée en raison des activités humaines ou du fait des évolutions climatiques.

Le retrait-gonflement des argiles occasionne des dégâts importants

Certains minéraux argileux présents dans les sols peuvent varier de volume en fonction de la teneur en eau des terrains. Ils se « rétractent » lors des périodes de sécheresse (phénomène de « retrait ») et gonflent lorsqu'ils sont à nouveau hydratés (phénomène de « gonflement »). Ces mouvements sont lents, mais ils peuvent atteindre une amplitude assez importante pour causer de graves dommages aux bâtiments qui se trouvent sur ces terrains.

La variation de la teneur en eau des terrains peut être la conséquence d'une situation météorologique inhabituelle (sécheresse ou forte pluviométrie), d'une fluctuation du niveau des nappes souterraines, de modifications hydrologiques dues à l'intervention humaine. Dans le cas d'un phénomène de retrait, des arbres situés à proximité de bâtiments peuvent être un facteur aggravant en raison des prélèvements d'eau par leur système racinaire.

Les dégâts occasionnés par ce type de mouvement de terrain sont indemnisables au titre des catastrophes naturelles et représentent aujourd'hui le deuxième poste de dépense des assurances (*voir le chapitre « Société face aux risques majeurs »*).

À la demande du ministère de l'Écologie et du Développement durable (Medd), le Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM) a entrepris, depuis 1997, de dresser des cartes d'aléa au 1/50 000 pour 64 départements. Ce programme devrait très certainement être étendu à l'ensemble des départements et être achevé d'ici 2009 ou 2010. Il se base sur l'identification des formations argileuses à partir des cartes géologiques auxquelles on attribue une susceptibilité vis-à-vis du phénomène de retrait-gonflement. La carte ainsi obtenue est combinée avec des données sur les sinistres et permet finalement de réaliser une carte d'aléa retrait-gonflement des argiles. Il s'agit évidemment de cartes probabilistes. Tous les rapports départementaux sont téléchargeables sur le site Internet dédié⁴.

Le sous-sol

Le patrimoine géologique

Le patrimoine géologique est aujourd'hui officiellement reconnu. Il fait l'objet de mesures de protection au même titre que le patrimoine vivant. La loi n° 76-629 du 10 juillet 1976 sur la protection de la nature a abouti à la création, depuis 1982, de 12 réserves naturelles nationales et 14 réserves naturelles régionales géologiques. S'y ajoutent environ 30 réserves dont la raison principale de classement est le patrimoine vivant mais qui présentent un grand intérêt géologique.

Le patrimoine géologique doit être en effet considéré comme un témoin de l'histoire de la Terre, et nous renseigne sur les évolutions du vivant et des conditions de vie à la surface de notre planète. Il est par conséquent riche d'enseignement sur des problématiques telles que le changement climatique. Des inventaires régionaux du patrimoine géologique sont en cours sous la responsabilité scientifique du Muséum national d'histoire naturelle (MNHM) et avec le soutien méthodologique du BRGM. La méthodologie a été mise au point par la Conférence permanente du patrimoine géologique (CPPG), présidée par la direction de la Nature et des Paysages du ministère chargé de l'Environnement, lieu de

Les réserves naturelles dédiées au patrimoine géologique



Réserves naturelles nationales : 62 : Réserve géologique de Saucats - La Brède ; 63 : François Le Bail (île de Groix) ; 69 : Falaise du Cap-Romain ; 73 : Réserve géologique de Haute-Provence ; 88 : Grotte du T.M. 71 ; 90 : Réserve géologique du Luberon ; 91 : Toarcien ; 96 : Sites géologiques de l'Essonne ; 104 : Vireux-Molhain ; 117 : Sainte-Victoire ; 145 : Pointe de Givet.

Réserves naturelles régionales : 33 : Longeville-lès-Saint-Avold ; 114 : Itteville ; 16 : Four à chaux de Pontlevoy ; 84 : Menat ; 83 : Puy de Marmant ; 148 : La Gironnette ; 65 : Lavergne ; 89 : Montredon ; 132 : Coumiac ; 90 : La Lieude ; 91 : Aumelas ; 86 : Robiac ; 87 : Saturnin-Garimond ; 93 : Saint-Martin-de-Bromes.

Source : Réserves naturelles de France, d'après la revue *Géologues*, n° 140, Union française des géologues.

concertation des principaux acteurs de la protection du patrimoine géologique. À partir de ces inventaires, on peut espérer la mise en place d'une stratégie nationale de protection du patrimoine géologique comparable à ce qui existe pour la faune et la flore.

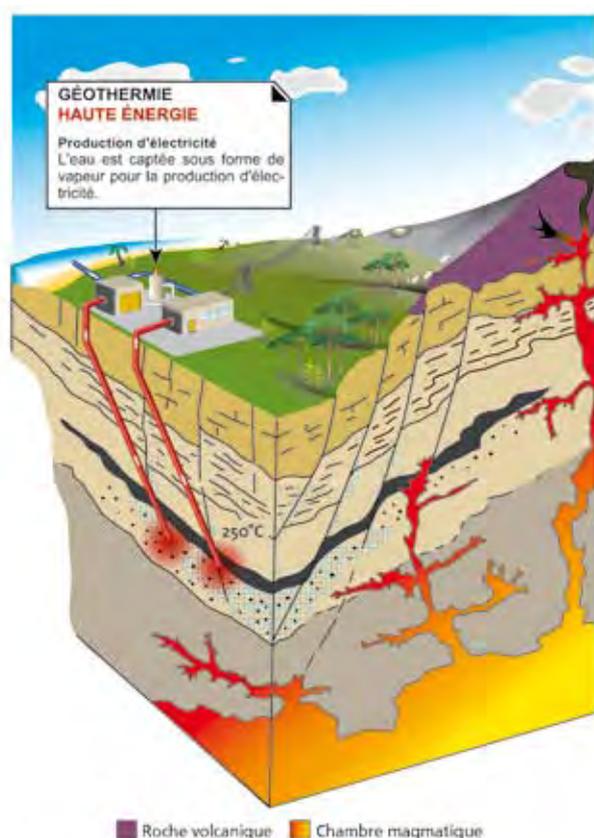
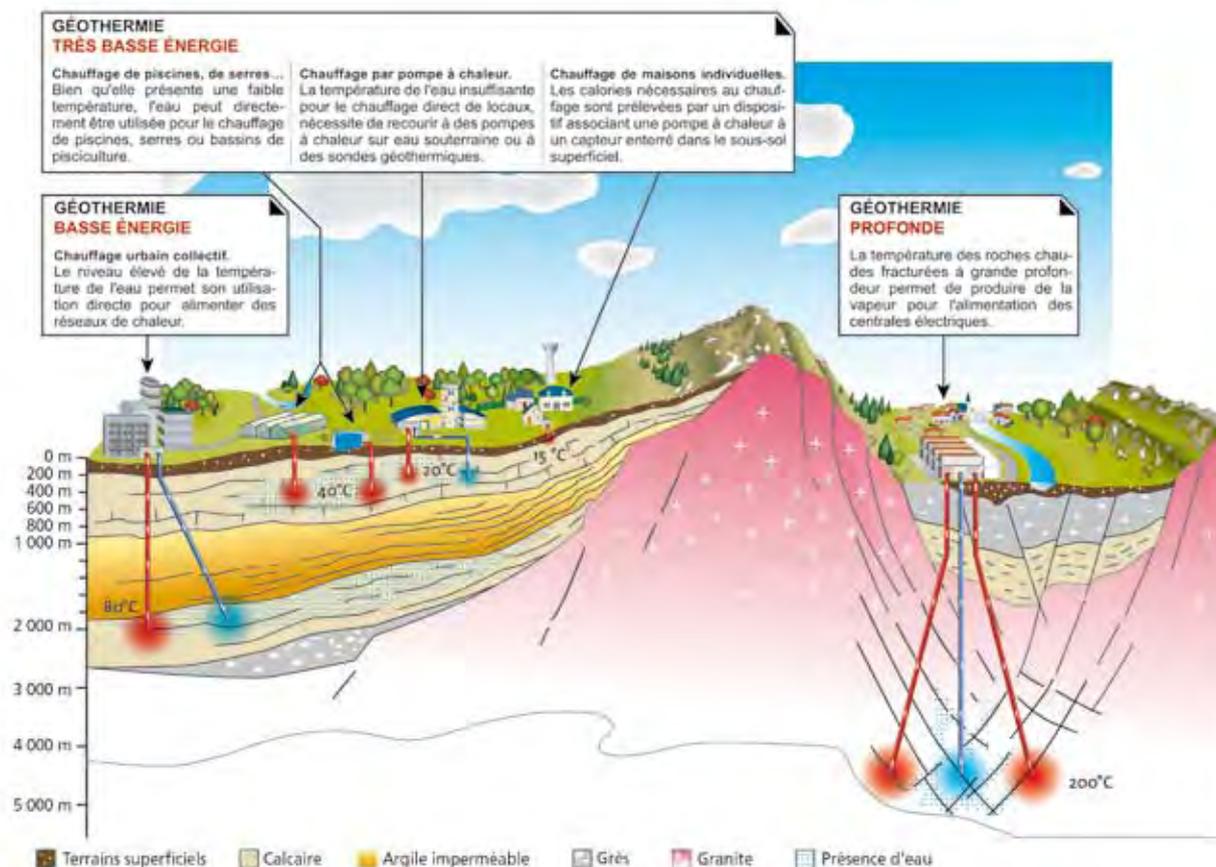
La géothermie : une ressource énergétique omniprésente et propre

On appelle géothermie toutes les manifestations de chaleur de la Terre, issues de son noyau et du manteau de roches en fusion qui l'entoure, et les processus permettant de les exploiter. Ces processus consistent à extraire l'énergie pour la stocker directement dans les terrains ou dans les aquifères qu'ils contiennent.

En France, le gradient géothermique moyen est de 4 °C tous les 100 m, avec un minimum de 2 °C/100 m au pied des Pyrénées et un maximum de 10 °C/100 m dans le nord de l'Alsace. L'énergie géothermique est encore assez peu exploitée en

4 - <http://www.argiles.fr>

Les différents types de ressources géothermiques



France, en raison, jusque-là, du faible coût des énergies fossiles. Mais face à la montée des cours du pétrole et pour limiter l'émission des gaz à effet de serre, elle est amenée à jouer un rôle grandissant. Elle a, cependant, été utilisée depuis 1967 pour alimenter soit directement l'industrie, soit des réseaux de chaleur pour l'habitat collectif. En Europe, le taux de croissance de l'énergie produite par géothermie a été de 4,3 % en 2001 et 2002. 55 pays à travers le monde utilisent la géothermie, pour une puissance équivalente à 1 % de la consommation mondiale d'énergie.

Qu'est-ce que le gradient géothermique ?

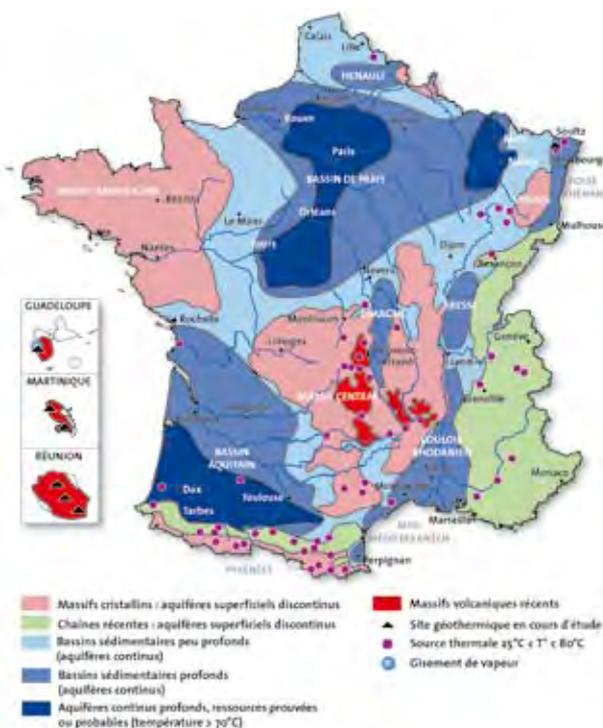
Le gradient géothermique est l'accroissement de la température de la surface de la Terre vers son centre. Il est en moyenne de 3,3 °C tous les 100 m pour la planète et varie selon le contexte géologique.

Une exploitation géothermique produit peu de rejets et le CO₂ est en général réinjecté dans le sous-sol. C'est également une énergie renouvelable.

Source : Site Internet Géothermie-Perspectives de l'Ademe et du BRGM (<http://www.geothermie-perspectives.fr>).

Des inventaires régionaux dressés dans les années quatre-vingt et en cours de réactualisation indiquent que des aquifères superficiels sont exploitables sur tout le territoire pour la géothermie très basse énergie. D'importants gisements de géothermie basse énergie, mis en exploitation dès les années quatre-vingt, sont présents à l'aplomb de zones de très forte concentration urbaine comme l'Île-de-France. La centrale de Bouillante, située près de la Soufrière en Guadeloupe, est une installation de géothermie haute température qui devrait permettre de couvrir, grâce à son extension en 2004, 10 % des besoins annuels de l'île en électricité. La géothermie profonde, quant à elle, ouvre encore de nouvelles perspectives de production d'électricité de manière renouvelable et propre. Le programme expérimental franco-anglo-allemand et européen, sur le site de Soultz-sous-Forêts, en Alsace, après des essais concluants utilisant deux puits allant jusqu'à 3 800 m, sera poursuivi et sa capacité de production progressivement augmentée jusqu'à 25 MW (méga watt) à l'horizon 2010. La rentabilité de la géothermie profonde reste conditionnée par l'abaissement des coûts de forage, ce qui semble réalisable. Les zones de fort gradient géothermique, dans lesquelles les roches sont naturellement fracturées en profondeur, seraient les cibles potentielles de tels projets.

Le cadre géologique des ressources géothermiques en France



Source : Site Internet Géothermie-Perspectives de l'Ademe et du BRGM (<http://www.geothermie-perspectives.fr>).

Les matériaux de construction : mieux gérer la ressource

Vers une pénurie de granulats alluvionnaires ?

La France a utilisé, en 2003, selon l'Union nationale des producteurs de granulats (UNPG), environ 400 millions de tonnes de granulats issus de roches meubles ou massives, soit environ 7 tonnes par habitant. 328 millions de tonnes sont utilisées pour le génie civil et 85 millions pour le bâtiment.

La consommation de granulats est en croissance régulière. La part des matériaux alluvionnaires est, quant à elle, en décroissance constante, en raison des contraintes environnementales que pose leur exploitation.

Ces matériaux alluvionnaires sont remplacés par des matériaux concassés qui ne présentent pas toujours les mêmes qualités techniques, et sont exploités sur des sites souvent éloignés des zones d'utilisation. Les professionnels s'inquiètent, par conséquent, d'une possible pénurie de granulats alluvionnaires, dès 2006, plus ou moins sévère selon les régions.

Les possibilités de substitution

Les granulats obtenus par concassage de la roche peuvent, moyennant modification des formules des bétons, se substituer aux granulats alluvionnaires. La France utilise déjà près de 60 % de ce type de granulats, ce qui est presque une fois et demi plus que la Grande-Bretagne ou l'Allemagne. Les sites d'exploitation sont souvent éloignés des centres de consommation mais génèrent des problèmes environnementaux liés au transport. D'autres solutions consistent à exploiter d'anciennes terrasses alluviales qui fournissent des matériaux équivalents en qualité aux granulats alluvionnaires, mais les gisements sont souvent localisés assez loin des zones de consommation. Les granulats marins sont encore très peu exploités en France (environ 1 % du volume de granulats) et pourraient être, à l'avenir, une importante source de matériaux de bonne qualité. L'impact sur le milieu marin devra être évalué. Les déchets du BTP peuvent aussi être recyclés moyennant des tris et des traitements de dépollution. Enfin, le bois ou de nouveaux matériaux issus du recyclage* du verre ou des métaux peuvent aussi se substituer aux granulats.

Gérer la ressource

Même si l'utilisation de matériaux de substitution s'accroît, les granulats de type alluvionnaire resteront indispensables et de nouveaux gisements devront être mis en exploitation. Le choix du type de granulats ne devrait pas résulter uniquement de la proximité de son gisement, mais de l'intérêt de son usage vis-à-vis de la qualité attendue de l'ouvrage à construire. Les données recueillies dans les schémas départementaux des carrières devraient être agrégées au niveau national de façon à permettre une gestion plus pertinente et durable des différentes qualités de granulats.

La mise en exploitation de nouveaux gisements alluvionnaires ou en roche soulève souvent de nombreuses oppositions de la part des populations locales, contribuant aussi à l'éloignement des carrières. Mais cela pose alors d'autres problèmes environnementaux liés au transport des matériaux.

L'après-mine et le risque d'effondrement

L'exploitation de gisements miniers (charbon, métaux, etc.) a profondément modifié les milieux naturels. Avec la fermeture des mines s'est posé le problème du devenir des sites miniers et de la gestion de l'après-mine : gestion des sites de stockage des résidus miniers ou des dépôts de stériles*, pouvant donner lieu à des pollutions de l'eau ou de l'air (poussières), effondrements dus aux cavités souterraines des mines non foudroyées ou remblayées, etc.

Le risque d'effondrement se pose plus particulièrement dans les grands bassins miniers du Nord - Pas-de-Calais et de Lorraine. Les affaissements* qui se sont produits à Auboué en 1972 et 1973, suite à l'envolement des galeries de mine, ont conduit à raser l'ensemble d'un quartier. En France, en 2005, 136 communes étaient concernées par ce risque, réparties principalement entre l'Ariège et la Moselle. Il faut distinguer les effondrements brutaux (comme les fontis*) des zones d'affaissement progressif. Les premiers peuvent causer des pertes en vies humaines et sont généralement très localisés, les seconds peuvent affecter des centaines de maisons (fissuration) et donc toucher une large population. Les affaissements progressifs, qui touchent surtout les bassins miniers par ailleurs souvent confrontés à de graves difficultés économiques,

ont suscité une grande émotion dans l'opinion et ont contribué à une prise de conscience des pouvoirs publics. En milieu urbain ou périurbain, la demande foncière peut exacerber les pressions sur les anciennes friches minières. Ces situations ont conduit à des mesures de remédiation ou à la mise en place de servitudes permettant la maîtrise des risques, et surtout à l'élaboration et la mise en œuvre de plans de prévention des risques miniers (PPRM). Dans leur cadre, les zones les plus dangereuses sont déclarées inconstructibles, et pour les autres zones, des précautions techniques doivent être prises lors de la construction de nouveaux édifices : choix de l'implantation, type de fondations, choix des matériaux, structure et modalités de raccordement aux réseaux, etc.

Les cavités souterraines hors mines : un risque majeur national

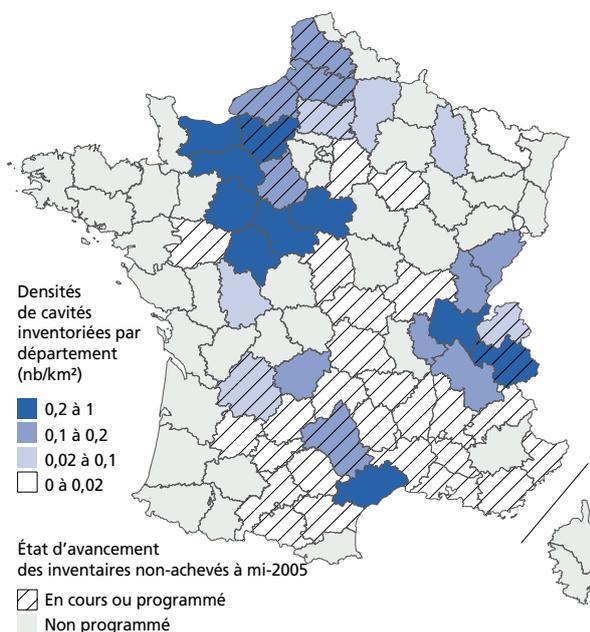
On rencontre des cavités souterraines dans la plupart des départements français. Leur nombre est estimé à environ 500 000. La France, en raison de sa géologie mais également de son histoire ancienne et de son développement industriel, est le siège de très nombreuses cavités dans le sous-sol.

En matière de cavités naturelles, les régions calcaires sont les plus concernées (Alpes, Jura, Pyrénées, Causses), mais on citera également les vastes ensembles gypseux de l'agglomération parisienne. En ce qui concerne les carrières souterraines, l'urbanisation ancienne de l'Île-de-France et du val de Loire

Les grandes familles de cavités souterraines

- Les cavités naturelles, issues pour l'essentiel de la dissolution plus ou moins rapide des roches carbonatées ou sulfatées.
- Les vides anthropiques hors concessions minières, parmi lesquels on nommera :
 - les carrières souterraines ;
 - les caves servant au remisage ou à des activités agricoles, voire industrielles ;
 - les cavités à usage d'habitation ;
 - les souterrains refuges ;
 - les sapes de guerre et ouvrages militaires surtout développés lors de la première guerre mondiale ;
 - les ouvrages civils.
- Les mines (charbon, métaux, sels, etc.).

Cavités souterraines : inventaires et densités



Source : BRGM, 2005.

(pierre à bâtir et gypse) en font des régions particulièrement affectées. Les marnières, petites carrières souterraines dans la craie servant à l'amendement des champs, sont fréquentes en Normandie et Picardie. Cette dernière est également affectée par les ouvrages militaires souterrains abandonnés par les nombreuses lignes de front qui la traversaient lors de la première guerre mondiale. Enfin, la Lorraine et le Nord - Pas-de-Calais recèlent un grand nombre de mines abandonnées.

Les cavités, en fonction de leur géométrie, de leur profondeur, de la nature des terrains encaissants et du recouvrement, de leur âge et de leur entretien, peuvent se révéler plus ou moins propices au développement d'instabilités en surface. L'usage est de classer les instabilités en trois grandes catégories fonction de l'ampleur ou de la brutalité du mouvement : les affaissements, les fontis, les effondrements généralisés.

Ces phénomènes sont souvent dommageables lorsqu'ils se produisent en zone habitée : les 76 événements de ce type recensés depuis deux siècles ont fait plus de 270 victimes humaines.

La politique de prévention

L'État a confié au BRGM une mission consistant à inventorier les cavités souterraines abandonnées (hors mines) sur plus de 40 départements⁵. La loi n° 2003-

699 du 30 juillet 2003, relative à la prévention des risques technologiques et naturels et à la réparation des dommages, oblige à informer de l'existence d'une cavité souterraine lors des actes de ventes ou de location. Les préfetures doivent dresser la liste des communes contenant des cavités souterraines.

La prévention des risques liés aux cavités repose aussi sur une politique raisonnée de l'aménagement du territoire et de la maîtrise de l'urbanisation. La construction est, en effet, interdite ou sévèrement réglementée dans les zones exposées aux phénomènes d'effondrement (*voir le chapitre « Société face aux risques majeurs »*).

Enfin, à l'échelon national, la diffusion la plus large de l'information (notamment *via* Internet) vers le public et les élus, ainsi que la généralisation progressive des plans de prévention des risques (PPR)* dans les zones les plus exposées (cartes départementales d'aléa) devraient permettre de limiter les risques encourus.

Stockage et séquestration dans le sous-sol

L'histoire géologique de la Terre se caractérise par un perpétuel remaniement de matière. Notre planète a ainsi stocké dans son enveloppe solide externe (la lithosphère*) de grandes quantités de composés du carbone sous forme de carbonates ou d'hydrocarbures, qui font l'objet d'une exploitation massive, en particulier depuis l'avènement de l'ère industrielle. Cette capacité de stockage de l'écorce terrestre, ou stockage géologique, est déjà mise à contribution par les distributeurs de gaz et fait l'objet d'investigations pour le stockage de déchets nucléaires ou de déchets industriels spéciaux qui ne satisfont pas aux critères d'admission dans les sites de classe I.

Le stockage souterrain du gaz, une pratique ancienne

Le stockage de gaz en réservoirs souterrains est une pratique ancienne et très courante, qui permet la constitution de réserves pour faire face à des pics saisonniers de consommation. Il présente l'avantage d'épargner la construction de structures aériennes de plusieurs hectares de surface et réduit considérablement les risques d'accidents : le gaz est en effet isolé de l'air, son comburant* naturel. En général, un réservoir de gaz est situé entre 400 et 2 000 m de profondeur et est constitué d'un aquifère surmonté d'une couche géologique imperméable. Le

5 - <http://www.bdcavite.net>

gaz est injecté dans l'aquifère et se trouve piégé sous la couche imperméable, au sommet de structures anticlinales⁶. Toutes les précautions doivent être prises pour que les variations de pression liées à l'exploitation des réservoirs ne nuisent pas à d'autres utilisations de la ressource en eau : thermalisme, géothermie, alimentation en eau potable, irrigation... Les stockages souterrains de gaz relèvent de la directive « Seveso II » 96/82/CE du 9 décembre 1996 et sont régis, depuis 2003, par le Code minier.

Principaux sites de stockage souterrain de gaz



Note : Les gisements de gaz, situés entre 400 et 1 600 m de profondeur, renferment au total l'équivalent de plus de 4 mois de consommation nationale, soit 9,9 milliards de m³ de gaz naturel.

Source : ministère chargé de l'Industrie.

Le stockage des déchets nucléaires

La loi n° 91-1381 du 30 décembre 1991, dite loi « Bataille », a fixé les grandes lignes directrices des recherches concernant les déchets radioactifs à vie longue et à haute activité. Elle prévoit notamment la mise en place de laboratoires souterrains permettant d'étudier des solutions de stockage dans les formations géologiques. Dans ce cadre, l'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (Andra) a mis en place un laboratoire souterrain à Bure, dans l'est de la France. Fin 2004, des galeries expérimentales situées dans une formation argileuse à 445 m sous la surface ont été mises en place et instrumentées. Un

6 – Plissement de roche dont la concavité est tournée vers le bas.

rapport d'évaluation sur les travaux relatifs aux déchets nucléaires et un projet de loi ont été examinés par le Parlement au cours du premier semestre 2006. Cette loi précisera les solutions choisies pour faire face au problème du stockage des déchets à longue durée de vie, en tenant compte de la nécessité de la réversibilité de ce stockage.

La séquestration du carbone

De nombreux gisements naturels de gaz carbonique existent à travers le monde. En France, 8 gisements de ce type ont été repérés dans le sud-est de la France depuis les années soixante et de nombreuses sources d'eau riche en gaz carbonique sont exploitées pour le thermalisme ou comme eau minérale.

Le stockage géologique pourrait être une solution complémentaire à la politique de réduction des émissions de dioxyde ou monoxyde de carbone liées à l'activité humaine. Trois types de stockages sont envisageables : dans les aquifères salins profonds, dans les anciens sites de pétrole ou de gaz naturels épuisés, dans les veines de charbon.

Le stockage dans les aquifères salins profonds offre, au niveau de la planète, les capacités de loin les plus importantes de stockage : de 400 à 10 000 Gt (giga tonnes) de CO₂ (1 Gt = 1 milliard de tonnes). Les sites potentiels ont une très large répartition géographique et peuvent être situés à proximité des grands centres industriels. On connaît cependant encore mal les caractéristiques de tels réservoirs.

Les anciens gisements d'hydrocarbures sont des objets mieux connus, mais ils sont souvent éloignés des zones d'émission et représentent de moindres capacités de stockage : 930 Gt.

Le stockage en veine de charbon, qui est le plus souvent situé près des zones d'émission de CO₂, permettrait de récupérer du méthane. Mais les capacités de stockage sont limitées à 40 Gt.

De nombreux projets sont à l'étude. Le projet Castor (*Capture and storage of CO₂*), doté d'un budget de 15,8 millions d'euros dont 8,5 apportés par l'Union européenne, concerne 11 pays européens. Il a été lancé en février 2004 et se poursuivra jusqu'en 2008. L'un de ses deux objectifs est la validation du principe de stockage au travers de l'étude de quatre sites : un gisement pétrolier abandonné en Méditerranée, un aquifère salin profond en mer du Nord et deux gisements de gaz épuisés, l'un en mer du Nord, l'autre en Autriche.

Il reste donc, avant la mise en œuvre concrète d'un stockage massif du carbone, de nombreux obstacles technologiques et économiques à lever, tant dans la mise en opération des réservoirs que dans le transport du CO₂. Par ailleurs, il sera à terme nécessaire d'éclaircir le statut juridique du CO₂ et de déterminer s'il doit être considéré comme un déchet. La réglementation devra également tenir compte de la notion de stockage sur le long terme.

Sismicité modérée pour la Métropole, forte pour les départements d'outre-mer

Comparée à la Turquie, la Grèce, l'Italie et l'Algérie, la France métropolitaine est soumise à un risque sismique modéré (*voir le chapitre « Société face aux risques majeurs »*). Il faut cependant garder à l'esprit que des séismes destructeurs s'y sont produits dans le passé. Les études sur la sismicité historique montrent qu'environ 15 à 20 % du territoire métropolitain est exposé. Ces séismes, dont les foyers sont surtout superficiels, résultent du lent rapprochement des plaques eurasienne et africaine.

En Métropole, la sismicité est essentiellement présente le long des grands accidents tectoniques (zones de failles et plissements souvent anciens) : dans les Alpes, en Provence, sur la Côte d'Azur, dans les Pyrénées et le Fossé rhénan, les Limagnes d'Allier et de la Loire, et dans une moindre mesure dans le Massif armoricain (Bretagne, Vendée, détroit du Poitou) ainsi que dans le Massif central et au sud-ouest des Vosges. Chaque année, la France recense en moyenne une vingtaine de séismes de magnitude supérieure à 3,5, alors que plusieurs milliers d'entre eux sont ressentis dans le Bassin méditerranéen. Les Bassins parisien et aquitain sont pratiquement exempts de tout séisme.

On peut noter quelques séismes récents d'assez forte magnitude : le 22 février 2003 à proximité de Saint-Dié (magnitude 5,5) et le 30 septembre 2002 à Lorient (magnitude 5,5).

Les Antilles françaises (archipel des Petites-Antilles), situées à l'aplomb de la zone de subduction* de la plaque nord-américaine sous la plaque des Caraïbes, sont en revanche soumises à un risque sismique élevé. Les séismes ressentis à la Réunion sont d'origine volcanique.

Volcans : une histoire ancienne pour la Métropole, une actualité pour les Dom-Tom

Les volcans et leurs manifestations sont le résultat d'une remontée de magma à la surface du globe. Ils peuvent être considérés comme un transfert de matière et d'énergie. Le volcanisme concerne les Dom et, dans une moindre mesure, la Polynésie française et le Massif central.

En France métropolitaine et en Polynésie française (îles de la Société, Marquises, îles Australes), les volcans sont en sommeil. Cela signifie que certains d'entre eux peuvent, même si le risque doit être considéré actuellement comme négligeable, entrer à nouveau en éruption. Dans le Massif central, le volcanisme s'est manifesté de façon continue de -65 millions d'années à 7 000 avant JC, l'épisode volcanique le plus récent étant situé dans la chaîne des Puys et le Vivarais. Il s'agit d'un volcanisme interne à une plaque tectonique, beaucoup moins courant que le volcanisme associé aux bordures de plaques. La croûte continentale serait anormalement amincie sous le Massif central (24 km au lieu de 30). Cela correspondrait à une anomalie thermique et une zone partiellement fondue. Le gradient géothermique de cette zone est très élevé.

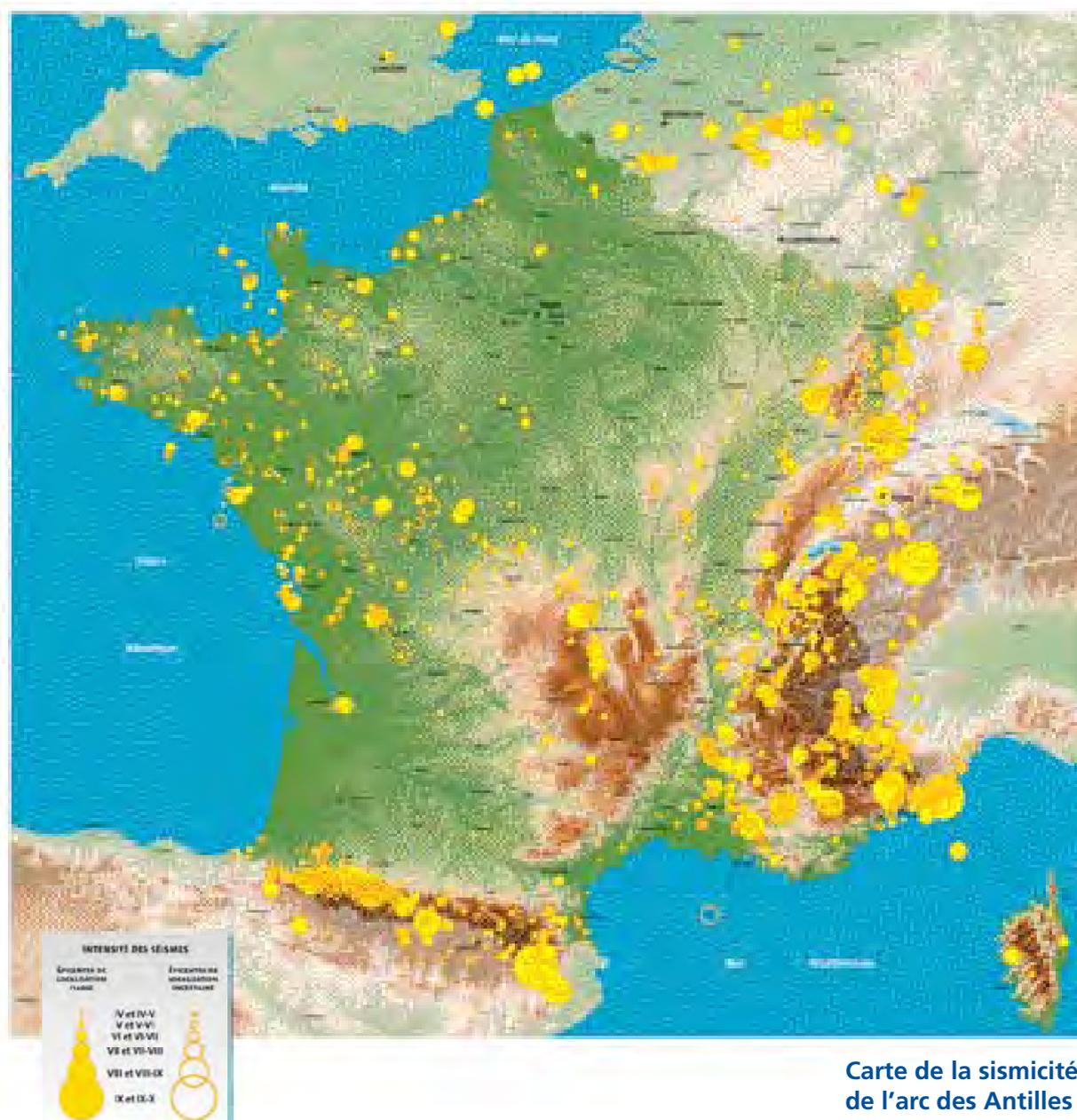
Si le volcanisme ne représente pas de danger en Métropole, il pose en revanche des problèmes de sécurité aux populations dans les Dom-Tom (*voir le chapitre « Société face aux risques majeurs »*) et doit être considéré comme un risque majeur*. Une éruption est précédée par des phénomènes annonciateurs (séismes, modifications de la nature des gaz et de la température) qui font l'objet d'une étroite surveillance organisée par l'Institut de physique du globe de Paris.

Les éruptions peuvent s'accompagner de phénomènes très meurtriers comme les nuées ardentes*, les lahars* (coulées de boue) ou les émanations gazeuses.

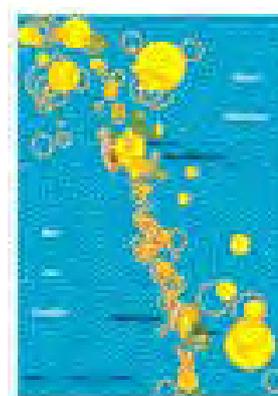
La Réunion est régulièrement le théâtre d'éruptions modérées qui n'occasionnent cependant pas de dégâts importants. Le volcanisme dans l'arc des Antilles correspond à une zone de subduction, c'est-à-dire d'affrontement de plaques océaniques.

Le volcanisme ne comporte pas que des risques, il a aussi des aspects positifs : les volcans sont des sources de minéraux, de matériaux (pouzzolane) et d'énergie géothermique. Les sols des zones volcaniques sont aussi, en général, réputés pour leur fertilité. Le volcanisme génère également du tourisme.

Carte des séismes sur le territoire métropolitain



Carte de la sismicité de l'arc des Antilles



Échelle d'intensité Description des effets perceptibles des séismes

- IV et IV-V Faibles : vibrations prononcées des portes et fenêtres
- V et V-VI Assez forts : ressenti par tout le monde, chute d'objets instables
- VI et VI-VII Forts : déséquilibre des personnes, chute de tuiles
- VII et VII-VIII Violents : large fissuration des murs, chute de cheminées
- VIII et VIII-IX Très violents : écroulement d'une partie des habitations
- IX et IX-X Désastreux : destructions généralisées, nombreux effondrements

Note : Principaux épicentres depuis 1 000 ans.

Source et réalisation cartographique : BRGM, 2004.

Réponses et perspectives

Le sol et le sous-sol, compartiments fondamentaux de l'environnement, sont fortement interfacés avec les autres milieux. Les politiques de gestion et de préservation que l'on peut leur appliquer doivent, par conséquent, être en cohérence avec celles des autres milieux et avec les politiques sectorielles. Le sol et le sous-sol restent, malgré tout, assez mal connus si on les compare à d'autres milieux, et assez peu pris en compte dans les politiques environnementales.

Les préoccupations environnementales, les inquiétudes concernant la sécurité alimentaire ou vis-à-vis des risques naturels (mouvements de terrain) et les risques de pénurie ont également mis en lumière les lacunes en matière de système d'information. Ces considérations ont pourtant suscité, depuis quelques années, une prise de conscience de la part des pouvoirs publics. Elle s'est traduite à la fois par le développement de réseaux d'observation et de programmes d'inventaires pour le sol et le sous-sol et par une meilleure visibilité des données disponibles. La complexité de ces compartiments et la lenteur des phénomènes qui s'y déroulent nécessitent des politiques sur le long terme, dotées de ressources pérennes.

Pour le sol, la création du Groupement d'intérêt scientifique sur les sols (Gis Sol)⁷, regroupant des moyens des ministères chargés de l'Environnement et de l'Agriculture, de l'Ifen, de l'Inra, de l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (Ademe) et de l'Institut de recherche pour le développement (IRD), a créé un cadre pour la mise en œuvre de programmes nationaux.

De nombreux inventaires concernant les sols (pollution industrielle) et le sous-sol sont en cours d'achèvement, en particulier ceux touchant aux risques : mouvements de terrains, cavités souterraines, anciens sites industriels et d'activités de service. Les bases de données résultant de ces programmes sont accessibles via le site Internet du BRGM⁸.

On peut espérer que les programmes relatifs aux sols bénéficient aussi de la dynamique initiée par la Commission européenne⁹ après la communication de 2002, relative à la stratégie thématique pour la protection des sols. Elle devrait déboucher à terme sur une directive « Sol ».

Pour en savoir plus

- Association française pour l'étude du sol, 2004. Numéro spécial : « Connaître les sols pour mieux les protéger », *Étude et gestion des sols*, vol. 11, n° 3, pp. 179-370.
- BRGM, Ademe, IFP, 2005. *La capture et le stockage géologique du CO₂ : réduire les émissions de gaz à effet de serre*. Orléans, BRGM Éditions. 44 p.
- Calvet R., Barriuso E., Bedos C. et al., 2005. *Les pesticides dans le sol : conséquences agronomiques et environnementales*. Paris, Éditions France agricole. 637 p. (coll. *Référence scientifique*).
- Girard M. C., Walter C., Rémy J. C. et al., 2005. *Sols et environnement*. Paris, Dunod. 816 p. (coll. *Sciences sup*).
- Ifen, 2005. « L'érosion des sols, un phénomène à surveiller », *Le 4 pages*, n° 106, 4 p.
- Ifen, 2003. *Les comptes de la dépense de protection de l'environnement : La gestion des déchets radioactifs 1998-2001*. Orléans, Ifen. 42 p. (coll. *Études et travaux*, n° 38).
- Inra, 2002. « Contribution à la lutte contre l'effet de serre : stocker du carbone dans les sols agricoles de France ? » (*rapport d'expertise collective réalisé par l'Inra à la demande du ministère de l'Écologie et du Développement durable*). Paris, Inra. 332 p.

Sites Internet

- Aléa retrait-gonflement des sols argileux (Argiles) : <http://www.argiles.fr>
- Association française pour l'étude des sols (Afes) : <http://www.inra.fr/afes>
- Base de données des anciens sites industriels et activités de service (Basias) : <http://basias.brgm.fr>
- Base de données nationale sur les cavités souterraines : <http://www.bd cavite.net>
- Base de données nationale sur les mouvements de terrains : <http://www.bdmvt.net>
- Base de données sur les sites et sols pollués (Basol) : <http://basol.environnement.gouv.fr>
- Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM) : <http://www.brgm.fr>
- Groupement d'intérêt scientifique sur les sols (Gis Sol) : <http://www.gissol.fr>
- Portail d'information sur les sites et sols pollués : <http://www.sitespollues.ecologie.gouv.fr>
- Sismicité historique de la France : <http://www.sisfrance.net>
- Site sur la géothermie, Ademe-BRGM : <http://www.geothermie-perspectives.fr>

7 – <http://www.gissol.fr>

8 – <http://www.brgm.fr>

9 – <http://europa.eu.int/comm/environment/soil>