



Les sols :

des fonctionnalités à mieux connaître pour une meilleure utilisation

Rapport technique

Octobre 2012

Sommaire

Sommaire.....	2
Introduction : pourquoi parler des sols ?.....	5
Partie I : Le fonctionnement des sols - mieux CONNAÎTRE.....	7
1 Les grands principes de fonctionnement	7
1.1 Qu'est-ce qu'un sol ?.....	7
a) Les sols, la terre : langages et concepts	7
b) Le sol : définition	9
1.2 Les sols, milieu physique vivant en perpétuelle activité.....	11
a) Les sols sont le résultat d'une lente évolution : La pédogenèse	11
b) Un milieu physique organisé et structuré	13
c) Un véritable système digestif : la matière organique au cœur du système « sol »	15
d) Le siège de nombreuses réactions chimiques.....	15
e) Un milieu beaucoup plus vivant qu'on ne le soupçonne	17
1.3 Les sols, usines de transformation bio-physico-géo-chimique ! Les cycles	19
a) Le cycle du carbone organique.....	19
b) Le cycle de l'azote	19
2 Qualité des sols et dégradations.....	21
2.1 La qualité physique : le rôle clé de la structure du sol.....	23
a) Importance de la porosité du sol pour une bonne structure.....	23
b) Les formes de dégradation physique : érosion et tassement	23
c) Erosion hydrique ou écoulement de boues : le cas des sols viticoles	25
d) Perte de sol par l'artificialisation des sols : l'urbanisation	27
2.2 La qualité chimique : teneur des éléments et acidité.....	29
a) Critères de qualité : teneurs en éléments et niveau d'acidité	29
b) Les causes de dégradation chimique	29
c) Le sol, un rôle important de biodégradation sur les pesticides	31
d) Sites pollués par des éléments-traces : place à la phytoremédiation.....	33
2.3 La qualité biologique : richesse et diversité des espèces	35
2.4 En résumé : un écosystème complexe altérable	37
a) Un écosystème complexe... : des fonctionnements interdépendants.....	37
b) ... Altérable : les dégradations peuvent s'enchaîner	37
c) Le sol, une ressource limitée et non renouvelable	39

Partie II : Les services rendus à la société - mieux UTILISER	41
3 Les fonctionnalités du sol	41
3.1 <i>Fonction de support et fonction culturelle : sols et paysages</i>	43
a) Support de vie, de végétation : l'occupation des sols.....	43
b) Support d'activités humaines : les sols anthropisés.....	45
c) Les sols, archives de la Terre	47
3.2 <i>Les fonctions économiques : les sols, ressource et outil de production</i>	49
a) Productions de biomasse végétale : rôle nutritif des sols et notion de fertilité	49
b) Production d'énergies renouvelables : biomasse énergétique et géothermie	51
c) Les sols, une ressource en tant que matériaux de construction.....	53
d) Les sols, un outil de production qui a un prix.....	55
3.3 <i>Les fonctions environnementales des sols</i>	57
a) Fonction de filtration et d'épuration : rôle clé de la structure et des microorganismes	57
b) Rôle de régulation et rôle tampon : importance de la structure et du volume de terre	59
4 Une interface de l'environnement qui rend des services.....	61
4.1 <i>L'eau et les sols : deux milieux qui se rendent mutuellement service</i>	61
a) Le rôle de l'eau dans le sol : importance de la solution du sol.....	61
b) Le rôle du sol dans le cycle de l'eau : épuration et régulation hydrologique.....	61
4.2 <i>Sols et climat : rôle dans l'atténuation des émissions de GES.....</i>	63
a) Les GES dans les sols : CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O	63
b) Puits ou source de GES : encore un rôle important de la matière organique.....	65
4.3 <i>Sols et santé de l'Homme : entre source de bienfaits et transmission de contamination.....</i>	67
a) Source de bienfaits.....	67
b) Contaminations biologiques.....	69
Conclusion - Vers une gestion durable des sols	70

Introduction : pourquoi parler des sols ?

Le sol constitue le support de la majorité des activités humaines et de la vie biologique terrestre. A l'interface avec les autres compartiments de l'environnement que sont l'eau, l'air et la biosphère, c'est un milieu mal connu, au fonctionnement complexe.

Terre nourricière, le rôle alimentaire des sols est le plus anciennement dévolu, avec celui de production de matériaux. Ils assurent aussi un ensemble de fonctions environnementales dont les services d'épuration vis-à-vis des pollutions et de régulation hydrique. Pour comprendre quels sont les services offerts par les sols à nos sociétés, il est indispensable de comprendre comment fonctionne l'écosystème sol. C'est probablement un des milieux de l'environnement le plus difficile à connaître, et qui nécessite des connaissances.

C'est un milieu vivant, complexe et sensible aux contraintes. Cette ressource peut être altérée, dégradée. Avec le changement climatique et nos consommations d'énergies fossiles, la prise de conscience que de nombreuses ressources ne sont pas

renouvelables est apparue. Le sol en fait partie. A l'échelle française, nous avons pris conscience que l'urbanisation consommait de façon irréversible l'équivalent d'un département tous les 10 ans, et majoritairement sur des terres à bon potentiel agronomique. L'enjeu dépasse nos frontières, il est planétaire : comment nourrir une population mondiale de bientôt 9 à 10 milliards d'individus, de façon équitable, sans altérer notre environnement ... alors même que la répartition des sols fertiles est inéquitable sur la planète ? Selon l'échelle – la parcelle, l'unité paysagère, la région, la planète – les enjeux du sol diffèrent sans être totalement indépendants les uns des autres. Tout comme les actions de préservation diffèrent aussi selon ces échelles.

Pouvoir bénéficier des services rendus par les sols, c'est d'abord mieux comprendre comment ils fonctionnent. Une part importante de ces éléments de compréhension est décrite dans ce rapport. Les éclairages bourguignons permettent de mettre en perspective ces enjeux localement.

La connaissance des sols : le référentiel en usage aujourd'hui

Depuis 1986, un nouveau référentiel des sols a été mis en place. Le terme de « couverture pédologique » est préféré à celui de « sols ». Les types de sols sont désignés par **la nature de leur roche mère** et par **leur position dans le paysage**, les *pédopaysages* (exemple : les fluvisols désignent les sols des vallées formées à partir des alluvions) ou par un caractère dominant de **leur formation** (exemple : les luvisols font référence à l'importance du phénomène d'entraînement d'argile en profondeur, appelé illuviation).

Ce référentiel est un langage commun pour les pédologues européens. Même si les auteurs s'en défendent, c'est aujourd'hui la base de la classification des sols qui est utilisée pour élaborer des cartes pédologiques. Mais ce n'est pas le langage des agriculteurs.

Toutefois, des efforts de vulgarisation sont en cours. Des référentiels régionaux permettent de vulgariser les connaissances acquises, notamment auprès des agriculteurs.

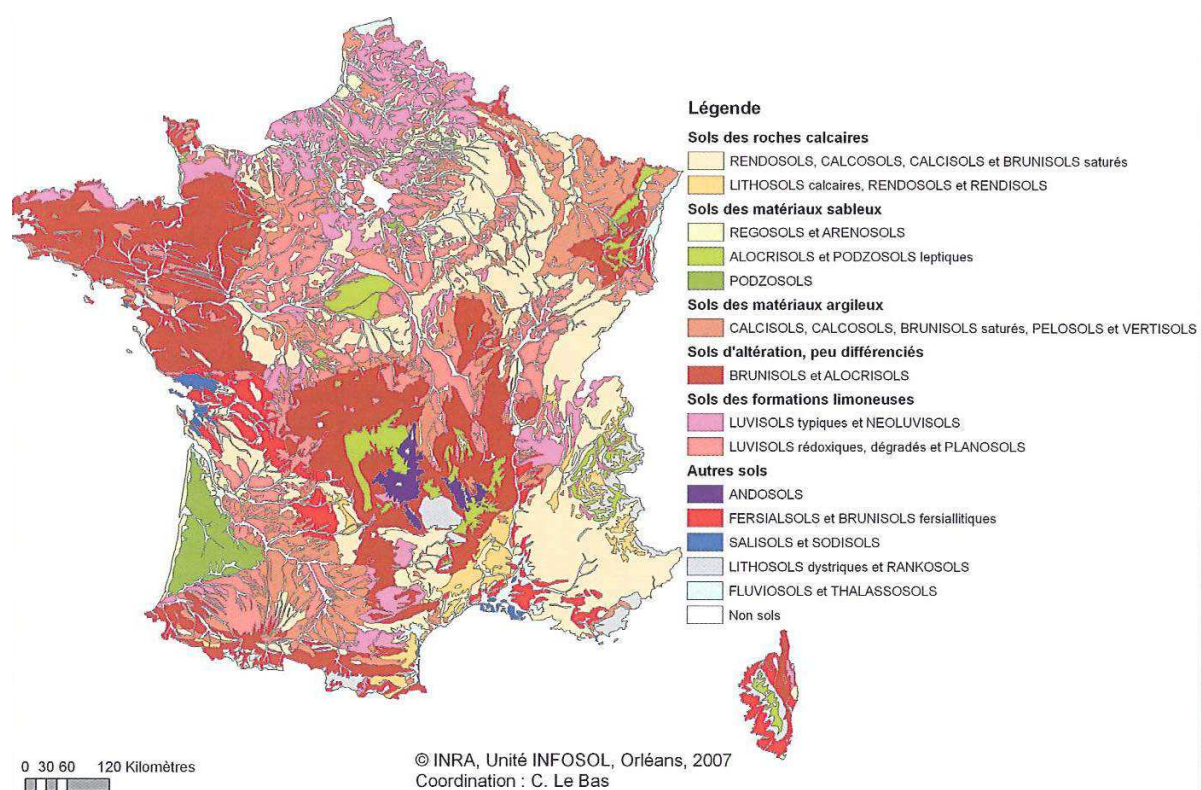


Figure 1 : carte des sols dominants en France
(Source INRA, unité INFOSOL 2007 (dossier INRA « les sols »))

Partie I : Le fonctionnement des sols

mieux CONNAÎTRE

1 Les grands principes de fonctionnement

1.1 Qu'est-ce qu'un sol ?

a) Les sols, la terre : langages et concepts

Le vocable « terre » désigne la planète mais aussi le matériau qui correspond à la partie immergée solide de la planète. Il fait référence aussi à la partie meuble et cultivable d'un espace : une bonne terre, cultiver sa ou ses terres, des terres à blé ou à maïs, le prix des terres... Le mot terre est utilisé lorsque le regard social (voire politique) est porté sur l'espace géographique considéré.

Le terme de « sol » est davantage utilisé pour un langage technique. Les sciences du sol cherchent à caractériser le milieu en vue d'un usage (agricole, génie civil, carrières, gestion des déchets...). Les processus, physiques, chimiques et biologiques en sont les clés de compréhension. Ils sont à la base de nombreuses disciplines qui porteront chacune un regard spécifique :

- **Les pédologues** s'intéressent aux sols comme entité pour en comprendre les principes de fonctionnement et les classer. Les cartes pédologiques sont élaborées en utilisant un référentiel basé la nature du support géologique (*Figure 1*). Outre la détermination de leur origine géologique, les propriétés physico-chimiques et biologiques et leur évolution sont des données importantes utiles aux agronomes et au génie civil.
- **Les agronomes** nomment sol la partie travaillée par les labours et utilisée par les racines des plantes. C'est un synonyme de terre arable. Les qualificatifs utilisés sont fonction du comportement des sols, de ses réactions lors des étapes culturales : sols battants (lorsqu'une croûte se forme en surface après les pluies), sol poreux ou filtrant quand il ne retient que peu les éléments apportés ou l'eau, sol compacté quand l'usage de la mécanisation a tassé et fermé le sol...
- **En aménagement du territoire**, notamment à travers les plans locaux d'urbanisme (PLU), anciennement appelés plans d'occupation du sol (POS), on distingue les grandes catégories d'occupation spatiale du sol (agricoles, boisés, sols bâtis et les autres sols).
- **Le génie civil** s'intéresse aux sols urbains. Supports pour construire les routes et les bâtiments, les sols

se différencient par leurs caractéristiques géo-mécaniques.

- **L'écologue** étudie les sols comme milieu de vie biologique, notamment la macrofaune des sols, parfois la microfaune aussi, mais assez peu les microorganismes. Le sol est une composante déterminante de la biodiversité, des habitats, et conditionne la vie d'espèces aériennes : pelouses calcaires, milieu tourbeux...
- **Le géographe** s'intéressera aux sols pour expliquer la construction de paysage et le développement des activités socio-économiques, et des sociétés humaines.
- **L'agriculteur ou le jardinier** utilise plutôt le mot terre en référence à la terre « nourricière ». L'agriculteur désigne ses sols par types, mais les termes issus de la tradition locale n'ont rien de commun avec les désignations actuellement utilisées par les pédologues (les argilo-calcaires ou rendzines, les terres d'aubues, de grève...)

Le mot « sol » est un terme générique à forte consonance technique. Il appelle des qualificatifs précis pour parler de leur nature et des fonctions attendues. Quel que soit le regard porté, un minimum de connaissances aide à mieux comprendre leur fonctionnement et donc à mieux les utiliser. On peut toutefois remarquer que la désignation des types de sols n'est pas un langage commun. Différences d'attentes sur les fonctions des sols, différences de langage et forte technicité pour en parler... le dialogue n'est pas facilité. Autant de **difficultés pour faire de la préservation ou de la bonne utilisation des sols un enjeu commun.** S'ajoute à cela le droit de propriété sur les sols : la terre s'achète, se vend, en tant qu'espace et en tant que matériau.

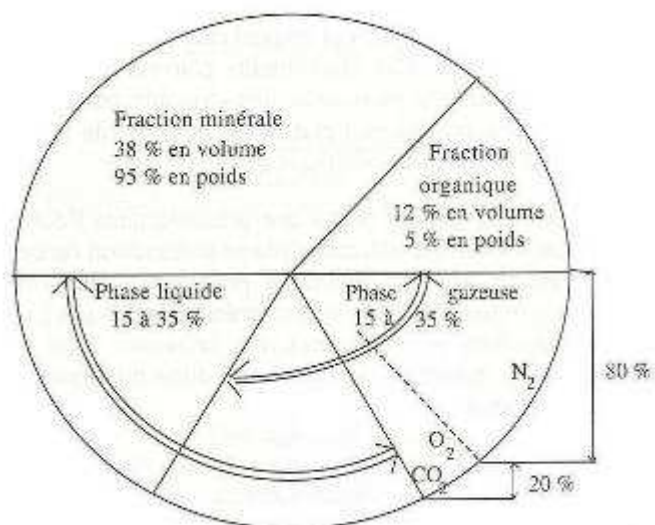


Figure 2 : Composition moyenne du sol : les trois phases, solide, liquide et gazeuse

Le sol est composé de nombreux éléments qui se répartissent selon les trois phases, **solide** (fraction minérale), **liquide** (éléments minéraux ou organiques simples dissous dans l'eau, la solution du sol) et **gazeuse** (azote, gaz carbonique et oxygène).

Terre ou sol ?

Le terme « terre » semble plus évocateur de vie et de durabilité que le terme « sol ». Une enquête de représentation sociale, conduite en 2003, confirme l'hypothèse d'une meilleure sensibilité des non-scientifiques à la problématique de conservation des sols si on propose le vocable « terre » plutôt que « sol ».

[Extrait de « Sous les pavés, la Terre, un film de Thierry Kruger et Pablo Girault]

b) Le sol : définition

Le sol est essentiellement composé **de minéraux**, grossiers ou fins : sables, argiles, limons, éléments grossiers. Il contient aussi des **éléments organiques**, issus de la décomposition de végétaux et animaux morts, la matière organique. On a tendance à oublier que le sol comporte aussi de l'eau et des gaz (*Figure 2*). C'est grâce à l'eau qui circule dans le sol que des éléments simples (azote, carbone, phosphore, potasse...) sont rendus disponibles pour alimenter les plantes. On peut distinguer plusieurs types de ces éléments dissous ou « collés » à la terre :

- les éléments nutritifs majeurs : les composés azotés, phosphorés, potassiques ;
- les éléments minéraux, présents en quantité plus ou moins importante : les composants à

base de soufre, de magnésium, de calcaire, de fer, d'aluminium...

- des éléments minéraux qui sont à l'état de trace naturellement dans le sol : bore, cuivre, zinc, sélénium...

Ces éléments sont plus ou moins mobiles dans le sol, passent des agrégats (cf. p. 12), sur lesquels ils sont retenus par des liaisons chimiques (de type ionique) à la solution du sol (cf. p. 15), puis aux racines qui captent les éléments en solution.

Au-delà de sa composante physique, support de végétation, le sol est un milieu plus vivant qu'il n'y paraît (cf. p.17).

La matrice minérale compose l'essentiel d'un sol en poids mais pas en volume (cf. Figure 2). La matière organique est au cœur du système sol : ce sont ses liaisons avec les minéraux qui donnent au sol une structure poreuse permettant la circulation de l'eau, des gaz, de la vie biologique.

Les sols de Bourgogne : quatre grandes familles

Les sols alluviaux sont des sols jeunes, peu évolués et liés au fonctionnement hydrologique des vallées.

Les sols sur roche calcaire, plateaux de Bourgogne et craies du Sénonais proviennent de la dissolution du calcaire.

Les sols sur schistes, argiles et limons des bas de plateaux, plaies et dépressions sont généralement profonds, humides et peu perméables.

Les sols sur granites (Morvan) se sont développés sur des roches acides et ont tendance à s'acidifier.

sols peu évolués

sols alluviaux

sols calcimagnésiques

rendzines et sols bruns calcaires

rendzines et sols bruns calciques

association de sols calcimagnésiques et brunifiés

rendzines, sols bruns calcaires et sols bruns

sols bruns et sols bruns calciques

sols brunifiés

sols bruns acides et sols bruns modaux

sols bruns acides et sols bruns lessivés

sols bruns et sols bruns lessivés

sols bruns lessivés et sols lessivés hydromorphes

sols lessivés hydromorphes

association de sols brunifiés et podzolisés

sols bruns acides et sols crypto-podzoliques

sols planosoliques et sols podzoliques

sols podzolisés

sols ocre-podzoliques et sols crypto-podzoliques humifères

sources : Atlas régional de l'environnement ; CNERA - 10/02/99

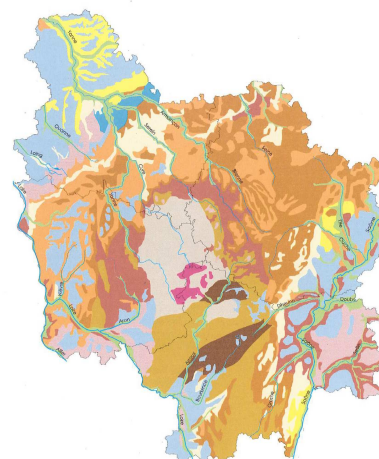


Figure 3 : carte pédologique de la Bourgogne

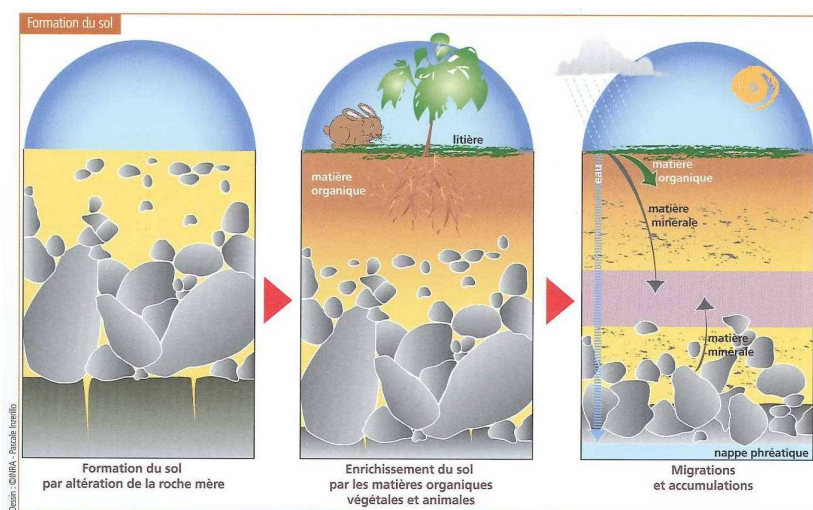


Figure 4 : schéma de la pédogénèse (extrait du dossier INRA « Les sols » 2009)

Les sols sont le résultat de l'altération de la roche mère. Ils s'enrichissent au fil du temps de la matière organique végétale ou animale qui se décompose. C'est un milieu de circulation pour les divers éléments fins, organiques et minéraux, mais aussi pour l'eau.

1.2 Les sols, milieu physique vivant en perpétuelle activité

Le sol est souvent qualifié d'épiderme de la Terre pour rappeler que c'est une fine couche sur un substrat solide. Son fonctionnement est vivant et aussi complexe que celui du corps humain. Sur la base de cette métaphore, on peut considérer schématiquement que les éléments minéraux, sable et limon, équivalent au squelette ; l'eau et la solution du sol, au sang qui véhicule les éléments nutritifs. Le complexe organo-minéral (argile et matière

organique combinés, cf. p. 14) pourrait être comparé à la chair dans son ensemble, tissus de liaison (muscles) ou de réserve (tissus adipeux). Enfin, les microorganismes, qui désagrègent les molécules et réagèrent les éléments simples en éléments complexes, assurent des fonctions proches de celles d'un système respiratoire ou digestif.

a) Les sols sont le résultat d'une lente évolution : La pédogenèse

Les différences de sols et de leurs propriétés observées de par le monde et par région, s'expliquent en grande partie par leur histoire. La première histoire est celle de la géologie, les roches sur lesquelles reposent les sols (*Figure 1 pour la France et Figure 3 pour la Bourgogne*).

Apparemment immuables, **les sols sont en fait le résultat d'une lente évolution**, ou plus exactement de l'altération des roches (*Figure 4*). Cette altération physique et chimique de la roche-mère s'est faite à l'échelle géologique et se poursuit toujours. L'ensemble des processus qui concourent à la formation des sols à partir de roches et de leur évolution au cours du temps est appelé pédogenèse.

Le climat et la circulation de l'eau interviennent dans ces processus d'altération continue : éclatement des roches par le gel, pluies dissolvant les calcaires, érosion éolienne ou hydrologique transportant les éléments fins, dissolution chimique de minéraux de la roche (oxydes de fer ou autres)...

Les processus de la pédogenèse sont aussi étroitement dépendants de **l'action des organismes vivants** et de leur combinaison avec l'environnement minéral : action des racines dans la chimie du sol, dépôt puis décomposition de matière organique, combinaison des éléments organiques avec les éléments minéraux (complexe organo-minéral).

Les sols sont le résultat d'une longue et lente évolution... qui se poursuit toujours. Les mots clés de l'histoire des sols sont paradoxalement « altération » et « activité », phénomènes qui se déroulent au pas de temps géologique !

Définitions

Roche mère : matériau originel ou encore matériau parental. C'est elle qui a donné naissance au sol. Elle peut avoir totalement disparu car entièrement transformée en sol.

Altérite : matériau intermédiaire issu de l'altération de la roche mère et qui évoluera pour constituer le sol.

Substrat ou roche sous-jacente : c'est la roche située sous l'horizon pédologique (le sol), et dont on ne peut dire avec certitude qu'il est à l'origine du sol. On dit qu'un sol repose **sur** un substrat et **est issu** d'une roche mère.

Alluvions : ce sont des formations sédimentaires issues du dépôt de matériaux par des cours d'eau. Il se fait sur une longue distance. L'alluvionnement peut également se traduire par le dépôt de limons de recouvrement à l'occasion du débordement du lit des rivières lors de crues exceptionnelles.

Colluvions : dépôts de bas de pente, relativement fins, ils sont formés d'éléments arrachés aux versants. A la différence des alluvions, leur transport a été faible et leurs matériaux sont beaucoup plus anguleux. Ils sont très proches en composition des matériaux qui leur ont donné naissance et occupent souvent des positions caractéristiques dans le paysage : milieux ou bas de pentes.

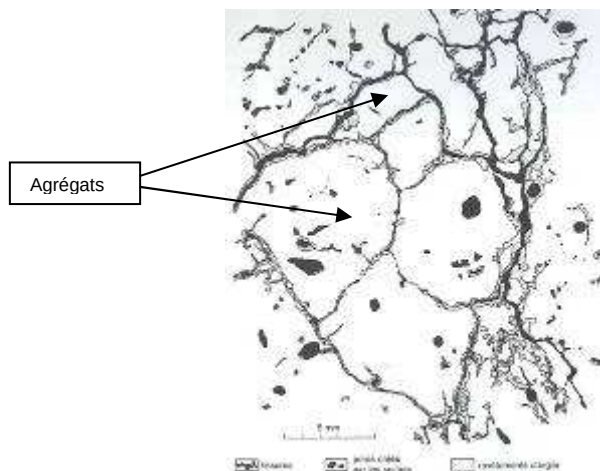


Figure 5 : schéma de la structure du sol : agrégats et porosité

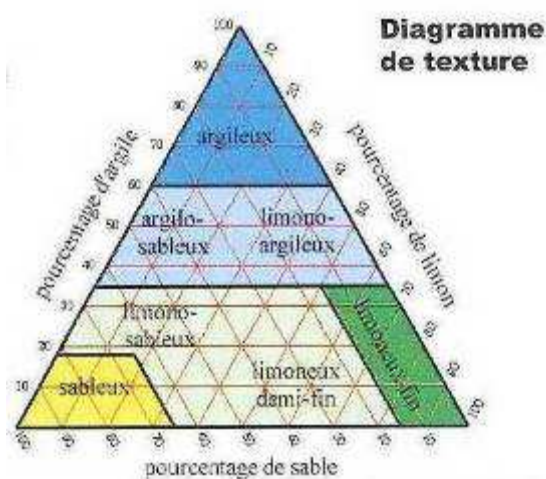


Figure 6 : triangle de texture (sable, argile, limon)

Triangle de texture : utilisation en agronomie

La texture est la composition granulométrique d'un sol. Elle est identifiable au toucher. Pour qualifier un sol en fonction de sa texture, les pédologues utilisent une grille en forme de triangle.

Les limites d'Atterberg : utilisation en génie civil

Le génie civil s'intéresse à la consistance du sol selon ses propriétés géomécaniques. Elles sont déterminées par les limites d'Atterberg, du nom de l'agronome suédois qui en a établi le principe. Elles sont de trois ordres :

Les limites de liquidité : la limite entre l'état liquide et l'état plastique. La résistance au cisaillement d'un sol trop chargé d'eau est nulle et il se répand lorsqu'on le déverse.

Les limites de plasticité : la limite entre l'état liquide et l'état solide. Le sol est stable naturellement mais, dès qu'un effort lui est appliqué, il est le siège de déformations importantes, en grande partie non réversibles sans variation notable de volume et sans apparition de fissures.

Et **les limites de retrait** : la limite entre l'état solide avec retrait et l'état solide sans retrait. Le sol a le comportement d'un solide, l'application d'un effort n'entraîne que de faibles déformations.

Pour la fraction fine (graviers exclus), la cohésion tient à la présence d'eau : parfaitement sec, le matériau serait pulvérulent. Au-dessus d'une certaine teneur (limite de plasticité), on peut le pétrir en forme de boudin, de boulette ou de fil. Pour une teneur plus forte (limite de liquidité), il forme un liquide visqueux, qui ne conserve pas la forme qu'on lui a donnée.

b) Un milieu physique organisé et structuré

Le résultat de l'histoire du sol, c'est-à-dire le résultat de l'altération de la roche mère, et de son activité biologique, est visible sur une coupe de sol verticale. On peut distinguer plusieurs couches, ou **horizons**, de couleur et de texture variable.

La couleur, généralement plus foncée dans l'horizon superficiel, est fonction de la richesse en matière organique. D'autres éléments, comme les oxydes de fer, impriment également leur couleur : ferriques, ils sont responsables de la coloration rougeâtre, ferreux, ils rendent les argiles verdâtres (le Gley), couleur souvent synonyme d'asphyxie. Cette coloration est un bon indicateur de perméabilité ou d'imperméabilité du sol à l'eau.

Les critères de texture diffèrent selon qu'il s'agit d'agronomie ou de génie civil. L'agronomie s'intéresse à la proportion de trois éléments fondamentaux, les argiles, les limons et les sables, dans la terre fine du sol (*Figure 6*). C'est la taille de ces éléments minéraux qui est prise en compte pour les distinguer :

- sables : $> 63 \mu\text{m}$
- limons : de $63 \mu\text{m}$ à $2 \mu\text{m}$
- argiles : $< 2 \mu\text{m}$

En génie civil, l'argilosité est résumée par un indice de plasticité.

Les éléments grossiers, cailloux, graviers dont le diamètre est supérieur à 2 mm, n'interviennent pas dans la détermination de la texture en agronomie. On parle plus généralement de charge en cailloux ou en éléments grossiers d'un sol, ou encore de sol caillouteux par exemple. Pour le génie civil, le seuil de granulométrie retenu est de 50 mm.

Les agrégats sont des éléments de taille et de forme variables. Ils résultent de l'association de différentes particules, minérales et organiques. L'irrégularité de leur forme laisse des interstices irréguliers qui sont déterminants pour l'activité biologique. Ces interstices que circulent l'air, l'eau les racines et autres éléments vivants. (*Figure 5*)



Plus globalement, la **structure du sol** est le résultat de l'assemblage de ces éléments. La présence de « vides », la porosité du sol, est nécessaire pour laisser passer l'eau et l'air (en fait la solution du sol et les gaz, cf. p.14) et contribue à la bonne structure du sol pour :

- favoriser la circulation de l'eau dans le sol et à travers celui-ci ;
- contribuer à un degré suffisant d'aération ;
- que les racines aient la capacité à se propager dans le profil de sol ;
- et que le sol résiste à l'érosion.

En général **la porosité du sol**, air et liquide représente 30 à 60 % du volume total du sol. Les proportions optimales pour un sol à usage agricole, sont : 25 % d'eau, 25 % d'air, 45 % de matière minérale et 5% de matière organique. En technique de construction (BTP) et en génie civil, les paramètres à prendre en compte sont relatifs au comportement mécanique : la plasticité qui traduit le comportement d'un sol face à un état hydrique plus ou moins fort, et la friabilité des sables dans le cas de sols sableux, ainsi que l'indice de vides.

La notion de structure du sol est une notion importante pour de nombreux utilisateurs. Elle va de pair avec la porosité. Sa qualité résulte d'un bon équilibre entre eau, air et éléments solides. Elle détermine le bon fonctionnement des sols, et donc la qualité des services

que ceux-ci peuvent rendre : elle conditionne le développement des micro-organismes et celui des plantes (développement racinaire et mise à disposition des éléments nutritifs...). Elle est responsable de la stabilité des infrastructures et des bâtis.

Décomposition de la matière organique fraîche :

La chaîne de transformation est complexe et donne de nombreux composés intermédiaires avant l'état final, l'humus. (source du schéma : M.Robert, « le sol : interface dans l'environnement, ressource pour le développement »)

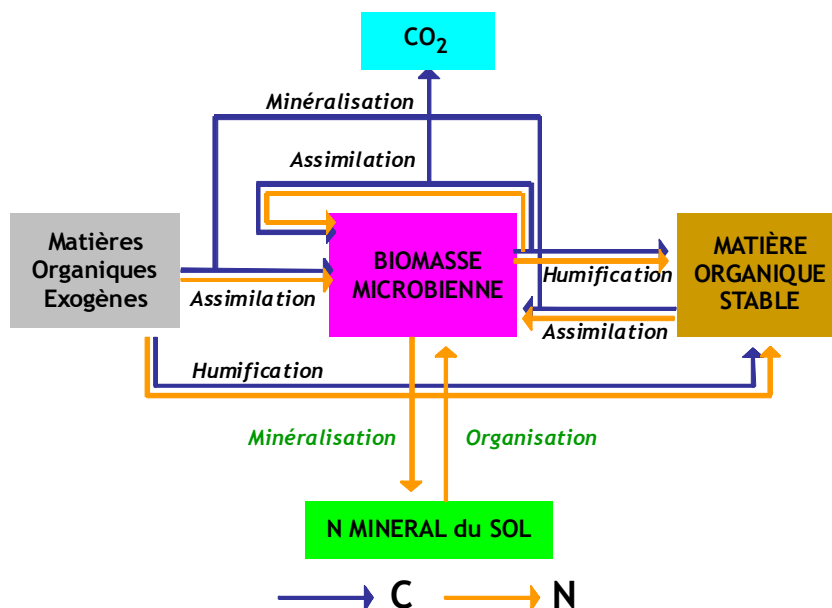


Figure 7 : schéma d'évolution de la matière organique, rôles des micro-organismes
Source AgroSup Dijon, B. Nicolardot

Richesse des sols en matière organique

En France, les zones les plus riches en matière organique sont les zones d'élevage ou de forêt. En Bourgogne, ce sont les zones de grandes cultures qui présentent des teneurs faibles. (Source : Gissol)

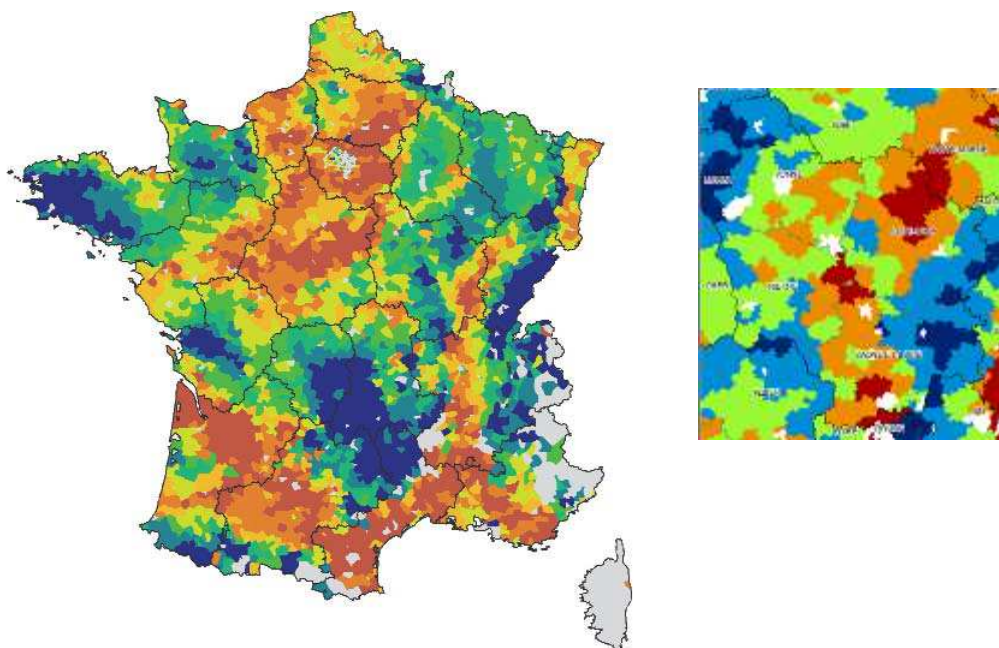
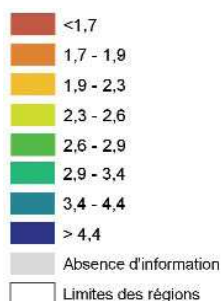


Figure 8 : teneurs en matières organiques des sols en %
(extrait de la base BDAT : 2000-2004) <http://bdat.gissol.fr/geosol/main.php>

c) Un véritable système digestif : la matière organique au cœur du « système sol »

A la mort des végétaux et autres organismes vivants, leurs résidus s'accumulent dans les sols et subissent des transformations physiques, chimiques et surtout biologiques. L'ensemble des produits issus des différentes phases de cette biodégradation constituent la **matière organique** (Figure 7). Composée de matériaux hétérogènes en cours de dégradation (débris végétaux grossiers à très décomposés), c'est une matière en perpétuelle évolution. Le taux de matière organique des sols ne représente en général que quelques pourcentages, de 0,5 à 10 % (Figure 8).

Le stade final de cette décomposition est une forme **stable** qui n'est plus identifiable à l'œil, l'**humus**, renommé aujourd'hui « **matière organique stable** ». Il se combine à l'argile pour donner le **complexe organo-minéral** (encore appelé complexe absorbant ou complexe argilo-humique), fraction qui joue un rôle essentiel dans les échanges du sol.

Composante importante de la fertilité, la matière organique joue un rôle primordial dans les fonctions écologiques, (ou fonctions éco systémiques) des sols. Un sol humifère est un sol riche en matière organique est un sol qui a accumulé des débris végétaux depuis plusieurs années et qui favorise leur décomposition. Ce que rend possible un couvert végétal pérenne (prairies permanentes, forêt). Ce sont aussi des sols qui bénéficient d'apports de matière organique plus ou moins décomposée comme le fumier ou le compost, comme le montre la carte de France (cf. Figure 8). La bonne décomposition de la matière organique dépend de la structure du sol et de son activité biologique.

Définitions

Humus = matière organique stable
Complexe argilo-humique = complexe absorbant = complexe organo-minéral

d) Le siège de nombreuses réactions chimiques

Les réactions chimiques dans les sols sont de types variés : adsorption / désorption ; précipitation / dissolution ; oxydoréduction ; acido-basique ; complexation... Elles concernent tout type d'éléments : éléments minéraux, organiques, molécules simples qui seront disponibles pour les racines (sous forme d'ions) ou molécules plus complexes (de type lignine par exemple).

Ces réactions ont pour scène les trois phases d'un sol (Figure 2, page 8) :

- **La phase solide** est composée des éléments fins de la texture et des agrégats argilo-humiques. Le complexe argilo-humique se révèle être très réactif chimiquement. C'est le « garde-manger des végétaux ». Il fixe les éléments nutritifs puis les libère dans la solution du sol lorsque celle-ci s'appauvrit suite à l'absorption des éléments par les racines. Les argiles, chargées négativement, sont le siège d'adsorption / désorption de molécules complexes.
- **La phase liquide** appelée généralement solution du sol, contient l'eau et les éléments minéraux nutritifs qui seront absorbés par les

racines. Elle contient aussi les molécules complexes (composés minéraux ou organiques issus de la décomposition de la matière organique, pesticides, fertilisants chimiques...).

- **La phase gazeuse** est composée d'azote, de gaz carbonique, et parfois aussi de méthane. Ces gaz interviennent dans les réactions chimiques.

La vitesse des réactions chimiques est très variable : de quelques jours à plusieurs années selon la nature de la réaction, la composition du sol, sa porosité, sa richesse en matière organique etc.

Le sol n'est pas un milieu inerte. Il est le lieu d'échanges et de transformations chimiques variées responsables des fonctions assurées par les sols. La matière organique joue un rôle fondamental et la structure du sol constitue le laboratoire de ces réactions chimiques. Or, les activités de l'Homme interviennent aussi bien sur la structure des sols que sur leur teneur en matière organique.

Le rôle des « ingénieurs chimistes » : Le rôle des vers de terre dans le sol est bien connu. Mais on n'imagine pas qu'ils peuvent mélanger complètement un sol sur 1 mètre d'épaisseur en 10 ans ! Moins connu est celui des micro-organismes. Ils contribuent à transformer plus ou moins rapidement la matière organique sous forme de débris végétaux grossier en matière organique stable, assimilable par les plantes !

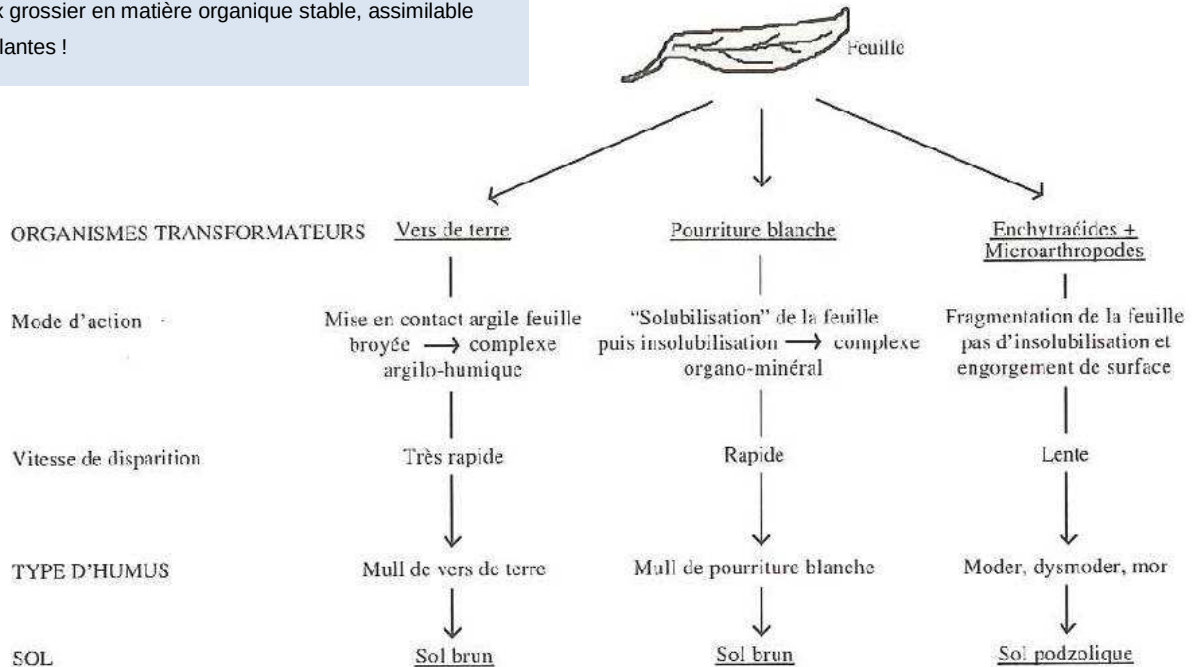


Figure 9 : Rôle des micro-organismes et de la faune dans l'évolution de la matière organique en humus

	Nombre par gr de sol	Biomasse par kg ha
Bactéries	10^6 à 10^{10}	300 à 3 000
Actinomycètes	10^5 à 10^7	50 à 500
Champignons	10^4 à 10^6	500 à 5 000
Protozoaires	10^4 à 10^5	7 à 200
Algues	10^3 à 10^5	50 à 200
faune	10^3 à 10^4	500 à 2 000 (vers de terre)

Les mycorhizes du sol

Les champignons mycorhiziens sont présents sur de nombreuses cultures, à l'exception des crucifères (colza, radis, navets, choux....) et des chénopodiacées (betteraves, épinards...).

Le potentiel mycorhizogène du sol constitue un facteur d'une agriculture écologiquement et économiquement durable : fixation N et P, alimentation en eau, protection contre des agents infectieux, etc. Des méthodes culturales en diminuent le potentiel : l'apport d'engrais augmente le P disponible, qui inhibe le développement des mycorhizes ; l'utilisation des fongicides a un impact sur les champignons mycorhiziens. Certaines pratiques, comme le drainage, peuvent en revanche avoir un effet bénéfique.

e) Un milieu beaucoup plus vivant qu'on ne le soupçonne

Les sols abritent le quart des espèces vivant sur terre. Mais on estime qu'1 % seulement des espèces de microorganismes du sol est connu. Comme en surface, on distingue faune et flore. La majorité de la biodiversité n'est pas visible à l'œil nu. Parmi les microorganismes, microflore ou microfaune, certaines espèces sont infectieuses pour les cultures. Quelques estimations éclairent cette richesse :

- Une cuillère à café de sol de jardin peut contenir des milliers d'espèces, des millions d'individus et une centaine de mètre de mycélium (champignon).
- La microflore peut représenter une à quelques tonnes de matière sèche par hectare de terre.
- Un hectare de sol, sous nos latitudes, contient l'équivalent du poids d'une vache en biomasse bactérienne, de deux moutons en protozoaires.
- A eux seuls, les vers de terre prédominent par leur biomasse d'une tonne par hectare.

La faune est classée en fonction de la taille des espèces :

- La microfaune regroupe les espèces du règne animal de taille inférieure à 0,1 mm. Les nématodes, parasites des cultures, en font partie.
- La mésofaune, dont la taille est comprise entre 0,1 et 2 mm, comporte entre autres les collemboles et les acariens.
- Enfin la macrofaune, taille supérieure à 2 mm, est l'appellation commune pour les insectes, les vers de terre, mollusques et autres.

*Les sols ont une richesse biologique beaucoup plus importante qu'il n'y paraît. C'est ce qui les distingue des roches. **Cette biodiversité rend de nombreux services :** Les microorganismes, encore très peu recensés, sont essentiels pour décomposer la matière organique et en faire des nutriments indispensables aux cultures ; les vers*

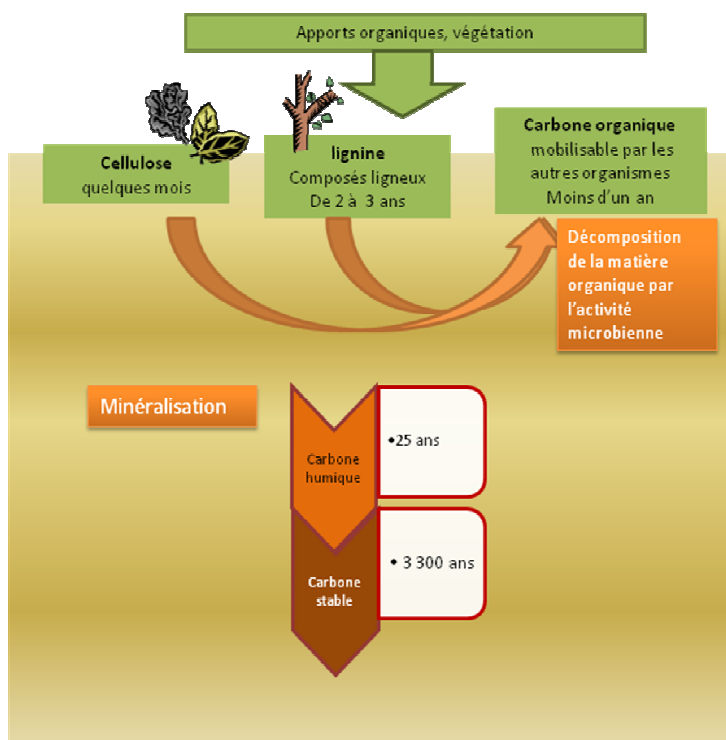
- La mégafaune est parfois le terme pour désigner les animaux plus gros comme les taupes ou les campagnols.

Une autre classification est utilisée, celle-ci pour évoquer directement les fonctions de cette biodiversité :

- **Les ingénieurs chimistes** (Figure 9) : ce sont principalement les microorganismes (bactéries, champignons, protozoaires) qui transforment la matière organique des débris végétaux en éléments nutritifs assimilables par les plantes. Ils interviennent aussi dans la dégradation de molécules complexes comme les polluants (hydrocarbures, pesticides...).
- **Les régulateurs biologiques** : Assimilés à des prédateurs ou même à des parasites (collemboles, nématodes, acariens) ils agissent sur la dynamique des populations de microorganismes, dont notamment les pathogènes des cultures.
- **Les ingénieurs physiques des écosystèmes** : En se déplaçant et créant leurs habitats, les vers de terre, termites, fourmis et les petits mammifères vivants dans le sol renouvellent la structure du sol et agissent sur sa porosité. En ce sens, ils favorisent la régulation de l'eau et la mise à disposition des ressources aux autres organismes du sol.

de terre et autre macrofaune du sol contribuent à aérer le sol et à rendre possible la circulation de l'eau et des éléments dans le sol ; quant aux parasites et aux prédateurs de microorganismes, leur intervention régule l'équilibre des populations et contribue à la diversité biologique.

Figure 10 : Modèle de la dynamique du carbone organique dans le sol (d'après Balesdent et al., 2000)



Le carbone dans le sol :

L'essentiel du carbone apporté par les organismes vivants est facilement mobilisable par d'autres organismes. Seulement 1 % de ce qui entre dans le sol s'accumule dans la fraction stable de la matière organique (l'humus). La durée de stockage du carbone dans le sol, est très variable, d'une à plusieurs années selon la composition biochimique du végétal (la lignine se dégrade moins vite que la cellulose, elle est plus stable) et à des dizaines ou même des milliers d'années pour la fraction stable.

Plusieurs facteurs influent le cycle du carbone : les apports de résidus végétaux et les techniques agronomiques sont responsables des volumes de carbone organique disponibles, la texture du sol et le climat déterminent la qualité de l'activité biologique à son tour responsable de la décomposition de cette matière organique. Les facteurs pédologiques, teneur en argile en microagrégats, influent sur la forme stable du carbone, l'humus.

Cycle de l'azote, importance des apports par l'Homme :

L'azote est un composant important pour la croissance des plantes. Si une grande partie des apports fertilisants (organiques et minéraux) sont absorbés par les végétaux, une autre évolue dans le sol sous l'action de bactéries spécialisées. Elles interviennent dans un nombre important d'étapes dans la chaîne de transformation de l'azote. Une partie des nitrates non assimilés se retrouvent dans les nappes d'eau souterraines, une autre partie se volatilise sous forme de protoxyde d'azote (N_2O), d'ammoniac (NH_3) ou d'azote (N_2).

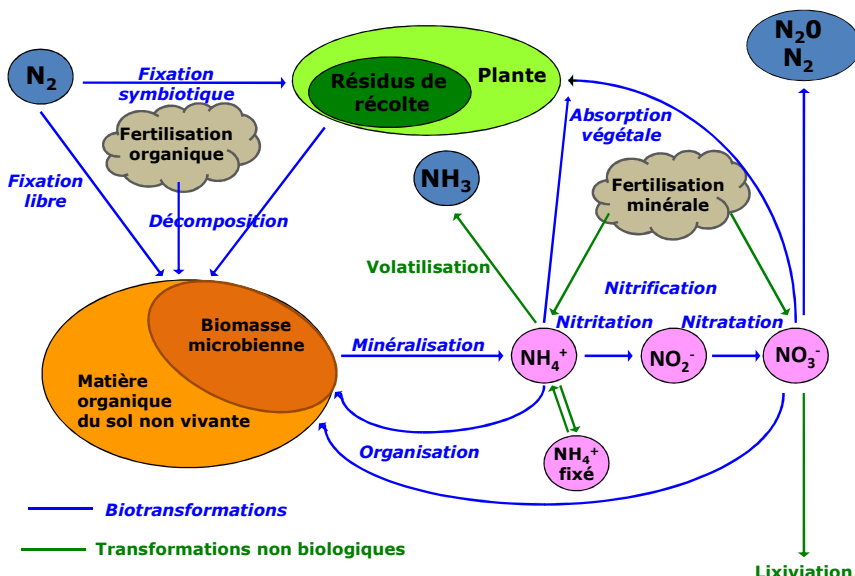


Figure 11 : Cycle de l'azote dans le sol (source : B. Nicolardot, AgroSup Dijon)

1.3 Les sols, usines de transformation bio-physico-géo-chimique !

Tous les cycles biologiques terrestres passent par le sol. **L'activité biologique** autour de la matière organique est à la base de nombreux cycles biologiques et chimiques (biogéochimiques). Ils contribuent à rendre disponibles des nutriments

sous une forme moléculaire simple et assimilable. Les plus connus et étudiés sont ceux du carbone et de l'azote, qui interviennent aussi de façon importante dans la régulation des gaz à effet de serre.

a) Le cycle du carbone organique

Le cycle du carbone est conditionné essentiellement par l'évolution de la matière organique. Dans les sols, le carbone est sous ses deux formes (*Figure 10*) : **organique** (issue des apports de débris végétaux) et **minérale** (résultat de la minéralisation de la matière organique). A noter qu'à l'issue de ces transformations dans le cycle, une partie du carbone repart dans l'atmosphère sous forme de gaz carbonique (*Figure 12 ci-contre*).

Ce cycle, à la base de la nutrition des plantes, intervient dans le stockage ou la libération du CO₂, un des principaux gaz à effet de serre (cf. p. 38).

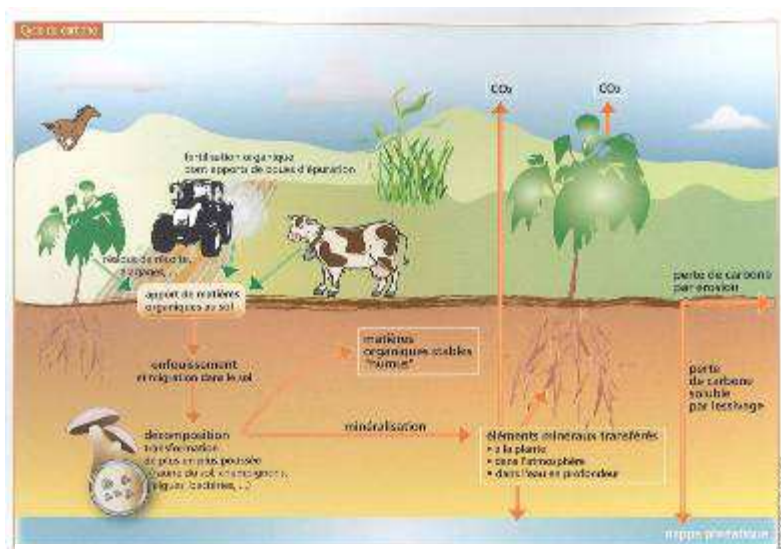


Figure 12: Cycle du carbone (source : INRA dossier "Le sol")

b) Le cycle de l'azote

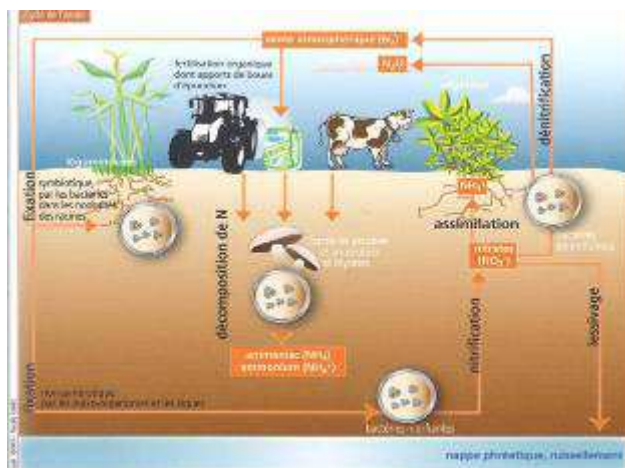


Figure 13 : Cycle de l'azote (source INRA dossier "le sol")

Le cycle de l'azote est animé par des bactéries qui transforment l'azote de l'air et les formes organiques en différentes formes d'azote disponible (*Figure 13 ci-contre*). Ces bactéries fonctionnent dans différents milieux : dans les nodosités des racines (les rhizobactéries), en milieu aéré (conditions aérobiques) ou au contraire en l'absence d'air (milieu anaérobie).

Les différents composés azotés sont fondamentaux pour la nutrition des plantes et la fabrication de leurs protéines (*Figure 11*). Mais l'équilibre de ce cycle a aussi des répercussions sur l'environnement : lorsque les nitrates « fabriqués » ne sont pas consommés par les plantes, ils sont lessivés et altèrent la qualité de l'eau, ou encore, ils sont transformés en protoxyde d'azote (N₂O) qui est un puissant gaz à effet de serre.

Les cycles du carbone et de l'azote sont les deux principaux cycles dans le sol. Ils conditionnent la bonne nutrition des plantes. Mais leur fonctionnement peut aussi agir sur la qualité de l'environnement. Ces deux cycles interviennent dans la régulation des GES.

Ils font **appel à l'activité des microorganismes**. Le cycle du carbone est essentiellement basé sur le travail microbien de décomposition de la matière organique, et le cycle de l'azote sur la spécificité des bactéries à chaque étape des réactions chimiques.

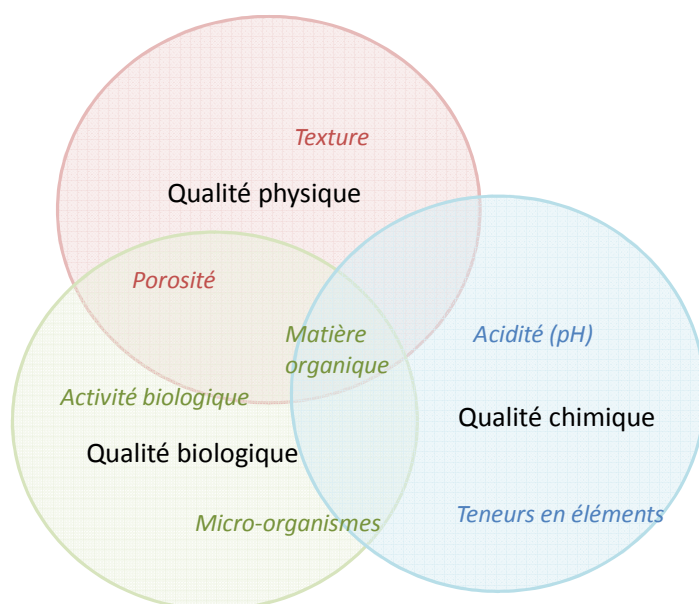


Figure 14 . Schéma des critères de qualité des sols

Importance de la porosité du sol

Les « vides » du sol, ou pores, jouent un rôle important : la microporosité intervient dans le rôle de stockage d'eau du sol, elle est le lieu de résidence des bactéries nécessaires à la décomposition de la matière organique ou des polluants. La macroporosité est plutôt l'équivalent d'avenues dans lesquelles circulent les racines et les organismes vivants tels que vers de terres et insectes.

	taille vides	visibilité	dynamique de l'eau	accessibilité
MACROPOROSITÉ	2 mm	oeil nu	circulation rapide de l'eau	vers de terre mésosofaune racines
	0,2 mm (200 µm)	macro-photographie		coiffes racinaires poils racinaires
	6 à 10 µm	microscope	rétenion d'eau disponible pour végétaux	hyphes mycéliens bactéries
MICRO	0,2 µm		rétenion d'eau non disponible	

Figure 15 : Importance des caractéristiques physiques du sol

2 Qualité des sols et dégradations

La qualité d'un sol se définit par la réponse à la question : « Le sol est-il en mesure de faire ce qu'on attend qu'il fasse ? ». Cela suppose donc que son fonctionnement, tant physique, chimique que biologique, soit optimisé.

Qualités biologique, physique et chimique se définissent par quelques critères clés (*Figure 14*). Elles sont interdépendantes et conditionnent le bon fonctionnement des sols (exemple de l'importance de la porosité du sol, créées entre autres par l'activité des microorganismes, *Figure 15*). Et vis-versa, le bon fonctionnement d'un sol favorise le maintien de services et fonctionnalités utiles à l'Homme. C'est l'héritage de la pédogenèse, de facteurs abiotiques (climat, topographie) et de l'historique de l'occupation des sols. Chaque sol a ses qualités propres, intrinsèques. Mais selon les pressions exercées sur les sols, les usages qui en sont faits, cette qualité peut se maintenir, se développer (notamment en favorisant l'activité microbienne) ou, à l'inverse, s'altérer ou se dégrader. Les sols peuvent même disparaître.

Ces pressions sont **d'origine naturelle** (séismes, événements climatiques extrêmes, action chimique des racines...), mais aussi bien souvent **d'origine anthropique** (monocultures, apports excessifs d'engrais chimiques ou de polluants, imperméabilisation...). Actuellement, on prend conscience que le sol est une ressource non

renouvelable qui nécessite d'être préservée. « **La dégradation des sols** est définie comme un processus qui baisse la capacité actuelle ou potentielle des sols à produire des biens et services. Six processus spécifiques sont reconnus comme contributeurs principaux à la dégradation des sols : l'érosion hydrique, l'érosion éolienne, l'engorgement par l'eau et la surcharge en sels, les dégradations physiques, chimiques et biologiques. » (Ian Hannam et Ben Boer, rapport remis à l'UIN en 2002). La dégradation des sols, qu'elle soit physique, chimique ou biologique, est le pendant de la qualité des sols, son « négatif ».

N'oublions pas que les sols sont déjà le résultat de la **dégradation naturelle** des roches, la pédogenèse (cf. p. 11), une lente évolution qui se poursuit toujours. Cette altération naturelle est le fait essentiellement du climat et de la circulation de l'eau, sans oublier les phénomènes sismiques et éruptifs dans certaines parties du globe. Les zones particulièrement sensibles à ces dégradations sont connues, on parle d'ailleurs de risques naturels lorsque leurs effets portent atteinte aux sociétés humaines.

Les sociétés humaines subissent ces phénomènes et cherchent à s'en protéger. Mais certaines de leurs activités contribuent à amplifier les impacts des agents d'érosion et contribuent à la dégradation de l'environnement, dont celle des sols.

Sensibilité des sols à la formation d'une croûte de battance



Figure 16 : sensibilité des sols à la formation d'une croûte de battance

Source : Gis sol – INRA Orléans. Données construites à partir du modèle MESALES (modèle d'évaluation spatiale de l'aléa Erosion des sols), qui croise usage des sols, reliefs et type de sols

*

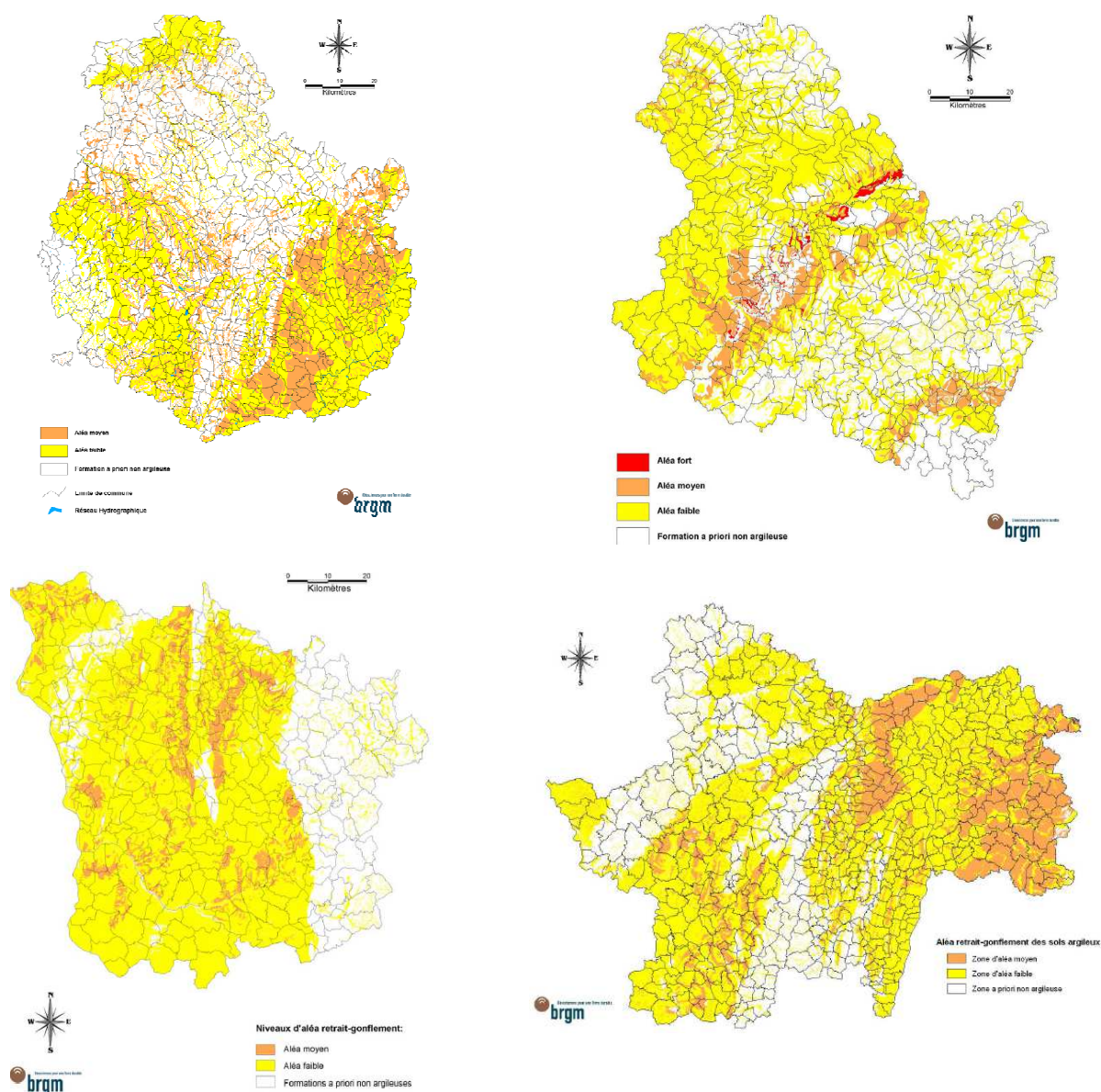


Figure 17 : Carte de l'aléa retrait-gonflement d'argile

2.1 La qualité physique : le rôle clé de la structure du sol

a) Importance de la porosité du sol pour une bonne structure

La qualité physique d'un sol se réfère à sa structure et plus précisément à sa porosité et microporosité. On considère que les proportions optimales pour un bon fonctionnement du sol sont un quart de fraction liquide, un quart gazeuse et le reste en fraction solide (éléments minéraux et matière organique) (cf. p. 13 et *Figure 2*).

Un autre critère de qualité est celui de la teneur en argile des sols pour le bâti. Des fissurations sur le bâti peuvent apparaître à la suite du phénomène de retrait-gonflement des argiles. La carte de la sensibilité des sols est disponible pour chaque département français (*Figure 17*).

L'action du climat est effective surtout sur les sols argileux. Les pluies sont responsables du phénomène de gonflement/retrait d'argile. L'alternance gel/dégel fragmente les mottes et aide le sol à « mûrir » pour les semis de printemps par exemple. Le vent est à l'origine de l'érosion éolienne, entraînant les particules fines qui ne sont pas agrégées par de la matière organique (sable, limons fins de sols nus).

La faune agit mécaniquement sur le sol. Les galeries creusées par la macrofaune accroissent sa porosité et participent au transport de terre. Les microorganismes, eux, se déplacent dans les espaces existants, ce qui contribue à stabiliser la porosité et la structure en place (*Figure 15*).

b) Les formes de dégradation physique : érosion et tassement

La dégradation physique est une altération continue provoquée par différents phénomènes :

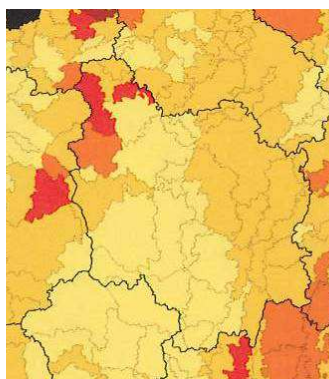
- **L'érosion, hydrique** ou éolienne, provoque un enlèvement des éléments fins du sol et un déplacement d'amont vers l'aval de terres et de sédiments (cf. p. 25).
- En surface, **le tassement** conduit à la **compaction** en profondeur. Ce phénomène est principalement dû à l'utilisation d'engins puissants lors de travaux publics. L'effet est d'autant plus préjudiciable que le sol est humide. La structure du sol est détériorée. La porosité est écrasée, l'eau et les microorganismes circulent plus difficilement, ce qui réduit l'activité du sol. Il est « asphyxié ».
- **En surface, la battance** : c'est un phénomène de surface qui concerne une partie plus ou moins importante des sols d'une région (*Figure 16*). Sous l'action des pluies, certains sols forment une croûte sur leurs premiers millimètres. Les éléments fins, délités des agrégats, comblent les pores du sol. L'eau ne s'infiltre que très lentement et a tendance à

s'accumuler ou ruisseler, entraînant les éléments fins.

Ces altérations ne sont pas forcément irréversibles. Travail du sol, climat, faune, participent au maintien ou à la restauration de la structure des sols. Un des objectifs du **travail du sol** est d'augmenter la porosité du sol, de l'aérer en éclatant les mottes. Cette action est essentiellement mécanique avec le labour, qui réalise dans le même temps l'enfouissement de matériaux végétaux (paille, repousses d'herbe, fumier, etc). D'autres méthodes comme la technique sans labour ou le semis direct, visent à ne pas bouleverser la structure en place pour que s'accomplisse le travail de la faune. Le travail mécanique se résume à un travail superficiel qui met les résidus de récolte graduellement en contact avec le sol et ses microorganismes. Les diverses méthodes ont leurs avantages et inconvénients. Le choix se raisonne en fonction des autres pratiques agricoles (usages de pesticides, rotation des cultures, date de semis...).

Qualité physique et structure du sol sont des termes équivalents. Lorsqu'elle est altérée, travail du sol, climat et faune peuvent jouer un rôle réparateur et rétablir une bonne porosité. Une bonne qualité physique facilite la

circulation de l'eau et des microorganismes. Elle conditionne le rôle de régulation des sols. En Bourgogne, le risque de retrait-gonflement d'argile pour le bâti est la 2^e cause de risque naturel après les inondations.



Importance de l'aléa :
aléa fort (rouge vif), moyen (orange),
faible (ocre) et très faible (jaune).

*Figure 18 : Risque d'érosion hydrique
des sols en Bourgogne (automne)*

En Bourgogne, le **risque d'érosion hydrique** des sols est globalement assez faible, à l'exception des sols limoneux battants du Nord-Ouest de la région (risque automne et printemps), et les côtes viticoles (risque printemps-été)

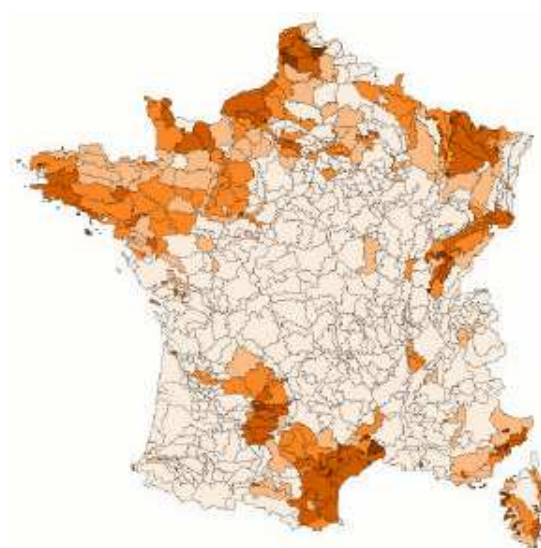
Eté

Automne



Hiver

Printemps



Densité de coulées pour 100 km²

de 0 à 0,4
de 0,4 à 1
de 1 à 2,5
de 2,5 à 10
supérieure à 10

Figure 19 : cartes saisonnières des coulées de boue en France par petites régions agricoles.

Source : base des coulées boueuses.

c) Erosion hydrique ou écoulement de boues : le cas des sols viticoles

En France, 1/5 du territoire est concerné par l'érosion due au ruissellement des pluies (Figure 19). Les conséquences de l'érosion hydrique sont avant tout locales : perte d'éléments fins du sol, de fertilité, formation de rigoles et de ravines, écoulement de boues sur les routes, dégâts sur les infrastructures et le bâti, entraînement de polluants etc. Les ruissellements excessifs accroissent aussi la turbidité des eaux, les rendant impropres à la consommation.

Les sols viticoles sont sensibles à l'érosion hydrique, du fait de la pente et des sols souvent entretenus nus entre les rangs de vigne. Deux études, menées respectivement en Côte-d'Or (1996)ⁱ et en Saône-et-Loire (1988), ont recensé les causes et les effets des écoulements de boue dans les vignobles. Elles font le constat que, si les phénomènes d'érosion ont toujours existé, ils se sont aggravés depuis les années 1960-70. Les causes identifiées sont liées à l'évolution de la viticulture et à l'urbanisation des villages :

- L'agrandissement du parcellaire s'est traduit par un allongement des rangs dans le sens de la pente et par des plantations faites jusqu'en limite de voirie.
- Il s'est accompagné de la suppression des murets, des haies et des talus, réduisant les éléments de paysage qui peuvent freiner les ruissellements.
- Les réseaux autour des parcelles ont été également modifiés : création ou élargissement d'accès au point bas des parcelles, abandon, entretien défaillant ou destruction d'anciens réseaux d'évacuation des eaux.

L'érosion, un acteur majeur de la dégradation des sols et de l'environnement

[extrait du dossier INRA « les sols »]

« L'érosion des sols est un phénomène général de mobilisation et de transport de sol sous l'influence d'une contrainte. Cette contrainte peut avoir diverses origines, naturelles ou anthropiques : écoulement de l'eau, vent, gravité, travail du sol. Même lorsqu'il s'agit d'un phénomène naturel, l'érosion du sol est souvent exacerbée par l'action de l'homme à travers la modification du couvert végétal, de la structure du sol, de l'organisation spatiale du parcellaire et des réseaux associés : chemins, fossés. L'érosion est considérée comme la principale menace pesant à l'échelle européenne. »

- Les zones intermédiaires entre vignoble et villages ont été progressivement grignotées par l'urbanisation, avec l'extension des zones construites.

D'autres types de sol sont sensibles à l'érosion hydrique, **les sols battants** (cf. p. 23). La baisse des taux de matière organique contribue à la battance des sols limoneux, les éléments fins n'étant plus liés en agrégats par le complexe argilo-humique (cf. p. 14). Lorsque les sols sont nus ou avec une couverture végétale très faible, la terre fine est entraînée par les ruissellements de pluie. Les moyens de lutte consistent donc à **maintenir, voire enrichir, les sols en matière organique** (enfouissement des pailles). Le retour de ces sols à une bonne activité biologique limite les phénomènes de battance.

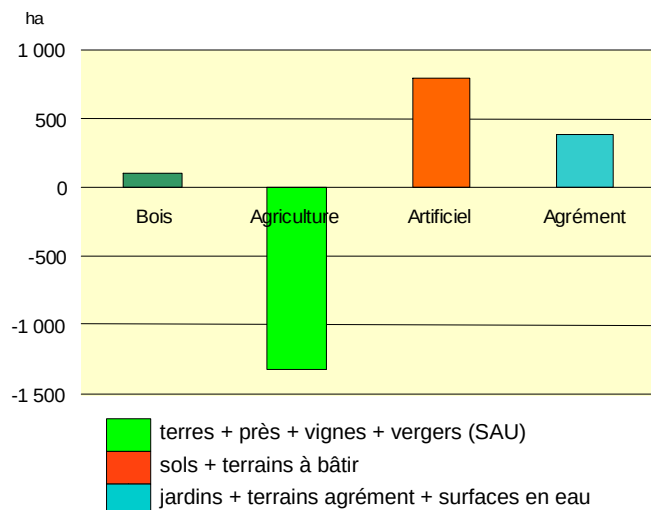
Prévenir les écoulements de boue en viticulture

La réhabilitation et l'entretien des murets des coteaux viticoles constituent donc des modes de préservation. Ils limitent les écoulements de boue à mi-pente, préservent les infrastructures de bas de pente, sans oublier leur rôle positif sur le paysage. L'enherbement sur les rangs de vigne permet de limiter le ruissellement des pluies.

L'érosion hydrique, qui se traduit par des écoulements de boue, est la première cause de perte de terre fine en France. **Les sols principalement concernés sont les sols viticoles et les sols pauvres en matière organique, les sols battants.** L'occupation des sols (sols nus ou avec couvert végétal) et l'aménagement de

l'espace (maillage de haies, de fossés...) jouent un rôle majeur sur les risques d'érosion. Une des conséquences des ruissellements excessifs, directement perceptible par le consommateur, est la **turbidité des eaux destinées à l'alimentation.**

Figure 20 : évolution des principales catégories de surfaces cadastrées en Saône et Loire, entre 2005 et 2007 (sources DDT 71)



Les sols agricoles, « matière première » de la consommation d'espace (source DDT 71- Frédérique Bourgeois)

Issu de données sur les surfaces cadastrées, ce diagramme donne une « image fiscale » du changement de l'occupation du sol, hors voiries et voies d'eau qui ne sont, pour la plupart, pas cadastrées. En Saône-et-Loire, la part d'artificialisation est estimée à 8,20 %, y compris les voiries, chemins et voies ferrées.

L'artificialisation des sols se décompose en deux catégories : les « espaces artificialisés » composés principalement de tous les espaces bâtis, et les surfaces d'« agrément » (jardins, terrains de loisirs et de sports, surfaces en eau etc.). Entre 2005 et 2007, 63 % de l'artificialisation de Saône et Loire se sont imperméabilisées et 37 % ont été transformés en parcs et jardins. La « nature » occupe donc une place importante dans les aménagements.

Chiffres clés

43,7 % des sols agricoles artificialisés entre 2000 et 2006 en Bourgogne sont des sols de bonne qualité agronomique (source SOeS)

Pertes de sol entre 2000 et 2006 par type de réserve utile (estimant le potentiel des sols) :

Réserve utile	Très faible	Faible	Moyenne	Forte	Très forte
Bourgogne	4,7%	15,9%	22,0%	13,7%	43,7%
France	13,5%	16,4%	17,8%	17,5%	34,8%

1 654 ha ont été perdus en Bourgogne à la production de biomasse, dont 722 ha de bon potentiel agronomique (très forte RU).

Dans cette période, l'extension des réseaux linéaires (voiries) de large emprise représente 4 % de la surface agricole artificialisée en France. La surface concernée est faible.

d) Perte de sol par l'artificialisation des sols : l'urbanisation

L'urbanisation consomme essentiellement des surfaces destinées jusque-là à l'agriculture ou à la forêt (Figure 20) : 90 % des sols artificialisés en France, entre 2000 et 2006, proviennent de zones agricolesⁱⁱ. Dans ce cas, le sol est réduit à sa seule fonction de support d'activités humaines et de production de matériaux. Les autres fonctions, production de biomasse, épuration, régulation sont perdues de façon irréversible.

Lorsqu'on évoque la perte de sol par consommation d'espace ou par artificialisation des sols, on fait avant tout référence à **la perte des fonctions de production de biomasse**. Elle est d'autant plus accentuée que l'extension urbaine se fait au détriment des sols à bon potentiel agronomique. Entre 2000 et 2006, plus du tiers des sols français convertis à l'urbanisation étaient des « bonnes terres agricoles », cette proportion atteint 43,7 % en Bourgogne. L'impact de l'urbanisation sur la consommation d'espace n'est pas le même selon que l'extension est le fait d'un tissu urbain continu ou discontinu. Ces deux modalités d'artificialisation peuvent se combiner dans l'espace et dans le temps :

- Les espaces périurbains naturels ou agricoles sont grignotés progressivement au profit des zones urbaines (tissu continu) ;
- ou bien l'habitat humain dispersé provoque le mitage des espaces naturels ou agricoles plus distants.

Les fonctions écologiques sont également altérées par l'urbanisation. L'imperméabilisation condamne de grandes surfaces de sol à ne plus pouvoir absorber et stocker une partie des eaux de pluies. Les **fonctions hydrologiques** des sols sont bouleversées : les ruissellements urbains jouent le rôle d'accélérateur de crue, l'eau ne peut plus s'infiltrer naturellement dans le sol ce qui affecte l'alimentation des nappes souterraines.

L'une des conséquences de la consommation d'espace par urbanisation est **la perte directe du**

L'expansion urbaine menace les fonctions des sols parce qu'elle provoque l'imperméabilisation irréversible de surfaces importantes et qu'elle consomme et fait disparaître une part importante de terres fertiles. La réintroduction de nature en ville, la gestion raisonnée de l'artificialisation en tenant compte des sols, permettent d'en limiter les effets néfastes.

matériau terre. Les sols imperméabilisés, scellés par les bâtis ou par les infrastructures ne sont plus des sols vivants. La vie biologique du sol devient extrêmement réduite. Les propriétés épuratrice et biologique des sols imperméabilisés n'existent pratiquement plus.

D'autres fonctions écologiques sont également perdues lorsque l'artificialisation des sols est conséquente :

- **fragmentation des habitats biologiques** participant à l'altération de la biodiversité ;
- **modification des conditions climatiques** de la ville par rapport aux zones qui l'entourent (effet îlot de chaleur urbaine). La température de la ville est plus chaude que la campagne avoisinante en moyenne de 2 °C le jour et de 7 °C la nuit.
- **effet épurateur des sols très réduit** ou inexistant alors que les pressions polluantes augmentent avec l'urbanisation du fait de la concentration de population et des activités humaines (cf. p. 32).

L'ensemble des activités humaines se concurrence pour l'utilisation du sol. Les PLU, anciennement les POS, sont fondés sur des bases foncières, plutôt que pédologiques, la vocation des sols n'est donc pas prise en compte. L'espace n'est pas distribué aux différentes fonctions humaines en fonction des qualités positives ou négatives des sols.

Aménagement urbain : AGIR

Aménager les espaces non imperméabilisés : le maintien, même partiel, de surfaces enherbées (aires de jeu, noues, végétalisation des parkings...) limite l'engorgement des stations d'épuration en absorbant une partie des pluies. Le sol « naturel » peut jouer son rôle de filtre vis-à-vis de contaminants entraînés par les eaux de pluie.

La gestion raisonnée de l'artificialisation tient compte de la continuité fonctionnelle et écologique entre les sols : continuité hydrique, couloirs de biodiversité,... les services écosystémiques des sols sont en partie maintenus. Adapter les usages à la spécificité des sols permet de valoriser leurs potentialités et d'éviter les dégradations.

Introduire des critères agronomiques des sols dans les PLU ou lors d'opérations d'aménagement d'infrastructure permettrait de mieux tenir compte de la vocation des sols en milieu urbain, au-delà d'une simple répartition spatiale des activités.

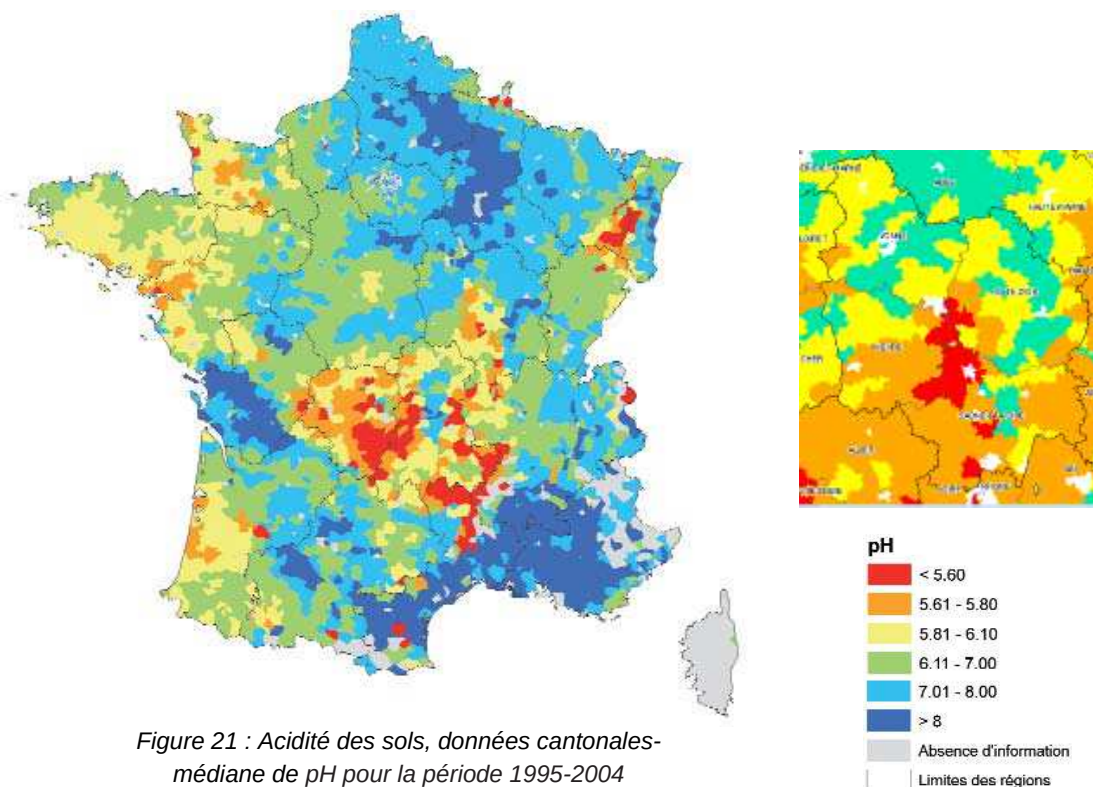


Figure 21 : Acidité des sols, données cantonales-
médiane de pH pour la période 1995-2004

(source : BDAT – INRA – Gis Sol)

Les origines de l'acidification des sols (source INRA Nancy)

Le niveau d'acidité d'un sol est caractérisé par trois paramètres :

- **Le pH d'un sol** mesure le caractère « acide » de celui-ci.
- **Le pouvoir tampon** est la capacité à neutraliser les acides, c'est-à-dire sa résistance vis-à-vis des acides. Elle dépend de la roche mère : la dissolution de roches riches en éléments nutritifs neutralise l'acidité et libère ces éléments nutritifs qui deviennent disponibles pour les plantes.
- **Le taux de saturation** qui correspond à la proportion d'éléments nutritifs disponibles dans le sol. Plus le sol est acide (faible pH) et plus la proportion de cations nutritifs « échangeables » est faible. Un sol acide est donc un sol « pauvre » puisqu'il met peu d'éléments nutritifs à la disposition des plantes.

Le fonctionnement du sol est lui-même acidifiant par l'intermédiaire des racines qui libèrent des acides, et par certains fonctionnements microbiens comme la nitrification.

Les pluies acides des années 1980

La voie privilégiée de **pénétration des gaz** dans le sol est l'entraînement par les pluies. Ce phénomène a été étudié avec les pluies acides, et a sévi dans les années 1980.

Alors que le pH de l'eau pure est à 7 (neutre), le gaz carbonique (dissous dans l'eau sous forme d'acide carbonique) fait baisser le pH des pluies à 5,6. Les rejets des activités humaines (industries, centrales thermiques, chauffages domestiques, véhicules à moteur...) contribuent aussi à l'acidification des pluies. C'est le cas des rejets de dioxyde de soufre (SO_2) ou d'oxydes d'azote (monoxyde d'azote NO , dioxyde d'azote NO_2) qui se transforment en acide sulfurique (H_2SO_4), ou en acide nitrique (HNO_3).

2.2 La qualité chimique : teneur des éléments et acidité

a) Critères de qualité : teneurs en éléments et niveau d'acidité

Le premier critère de **qualité chimique** d'un sol est donné par **son niveau d'acidité**. Il conditionne l'installation et le développement de certaines plantes ou de certaines cultures. L'acidification des sols est un phénomène naturel lié à la nature du substrat (granitique ou calcaire), à l'activité racinaire et aux pluies (*Figure 21*). Sous un pH trop acide, la vie du sol est ralentie : les bactéries du sol se développent mal et disparaissent, la matière organique se décompose mal, le taux de matière organique augmente par défaut de minéralisation, l'assimilation des éléments nutritifs par les plantes, autres que celles spécifiquement adaptées, se fait mal. Une forte acidité favorise la toxicité de certains éléments chimiques. C'est le cas de l'aluminium par exemple qui, en milieu acide, est sous une forme qui bloque le métabolisme de la plante et la fait dépérir.

D'autres critères de qualité chimique sont donnés par les niveaux de **teneurs en éléments chimiques**, ainsi que par l'équilibre entre eux (P/K, Ca/Mg, etc.). Ces teneurs dépendent du fond géochimique du sol, mais aussi des apports anthropiques, excès de fertilisation chimique ou organique. Ce sont soit des éléments chimiques simples qui sont habituellement et naturellement présents dans la solution du sol, soit des composés chimiques plus complexes, comme les composés de synthèse, pesticides ou autres produits chimiques utilisés en industrie. Rappelons que les éléments nutritifs sont rendus disponibles dans la solution du sol grâce au complexe argilo-humique (cf. p. 15). Lorsque les teneurs en éléments simples (P, K, S, Ca, Mg...) sont inférieures aux teneurs souhaitables pour l'élément considéré et le type de culture souhaitée, on parle de **carence**. Si elles sont largement supérieures, on parle de **toxicité**, même si ces teneurs sont très faibles dans l'absolu.

b) Les causes de dégradation chimique

La dégradation chimique fait référence à une acidification des sols ou à des apports d'éléments en quantités telles que les seuils de toxicité sont atteints.

L'effet des pluies acides et acidifiantes diffère selon la nature des sols : les sols calcaires, dont le pH avoisine 8, ne sont pas perturbés. Ils ont un pouvoir tampon assez fort, c'est-à-dire qu'ils sont capables de neutraliser l'effet acidifiant des pluies. A l'inverse, les sols peu profonds et pauvres en éléments carbonatés, comme des sols de grès ou de granit, sont plus sensibles à l'acidification des pluies.

L'exemple classique de sol dégradé par excès d'un élément chimique est celui de la toxicité en cuivre

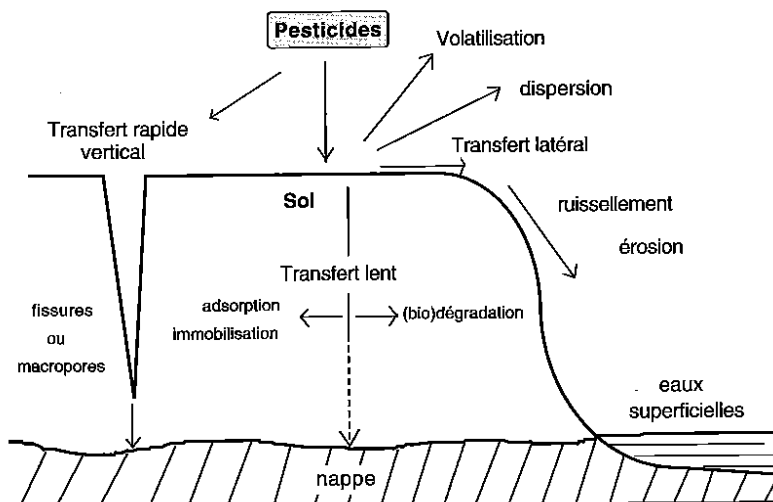
des sols de vignoble, du fait de l'emploi répété et en quantité importante de bouillie bordelaise. Un autre exemple est celui des sols chargés en cadmium, élément qui n'est présent naturellement qu'à l'état de trace dans les sols (cf. p. 33). Il est apporté avec les boues urbaines d'épuration. La dégradation chimique peut, à l'inverse, résulter d'une baisse importante d'éléments nutritifs, due à l'exploitation excessive des sols. Dans ce cas, on parle plutôt **d'épuisement des sols**.

Lorsque les sols sont chargés en éléments chimiques complexes de synthèse, tels que les pesticides ou déchets chimiques industriels, la **pollution des sols** peut devenir avérée. A noter que les microorganismes du sol jouent un rôle favorable sur la dégradation des polluants.

Les apports de fertilisants, organiques ou chimiques, viennent corriger une qualité chimique insuffisante au regard de la production en biomasse escomptée. En cas de toxicité par excès d'un élément (Cu, As...), le palliatif reste le changement de culture. Ce peut être aussi la correction de l'acidité par chaulage.

La problématique en Bourgogne ne porte pas, ou très peu, sur les contaminations industrielles, mais essentiellement sur les contaminations diffuses liées à l'utilisation de pesticides et de fertilisants ainsi que l'accumulation de cuivre dans les sols viticoles.

Figure 22 : Devenir des pesticides dans le sol (M.Robert)



Devenir des pesticides dans le sol

Les pesticides qui se déposent sur le sol sont transférés par les eaux de pluie vers les ressources en eau :

- Ils s'écoulent vers les eaux superficielles par transfert latéral (ruissellement) ;
- Ou vers les nappes souterraines par transfert vertical. Selon la nature du substrat, ce transfert est plus ou moins rapide, le transfert le plus rapide se faisant par les fissures du sol (exemple des sols karstiques). Lors de ces transferts verticaux, peuvent intervenir les phénomènes complexes d'adsorption par les complexes argilo-humiques, ou de biodégradation par les microorganismes.

La dissémination dans les différents compartiments de l'environnement (eau, air, sol) et dans la chaîne alimentaire en fait une source d'exposition multiple (différents dispositifs de suivi des contaminations existent, principalement sur l'eau et les aliments). Les pesticides sont apportés sur le sol au moment des traitements des plantes. Certains sont utilisés (anti-limaces, insecticides) pour éliminer des prédateurs de culture. Peu de mesures et d'observations sont faites pour montrer leur impact sur l'ensemble de la faune du sol. La contamination des sols varie avec le type de produit utilisé, le moment de l'application et le couvert végétal du sol : en pulvérisation sur feuillages, on estime que 10 à 70 % du produit appliqué restent au sol ; les pertes au sol sont plus importantes pour les herbicides que pour les fongicides ou insecticides foliaires.

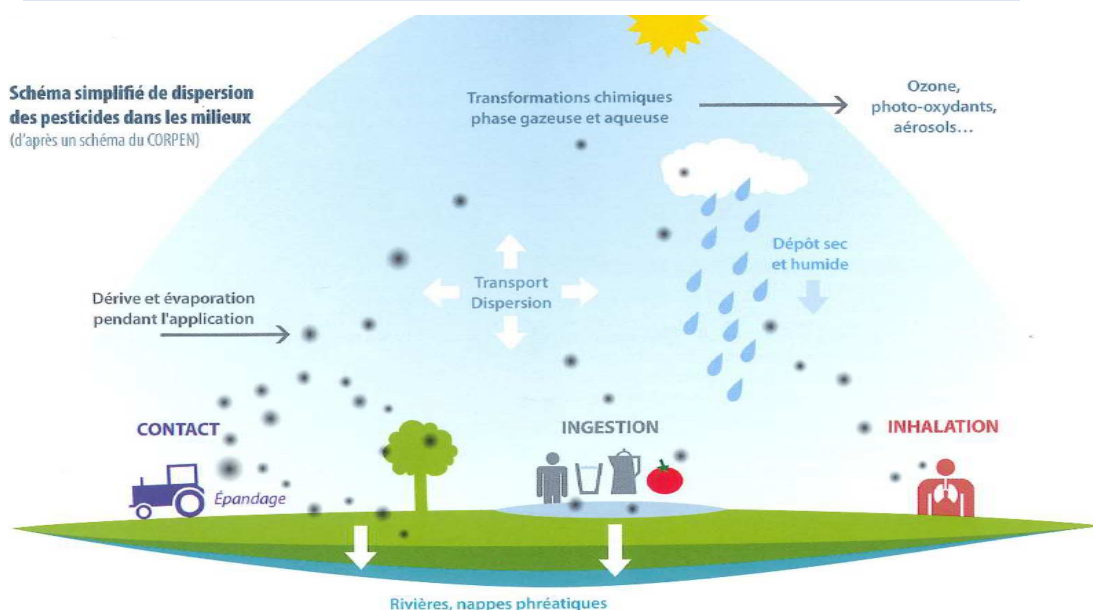


Figure 23 : Schéma simplifié de la dispersion des pesticides dans les milieux

c) Le sol, un rôle important de biodégradation sur les pesticides

La contamination de l'environnement par les pesticides a des conséquences insidieuses sur la santé de l'Homme, à tel point que cela est devenu une préoccupation forte des citoyens. La dissémination des pesticides dans les différents compartiments de l'environnement (eau, air, sol) et dans la chaîne alimentaire en fait une source d'exposition multiple (*Figure 23*).

Selon la nature des molécules utilisées et la répétition de leurs usages, certains pesticides, tel le lindane, sont **présents partout en « bruit de fond »**. C'est ce qu'a montré l'INRA d'Orléans dans son programme de recherche sur la distribution géographique de quelques-uns des pesticides persistants dans le sol. Les détections montrent des niveaux faibles, avec toutefois des gradients de concentration sur le territoire étudié (Nord-Pas de Calais). Il n'est pas encore possible d'en conclure un niveau de contamination.

Le devenir de ces polluants dans le sol est complexe, et encore très imparfaitement cerné. De plus, il varie avec les types de molécules. La vitesse de dégradation varie fortement pour une même molécule.

Du couple de processus rétention/dégradation (cf. p. 57) dépend le devenir des pesticides :

- Les molécules sont dégradées et les formes finales de dégradation peuvent rester liées aux agrégats du sol de façon irréversible. **La**

minéralisation totale dépend de la stabilité chimique de la molécule et de facteurs abiotiques (température, humidité) et biologiques (microflore). La nature chimique de ces résidus liés (c'est-à-dire non extractibles par les méthodes classiques d'analyse) et le devenir de ces agrégats pollués sont encore mal connus. Une application pratique est celle des lits biologiques utilisés pour éliminer les eaux de rinçage des pulvérisateurs (cf. p. 57).

- Les pesticides sont **restitués dans le milieu**, notamment dans les eaux souterraines, plus ou moins rapidement et plus ou moins en totalité (*Figure 22*). Ils sont restitués sous leur forme moléculaire initiale, ou sous leur forme dégradée (les métabolites). Un pesticide peut donner plusieurs formes de métabolites. Les mesures dans les eaux souterraines révèlent une présence non négligeable de molécules, tant en quantité qu'en diversité.
- Les pesticides peuvent aussi subir une biodégradation faible et rester en « **bruit de fonds** » dans les sols (exemple des mesures de lindane).

Le sol joue bien un rôle majeur de **dépollution**. Mais les pesticides qui résident pour un temps plus ou moins long dans les sols contribuent-ils à dégrader l'écosystème sol ? Il est actuellement impossible de répondre à cette question.

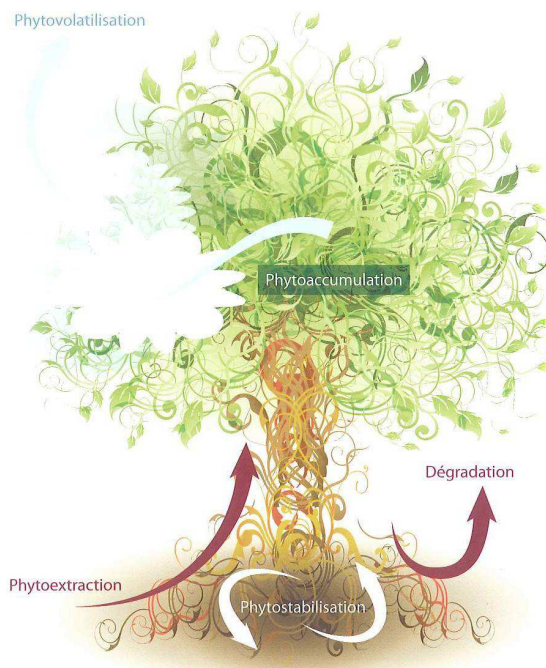
*Dans le sol, la mobilité des pesticides est réduite et leur transfert vers l'air ou l'eau est diminué au moins temporairement. **Les sols ont un effet bénéfique de dépollution** en participant à la dégradation active des pesticides via les micro-organismes. Ils ont aussi un effet pervers de stockage des substances. La présence de molécules en « bruit de fond » et les études sur la cinétique des molécules dans le sol témoignent de l'existence de « résidus liés ». Cela pose la question du **risque environnemental à long terme**, notamment dans le cas d'une réallocation des terres agricoles à d'autres usages.*

ECOPHYTO 2018 : AGIR

Dans le cadre du Grenelle de l'environnement, le plan Écophyto 2018 se met en place avec deux grands objectifs : supprimer progressivement les molécules les plus dangereuses et réduire l'usage des pesticides, agricoles ou non agricoles, de 50 % si possible, dans un délai de 10 ans.

Agriculture Biologique

L'option d'une agriculture « zéro phyto » a été renforcée par le ministre de l'Agriculture en 2008, avec l'objectif pour 2012 de consacrer 6 % des surfaces agricoles françaises en l'agriculture biologique. Fin 2011, 41 417 ha de terres sont cultivées en Bio (ou sont en conversion) : la Bourgogne détient aujourd'hui 6,11 % des surfaces biologiques françaises et 4,6 % des fermes engagées en bio, ce qui la place au 9^e rang pour les surfaces et pour le nombre de producteurs. Le ratio SAU bio/SAU totale atteint 2,3 %, la moyenne nationale étant de : 3 %. (*Source : SEDAEB*)



La phytoremédiation : AGIR

L'utilisation du concept de phytorestauration permet de limiter la pollution par certains éléments (phosphore, azote), et de capter éventuellement des micropolluants tout en aménageant un cadre agréable. Au-delà de leur propriété d'agrément paysager, ces éléments naturels contribuent à recréer progressivement un micro-écosystème. L'accumulation dans les végétaux dépend de l'élément considéré, des propriétés du sol et de l'espèce végétale notamment. Certaines des plantes qui poussent naturellement, à l'état sauvage, sur des affleurements enrichis en minéraux (cadmium, plomb, zinc) présentent une capacité soit d'hyperaccumulation. Elles sont utilisées pour dépolluer les sites, c'est la phytoremédiation. Ce qui rend possible l'usage de ces sites pour la production de biomasse.

Figure 24 : schéma de la phytoremédiation

Les PCB (polychlorobiphényles) sont des substances très toxiques. Ils ont été utilisés massivement comme lubrifiants dans les turbines, composants ignifuges des peintures ou isolants électriques pour transformateurs et condensateurs). Interdits de mise sur le marché depuis 1987, les PCB font l'objet d'un plan national de décontamination et d'élimination instauré en 2003. Les derniers appareils contenant des PCB et PCT (polychloroterphényles) devaient disparaître d'ici fin 2010. Mais les associations environnementales, associées au plan, s'inquiètent des possibles « oublis » que pourrait comporter le recensement des sites et appareils concernés, ainsi que des retards que pourrait prendre le processus. Les sites en Bourgogne concernent tous ou presque des situations accidentelles ou anciennes.

Source : Usine nouvelle – Robin des bois – BRGM

Atlas des sites pollués aux PCB

Bulletin PCB n°8 / Hors-Série



Sources : BRGM - Ministère de l'Ecologie - Robin des Bois

Figure 25 : Pollution au PCB (données 2003)

d) Sites pollués par des éléments traces : place à la phytoremédiation

Les sols contiennent naturellement un certain nombre d'éléments traces, provenant en partie de la dégradation des roches. Ils sont métalliques (cuivre, fer, zinc...) ou non métalliques (bore, sélénium, arsenic...) ou encore radio- nucléidiques (césium, zircon, nickel...). Les régions du pourtour du Massif Central et du Morvan ont un fond pédogéochimique de niveau élevé dû à de fortes **anomalies naturelles** en éléments traces métalliques (plomb, zinc, cuivre, cadmium). Même à de faible teneur, ces éléments peuvent rapidement devenir toxiques pour la vie biologique.

Une autre partie, très variable selon les sites, est **liée aux activités humaines** (industrie, extraction minière, épandages de déchets urbains, pratiques agricoles, trafic routier...). C'est pourquoi on inclut à la liste des éléments traces les polluants organiques urbains (hydrocarbures pétroliers, HAP, PCB...). Les apports de ces éléments traces peuvent être devenus tels que le site est qualifié de **site pollué**. En fait, la pollution est mesurée indirectement par la contamination des eaux en lien avec le site (*Figure 25*). L'origine de la pollution est soit accidentelle, soit chronique et localisée, soit encore diffuse. Les situations résultent fréquemment de pratiques sommaires d'élimination des déchets, ou de conditions imparfaites d'exploitation, souvent anciennes. Des teneurs excessives en éléments traces dans les sols peuvent affecter les végétaux et la chaîne alimentaire. Toutefois, tous les végétaux ne répondent pas de façon identique à la pollution d'un sol : ils peuvent ne pas être affectés par les fortes teneurs (les racines n'extraient qu'en fonction de leurs besoins) ou, au contraire, avoir la capacité de les accumuler en quantité importante, l'hyperaccumulation, ou encore avoir une

Site pollué : définition (ministère en charge de l'environnement, 1996)

Un site pollué est un site qui, du fait d'anciens dépôts de déchets ou d'infiltrations de substances polluantes, présente une pollution susceptible de provoquer une nuisance ou un risque pour les personnes ou l'environnement ». Ce sont d'anciennes décharges ou d'anciens dépôts de résidus miniers ou d'incinération, ou de produits chimiques abandonnés, d'anciens remblais, ou des zones où ont été déversées des substances (hydrocarbures,...) qui se sont ensuite infiltrées dans le sol, ou encore des retombées de poussières consécutives à des rejets atmosphériques accumulés sur de longues périodes. Sur les 3009 sites recensés en 2000 sur le territoire français, 63 sont bourguignons (rapport du sénat de 2001).

Éléments traces, ou éléments en trace : définition (source INRA Orléans)

Ce sont les 80 éléments chimiques dont la concentration, dans la croûte terrestre, est pour chacun d'entre eux inférieure à 0,1 %. Certains sont indispensables au déroulement des processus biologiques végétaux ou animaux : ils sont alors nommés "oligo-éléments". Mais la plupart des oligo-éléments peuvent s'avérer toxiques pour diverses formes de vie, à des teneurs très fortes (et en fonction des espèces chimiques présentes) : c'est le cas de Cu, Zn, Cr. Il en va de même pour d'autres éléments traces dont le caractère indispensable n'est pas démontré (Cd, Hg, Pb, Sn).

croissance altérée ou même dépérir si cet élément est toxique pour lui. Dans les opérations de phytoremédiation basées sur la propriété des plantes à capter les polluants (*Figure 24*), la biomasse végétale contaminée doit subir un traitement approprié.

La Bourgogne est assez peu concernée par la pollution en éléments traces, du fait de sa faible activité industrielle.

Les principales vigilances portent sur :

- **le cadmium**, résultant de l'épandage de boues de stations d'épuration avant les obligations réglementaires,

- **les PCB** (8 sites recensés) : pollution qui résulte souvent d'actes de vandalisme pour récupérer le cuivre des transformateurs désaffectés,
- **et le cuivre** dans les sols de vignobles, du fait de traitements phytosanitaires répétitifs à base de cuivre (bouille bordelaise).

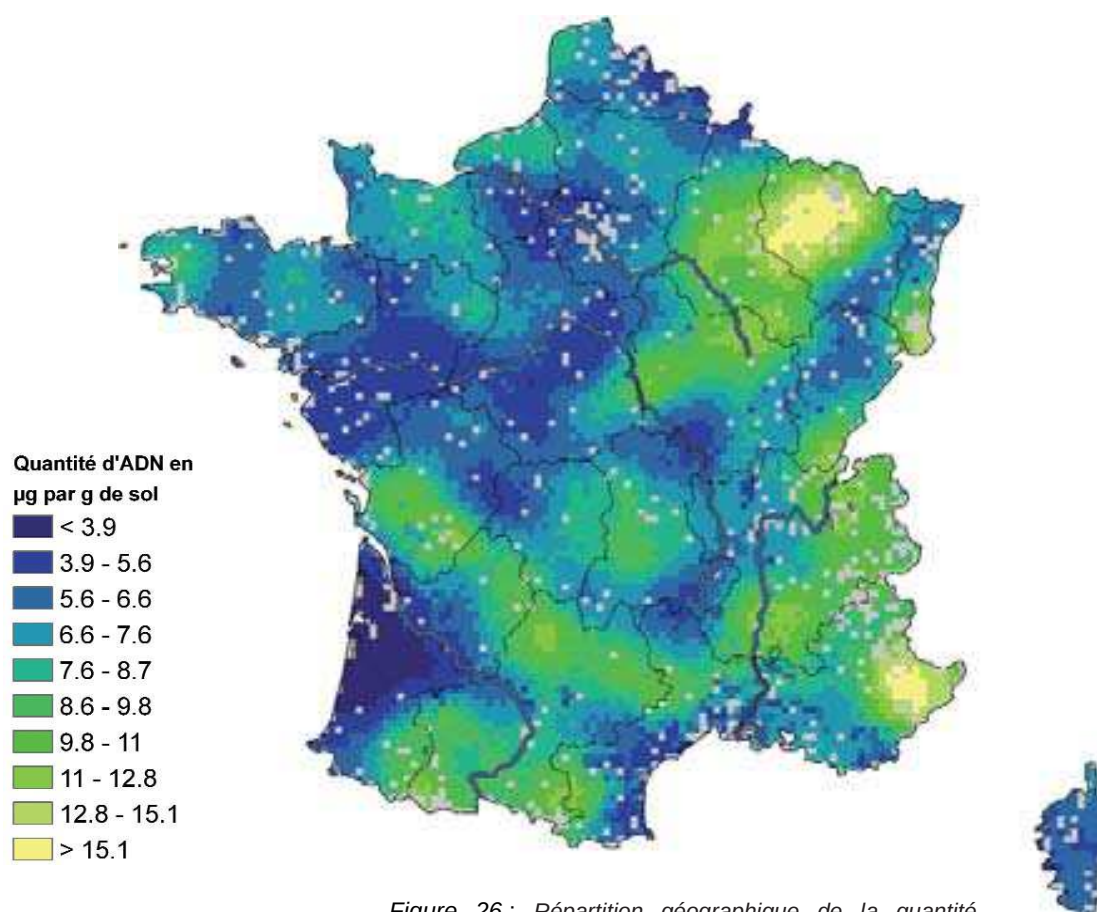


Figure 26 : Répartition géographique de la quantité d'ADN microbienne dans les sols (= biomasse microbienne) à l'échelle de la France (source Gis Sol)

Richesse des sols en micro-organismes

La biomasse microbienne des sols est mesurée à partir de la quantité d'ADN microbien. Sa distribution n'est pas aléatoire sur le territoire français : elle peut être reliée à des paramètres pédologiques (teneur en argile, matière organique liée à l'argile) et à l'occupation des sols. Les biomasses les plus importantes sont associées aux sols argileux, calcaires et aux prairies permanentes. Les plus faibles correspondent aux sols sableux, acides et aux sols viticoles. (extrait de la fiche du Gis Sol, ECOMIC – RMQS- fev 2010).

2.3 La qualité biologique : richesse et diversité des espèces

La qualité biologique fait référence à la richesse du sol en microorganismes et autres organismes vivants, faune et flore (vers de terre, collemboles, champignons...). Une grande diversité d'espèces traduit une diversité d'activités, alors que quelques espèces en grand nombre ne suffiront pas à assumer l'ensemble de la palette des services écosystémiques (cf. p. 7).

La qualité biologique est indissociable de la **teneur en matière organique**, bien que ce ne soit pas la même chose : les micro-organismes participent à la dégradation de la matière organique pour la stabiliser (production de matière organique stable, appelée humus), et s'en nourrissent. Les apports de matière organique entretiennent la vie biologique. La partie stable est davantage un indicateur de qualité du sol que la matière organique brute (litière, débris organiques). La qualité biologique est donc estimée par plusieurs paramètres comme la teneur en matière organique, et aussi, plus récemment, la teneur en ADN des microorganismes (*Figure 26*). Pour évaluer la richesse en macrofaune d'un sol, des comptages sur profil de sol (fosse d'un mètre de profondeur au champ) sont nécessaires. Un observatoire participatif des « vers de terre » se met en place actuellement pour évaluer la biodiversité des sols. Les écologues pratiquent le repérage de boulettes fécales pour identifier les agents qui ont participé à la décomposition de la matière organique.

La dégradation biologique est pratiquement synonyme de perte en matière organique des sols. Ce phénomène s'observe notamment à la suite d'un retournement de prairie ou d'un défrichage de forêt. Dans les 10 ans qui suivent ces changements d'affectation des sols, la teneur en matière organique du sol chute de 50 à 60 %. Cette matière organique est non seulement indispensable à la structure du sol mais aussi à l'entretien de la vie biologique du sol.

La vie biologique peut être freinée à la suite de différentes causes :

- par l'imperméabilisation des sols,
- par une mauvaise aération (engorgement des sols en eau, compaction des sols argileux),
- ou par des pressions polluantes (pesticides, notamment insecticides et fongicides, métaux lourds),
- ou encore par les pratiques agricoles trop intensives (rotations courtes, monoculture, usages intensifs de pesticides, surpâturage).

L'évolution de la matière organique en humus est alors ralentie.



Restaurer ou entretenir la qualité biologique d'un sol, c'est veiller au renouvellement de la matière organique. En pratique, les apports de compost, ou de fumier sont très favorables. C'est aussi limiter les usages de pesticides au sol qui peuvent avoir une

action sélective sur la faune et la flore du sol. Enfin, c'est garder un sol aéré, soit sous l'action des racines, soit par des travaux à façon (travail du sol, jardinage...). L'utilisation d'outils, lorsque les terres sont trop humides, est à proscrire.

Les sols sous prairies permanentes ou forestiers, notamment lorsqu'ils sont argileux, ont une bonne richesse en matière organique et ont globalement une meilleure qualité biologique que des sols sableux ou des sols acides, ou encore les sols viticoles.

A biomasse vivante identique, c'est la diversité des espèces plus que la quantité d'un nombre restreint d'espèces, qui assume le mieux l'ensemble des fonctions écosystémiques du sol.

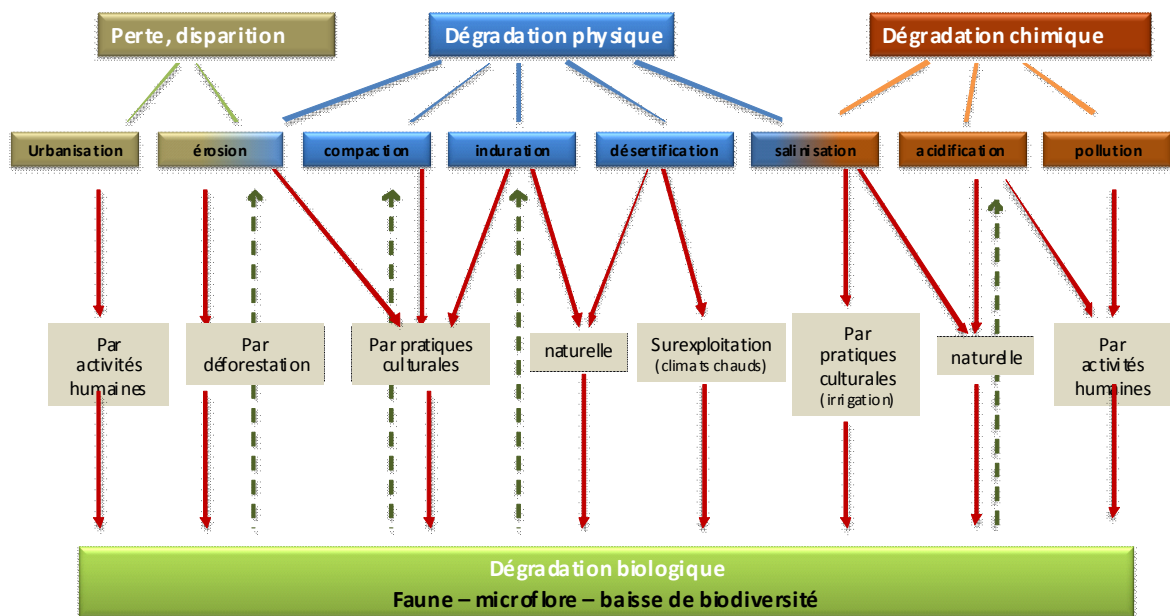


Figure 27 : Schéma de la dégradation des sols (source : B.Jabiol, 2004 ENGREF Nancy)

2.4 En résumé : un écosystème complexe altérable

a) Un écosystème complexe : des fonctionnements interdépendants

Chaque sol se caractérise par une pédogenèse et une texture qui lui sont propres, comme le visualisent les cartes pédologiques. Les analyses de sol révèlent aussi des différences chimiques d'un sol à l'autre. Pour rendre compte des différences de vies biologiques, des observations commencent à se mettre en place (observatoire vers de terre, suivi ADN...). C'est un nouvel essor des connaissances pédologiques.

Ces fonctionnements ne sont pas indépendants : un bon équilibre de texture, eau-gaz-fraction solide, favorise la circulation de l'eau et des micro-organismes (*Figure 15*). Cela facilite la mise à disposition d'éléments nutritifs pour les plantes, dont les racines, à leur tour, contribuent à la bonne

aération du sol. La porosité est entretenue, la qualité de la texture maintenue.

La matière organique est au centre de l'écosystème sol : elle est source d'alimentation pour les micro-organismes du sol, et ceux-ci contribuent à sa dégradation jusqu'à un stade de minéralisation stable. En se combinant à l'argile du sol (le complexe argilo-humique), elle fait office de transporteur d'éléments nutritifs. Elle donne de la cohésion aux agrégats du sol. Leur diversité de taille contribue à maintenir la porosité nécessaire à une bonne structure.

b) Un écosystème altérable : les dégradations peuvent s'enchaîner

Dégradations physiques, chimiques ou biologiques se combinent entre elles. Mais toutes conduisent à une dégradation de la biologie des sols (*Figure 27*). Prenons l'exemple d'un sol compacté de façon répétée. Les propriétés physiques se modifient fortement. Le sol est écrasé, il se ferme. L'eau circule de plus en plus mal puisque les vides changent ou disparaissent. La végétation s'implante mal, ou trop peu. Ensuite, l'érosion entre en action, entraînant les éléments fins de surface. Les dynamiques biologiques sont réduites et ne maîtrisent plus les pollutions. D'autres chaînes se dégradent : modification des constituants (argile et fer), disparition des éléments nutritifs et des oligo-éléments, apparition d'éléments toxiques ou en excès (sels, nitrates, métaux lourds...).

Certains agents d'érosion d'origine naturelle ont été corrigés par l'homme comme l'érosion hydrique (cultures en terrasses, aménagement de berges par exemple) ou l'engorgement par l'eau (drainages, pompages...). Actuellement, on découvre que certains de ces aménagements, réalisés pour étendre la disponibilité de la ressource sol, peuvent avoir aussi des effets perturbateurs sur les milieux. Mais c'est bien souvent parce que d'autres **actions anthropiques ont amplifié** les actions de

dégradation, comme l'imperméabilisation des sols en zones urbaines ou le changement d'occupation des sols. L'envergure des aménagements peut aussi avoir été telle que ceux-ci ont porté atteinte aux fonctions écosystémiques des sols. C'est le cas des opérations de drainage menées dès le XIX^e siècle pour gagner les sols gorgés d'eau, comme les marais, à la production agricole. Puis au milieu du XX^e siècle, le drainage par canalisations enterrées a été généralisé aux sols marqués par de fréquents excès d'eau de surface (pseudogley, limons battants...). En améliorant la praticabilité des terrains, il a ainsi limité les risques de dégradation de la structure, élargissant ainsi la gamme des cultures et régularisant les rendements. De nombreux pâturages ont ainsi été reconvertis à la céréaliculture, plus rémunératrice que l'élevage.

Toutefois, le drainage a été souvent associé à des remembrements, reconfigurant le paysage (suppression de haies). Si aujourd'hui le drainage est contesté, c'est essentiellement parce que les prairies et les zones humides ne sont plus assez nombreuses pour assurer un rôle tampon vis-à-vis des réseaux hydrologiques.

Le Cemagref estime qu'en-dessous de 20 % du territoire drainé, les conséquences sont faibles.

Dans son processus de formation, le sol est en évolution permanente et subit des dégradations naturelles. Parmi les formes de dégradations dues à l'homme, le premier constituant du sol touché est la diversité biologique.

Immédiatement après viennent les transformations de la matière organique, puis les modifications de structure et de porosité (tassement du sol).

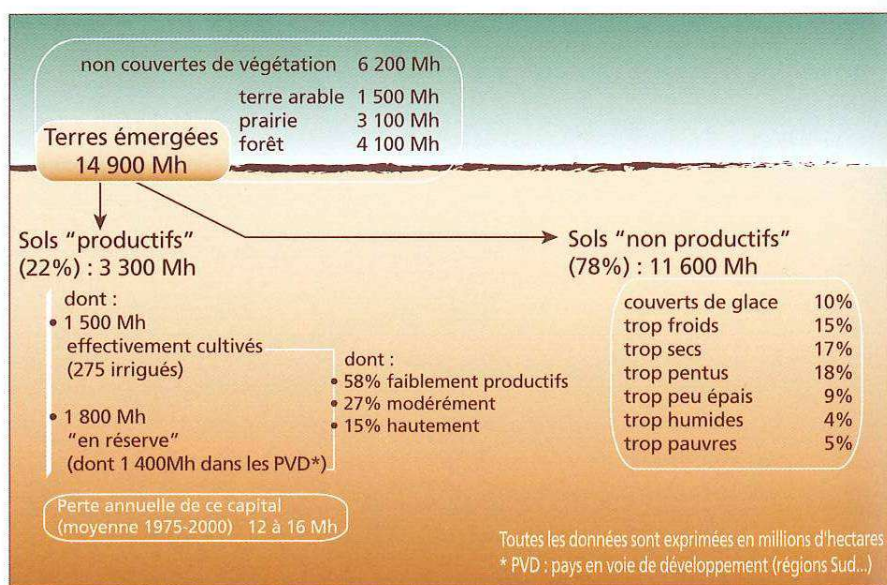


Figure 28 : Répartition des sols sur le globe (source INRA dossier « Les sols »)

c) Le sol, une ressource limitée et non renouvelable

« Le sol est une ressource limitée qui se détruit facilement : [...] Son usage est limité par le climat et la topographie. Il se forme lentement par des processus physiques, physico-chimiques et biologiques, mais il peut être détruit rapidement à la suite d'actions inconsidérées. La productivité du sol peut être améliorée par un aménagement approprié durant des années. Sa reconstitution, une fois qu'il est diminué ou détruit, peut demander des siècles. »
[Extrait de la charte européenne des sols 1972].

DEFINITION : les dommages irréversibles

La vitesse moyenne de formation d'un sol est de 0,1 à 0,02 mm/an alors que l'érosion moyenne exporte 1 mm de sol en un an (IRD 2006)

On considère qu'une atteinte est irréversible quand elle ne peut pas être inversée par des forces naturelles ou par une intervention technique sur une période de 100 ans.

A la surface de la terre, les sols présentant des caractéristiques favorables aux cultures ne représentent que 22 % des terres émergées. C'est une ressource beaucoup plus limitée qu'il n'y paraît. Parmi les sols « productifs », plus de la moitié, essentiellement localisés dans les régions Sud du globe, sont actuellement inutilisables. Les causes en sont soit des problèmes chimiques (acidité, toxicité liée à l'aluminium, salinité...), soit des conditions climatiques trop arides (Figure 28).

L'Agence Européenne de l'Environnement estime que **toute perte d'une tonne de terre par hectare et par an peut être considérée comme irréversible** car son temps de régénération est très lent.

Si les sols impropres à la culture pourraient théoriquement être utilisés comme support d'infrastructure, il n'en est rien dans la réalité : les conditions nécessaires pour que s'implante des sociétés humaines sont conditionnées par la proximité d'eau et de nourriture, c'est-à-dire la proximité de terres agricoles.

A peine un quart des terres émergées du globe est estimé productif pour les cultures alimentaires, et la moitié de celles-ci sont effectivement cultivées. Ces terres sont inégalement réparties, au détriment des régions Sud. Sous nos latitudes, les conditions topographiques de montagne,

les fortes pentes et une couverture pédologique trop mince sont les principales causes de la non-productivité des sols. La couverture naturelle végétale y est maigre. En Bourgogne, on peut considérer les pelouses calcaires, par exemple, comme des sols non productifs.



Figure 29 : Représentation schématique des fonctionnalités des sols
(Extrait de « Les sols : un support vivant, des services multiples », Repères n°58, Alterre Bourgogne, octobre 2011.)

Partie II : Les services rendus à la société

Mieux UTILISER

3 Les fonctionnalités du sol

Les sols font partie de notre environnement quotidien, et nous utilisons leurs fonctionnalités sans toujours bien les comprendre, avec un certain empirisme. Elles sont classées traditionnellement en trois grandes catégoriesⁱⁱⁱ (Figure 29) :

- Le sol est le support de toute vie terrestre, végétale et animale. **La fonction de support** concerne aussi l'implantation des bâtiments, des infrastructures. Elle est souvent liée à la fonction de production de matériaux lors des constructions. L'occupation des sols façonne notre histoire et nos paysages et elle s'inscrit dans la mémoire des sols. C'est un héritage culturel.
- Les sols assument une **fonction de production** de denrées alimentaires agricoles et de bois. Cette fonction économique s'étend à la production de biomasse végétale destinée à la production d'énergie (cultures énergétiques, bois...). Les sols sont aussi **une ressource** de matériaux de construction (terres, gravats, roches...).
- Intimement liés aux autres compartiments de l'environnement - l'air, l'eau et la biosphère - les sols ont une **fonction environnementale**. Ils jouent un rôle important dans la régulation et l'épuration de l'eau et dans la dégradation des contaminations chimiques. Actuellement, on s'intéresse particulièrement à son rôle de rétention et de stockage de gaz à effet de serre (gaz carbonique, protoxyde d'azote) vis-à-vis du changement climatique.

Les différentes utilisations des sols ne sont pas toujours compatibles :

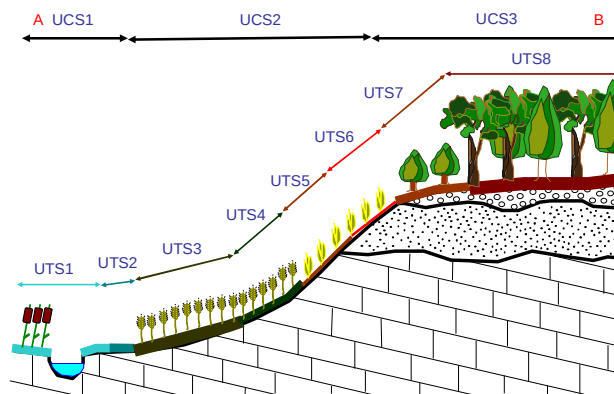
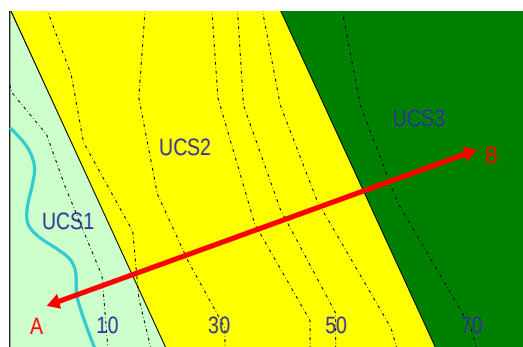
- Considérer le sol comme source de matériaux bruts n'est pas forcément compatible avec la notion d'héritage culturel, ni de filtration/régulation.
- La fonction de filtre et de transformation par absorption ne l'est pas avec celle de réserve génétique.

Les fonctionnalités des sols, classement

L'atlas de la biodiversité, édité par la commission européenne, recense un grand nombre de services apportés par les sols avec un classement encore différent de ceux exposés ci-contre. La fonction culturelle, qu'on pourrait aussi qualifier de fonction sociale, est une fonction à part entière, distincte de la fonction support. On notera aussi que la fonction de production est étendue à la biodiversité (refuge). Les cycles des éléments nutritifs sont plutôt imputés à la fonction de support qu'à la fonction de production ou de régulation. Dans les relations du sol avec l'eau, le stockage d'eau est analysé comme une fonction de production.

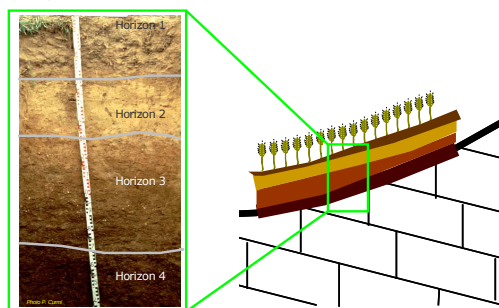
- La fonction de production peut s'opposer aux fonctions écologiques. Alors que l'agriculture contribue à entretenir les sols, et que les pratiques de travail simplifiées sont respectueuses des propriétés structurales des sols, les pratiques intensives ont, quant à elles, des incidences négatives (baisse du taux de MO, battance des sols limoneux...).
- La concurrence entre la fonction support d'activité (urbanisation) et la fonction de production de biomasse destinée à l'alimentation est visible sur l'évolution des marchés fonciers.

Les sols présentent un grand nombre de fonctions liées aux autres domaines de l'environnement et dont dépendent nos sociétés. Nous présenterons ici les principales fonctions des sols selon les services qu'ils peuvent rendre à l'Homme, plus ou moins selon les trois facettes du développement durable (social, économique, environnemental).



UTS

représente une portion de la couverture pédologique qui présente les caractères diagnostiques d'une pédogenèse identique et qui présente en tout lieu de l'espace la même succession d'horizons, l'un ou l'autre de ces horizons pouvant être absent.



STRATE

couche de sol
regroupant plusieurs
horizons

Figure 30 : Exemple d'une analyse de pédopaysage. Détail de séquence sur la ligne AB de la représentation spatiale (Source : Marjorie Ubertos, AgroSup Dijon)

3.1 Fonction de support et fonction culturelle : sols et paysages

a) Support de vie, de végétation : l'occupation des sols

Le sol est un **support pour la végétation**. Les plantes s'ancrent dans les sols, même dans des sols très pauvres, grâce à leurs racines. On peut d'ailleurs faire pousser des plantes sans sol, à condition d'apporter les nutriments nécessaires à leur croissance (culture hydroponique). Mais il est vrai que cette fonction de support des sols pour la végétation est rarement indépendante de celle de la fonction nutritive. La relation entre sol et écosystème est étroite. Elle évolue à une échelle de temps très longue (Figure 31) :

- Les sols jeunes, issus d'une faible dégradation de la roche mère, sont colonisés par les plantes dites pionnières.
- Au fur et à mesure que le sol évolue, l'écosystème se complexifie. Sous nos climats, cet écosystème est représenté par les forêts tempérées.
- Ecosystème et sol se développent conjointement, le sol est mature.
- Les sols vieillissants s'appauvrissent en éléments, ce qui traduit une évolution de la flore.

L'homme modifie les écosystèmes en travaillant le sol et en sélectionnant une végétation (culture, prairie...). Cela influence le sol et les écosystèmes : l'agriculture, lorsqu'elle apporte juste les éléments nécessaires, contribue à conserver le sol à un stade jeune et s'oppose à son vieillissement.

A l'échelle d'un territoire, **les sols se distinguent par leur occupation**. Dans le paysage autour de nous, les sols forment une mosaïque d'éléments plus ou moins nettement délimités, aux transitions marquées ou graduelles. Ces mosaïques de sols se distinguent par leur couverture végétale et par des différences de modelé, de topographie. Elles se différencient aussi par la nature du sol. La cartographie des types de sols, à partir de la lecture des paysages, donne **la carte des pédopaysages** (Figure 30).

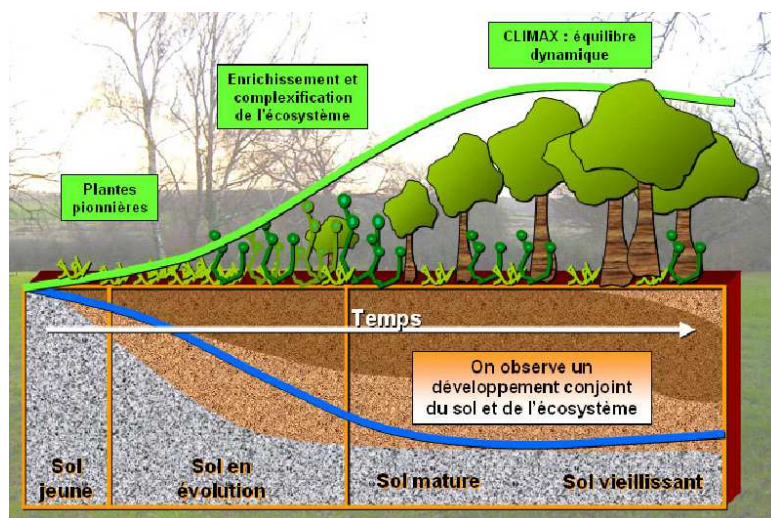
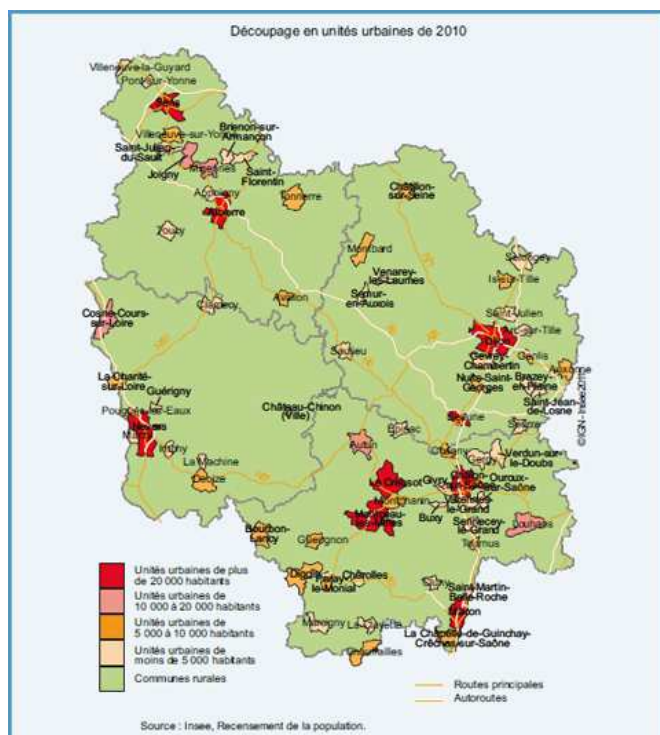


Figure 31: Relation sol et écosystème terrestre

Source : Frédéric Thomas, 2004

La formation et l'évolution du sol sont inséparables de la formation et de l'évolution des écosystèmes : l'occupation des sols est une forme de lecture des sols. L'analyse par

les pédopaysages intègre au mieux ces deux dimensions : la couverture du sol, et la composition géo-bio-physico-chimique du sol.



L'urbanisation en Bourgogne : les données de l'INSEE

Taux d'urbanisation :

- Bourgogne : 55,7%
- Yonne : 42,5 %
- Nièvre : 49,8 %
- Saône-et-Loire : 59 %
- Côte-d'Or : 63,2 %

La Bourgogne est une des régions les moins urbanisées de la métropole : 55,7 % de la population vit en ville, alors que la moyenne française est à 77,5 %.

La superficie du territoire urbain est aussi plus modeste en Bourgogne : les 71 unités urbaines de la région (communes d'au moins 2 000 habitants), souvent des villes isolées de petite taille, couvrent 9 % du territoire régional alors que 21,8 % du territoire métropolitain est urbain.

En Bourgogne, **peu d'unités urbaines s'étendent et beaucoup perdent des habitants**. Les différences entre départements montrent des spécificités : la Nièvre et l'Yonne sont parmi les départements les moins urbanisés de la métropole, et la Côte-d'Or a un taux médian.

Le phénomène d'urbanisation de la population a régressé depuis 10 ans, contrairement à ce qu'on observe sur l'ensemble du territoire national : + 2 % pour la France et - 1,4 % pour la Bourgogne. La croissance démographique est faible et la périurbanisation, c'est-à-dire le desserrement de la population des villes centre, bénéficie aux petites communes rurales proches et peu aux zones urbanisées périphériques.

La superficie de l'espace urbain* bourguignon s'est restreinte entre 1999 et 2010, passant de 2 895 km² à 2 830 km² soit une baisse de 2 % alors que dans le même temps la superficie de l'espace urbain français augmentait de 19 %.

* Superficie des communes de plus de 2 000 habitants.

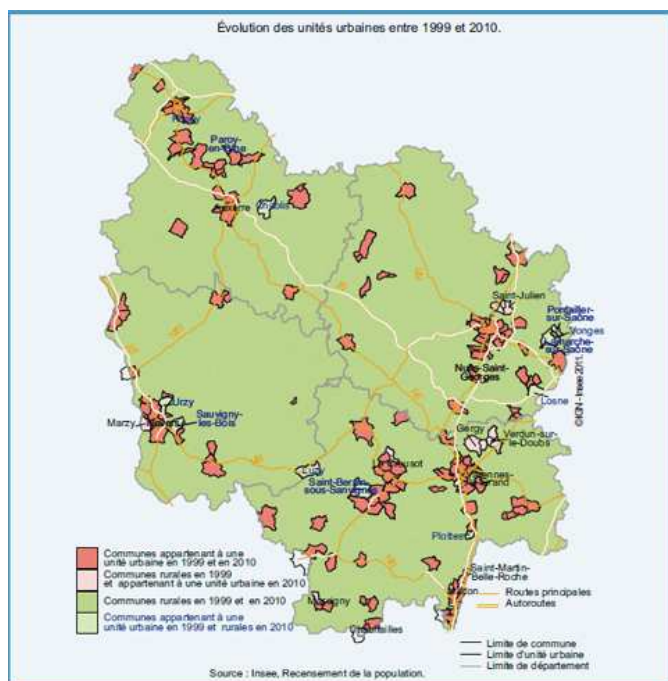


Figure 32 : unités urbaines en Bourgogne et leur évolution (1999 – 2010)

Source : Insee, Recensement de la population.

http://www.insee.fr/fr/themes/document.asp?reg_id=22&ref_id=17823

b) Support d'activités humaines : les sols anthropisés

Support de vie mais aussi support d'activités humaines, les sols portent nos cités (*Figure 32*). En ville, les sols sont utilisés avant tout comme **support de bâti ou d'infrastructure et servent de matériaux**, qu'ils s'agissent des sols urbains, suburbains ou que ce soit pour les voiries. La qualité pour ces sols à destination d'ouvrages est déterminée par leur comportement géomécanique. Ce critère est analysé par les limites d'Atterberg : portance, friabilité, plasticité (cf. p 13).

Fortement remaniés, les sols urbains sont recomposés avec l'importation et l'exportation de terres et de matériaux. Ce sont des sols réamalgamés, hétérogènes. On peut toutefois distinguer plusieurs types de recomposition, avec des degrés de changement plus ou moins fort :

- **Les sols hétérogènes, composés de matériaux exogènes** : ils diffèrent fortement des sols agricoles ou forestiers. Lors des travaux de construction, la terre extraite est exportée, compactée, et de nouveaux matériaux sont apportés. Les sols sont recomposés, les mélanges en place ne permettent plus d'identifier un type de sol. On parle de matériaux technogéniques, ou encore de technosols.
- **Les sols scellés** pour la construction et les infrastructures : Le revêtement des chaussées, des parkings, les bâtis scellent le sol, l'imperméabilisent. Lors de ces opérations, le sol est compacté pour une meilleure portance et des granulats sont apportés pour stabiliser les constructions. L'eau et l'air ne s'y infiltrent plus, la vie biologique est détruite.
- **Les sols « naturels » des espaces verts et des jardins** : assez peu remaniés, ces sols sont proches des sols agricoles voisins. Toutefois, ils bénéficient souvent d'apport de terre de provenance variée (compost, terre végétale, terreau...).

*Les sols anthropisés sont fortement marqués par les activités de l'homme. Parmi ces sols, les sols urbains sont ceux qui sont les plus artificialisés. Les sols sont à la fois support et matériaux. Ils sont constitués de **matériaux très divers** (matériaux d'origine industrielle ou domestique, débris de constructions plus anciennes...). Ce sont des*

Sols urbains et périurbains, ils se définissent par leurs usages [extrait du dossier INRA « Le sol » - 2009]

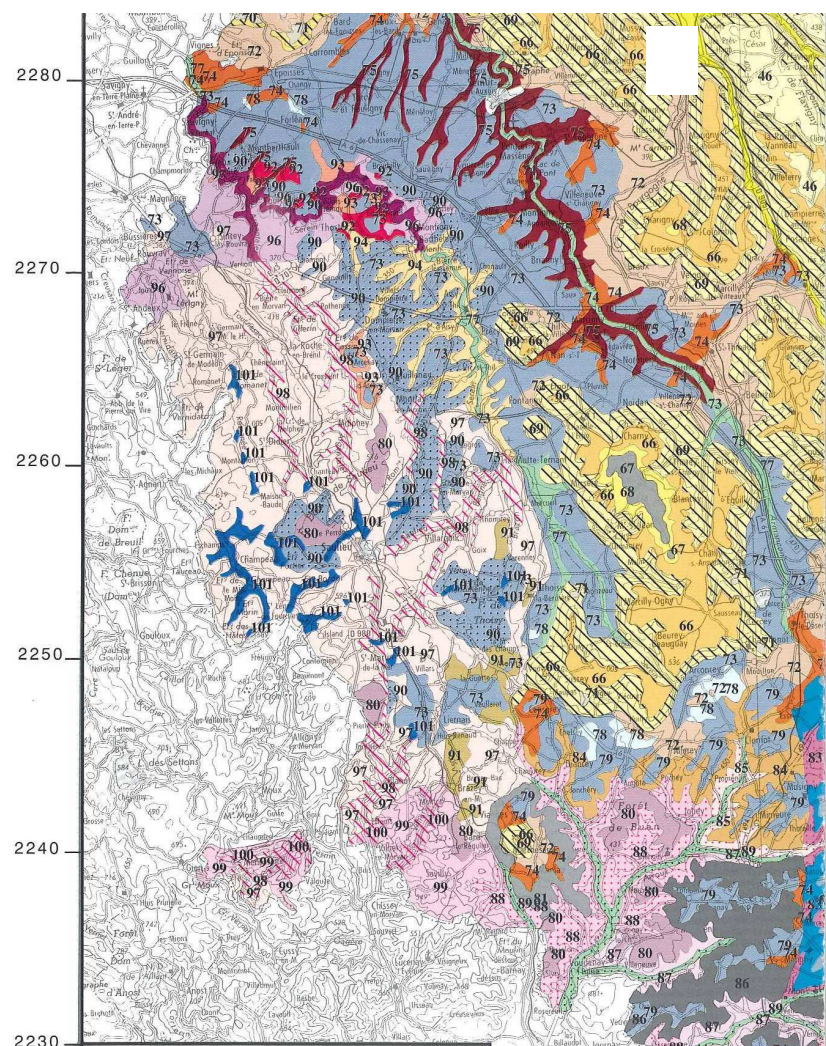
*« Les sols urbains étaient encore il y a 20 ans ignorés par les sciences du sol et parfois **qualifiés de non-sols**. Ils font aujourd'hui l'objet d'un intérêt croissant. [...] Dans les zones urbanisées, les sols représentent un enjeu essentiel et **changent très rapidement d'affectation et d'utilisation**. Les sols urbains font ainsi l'objet d'usages diversifiés incluant les activités humaines et industrielles, la forêt (espaces verts) et l'agriculture (jardinage, agriculture périurbaine). »*

Le passé de nos sociétés laisse ses empreintes : anciennes voiries ou anciennes constructions, implantations d'usines et pollutions anciennes. Les humains et leurs activités génèrent des quantités considérables de débris et de déchets organiques et inorganiques, d'origines domestique et industrielle, qui sont souvent accumulés dans les sols des sites d'enfouissement à la périphérie des villes.

De façon générale, les activités de l'homme marquent les sols : déforestation, feux (écobuage), surpâturage, viticulture du passé, ou encore décharges anciennes... Le terme de **sols anthropisés** est utilisée pour évoquer ces sols particulièrement affectés par les actions passées de l'homme. De plus, les sols anthropisés contiennent souvent des teneurs en polluants minéraux et organiques pouvant affecter le fonctionnement des écosystèmes. A l'extrême, ils peuvent devenir des sites pollués (cf. p 33).

sols réamalgamés, hétérogènes. En milieu urbain, une partie des sols sont scellés et ne peuvent plus être considérés comme milieu vivant. Leurs propriétés sont réduites à des caractéristiques mécaniques. Il existe aussi des sols proches du naturel, ceux des espaces verts, des jardins.

Figure 33 : Extrait de la carte des pédopaysages, secteur sud-ouest Bourgogne (1/250 000^e.)



UC = unités cartographiques (cf. p. 32)

IV - LE MORVAN ET SES MARGES :

A - CONTACT AUXOIS-MORVAN :

-  UC 90 : Sols des "limons" de l'Auxois contaminés par des sables et graviers granitiques.
-  UC 91 : Sols limono-argileux hydromorphes sur placages résiduels marno-calcaires hettangiens.
-  UC 92 : Terres "rouges" sur lumachelle ferrugineuse hettangienne.
-  UC 93 : Sols argilo-caillouteux localement à blocs sur lumachelle silicifiée hettangienne.
-  UC 94 : Sols sablo-graveleux acides des pentes granitiques de la vallée du Serein et ses vallons adjacents.
-  UC 95 : Complexe de sols des fortes pentes boisées sur roches métamorphiques et alluvions de la vallée du Serein.

B - MASSIF DU BAS MORVAN :

-  UC 96 : Sols sablo-argileux, graveleux des collines de roches métamorphiques.
-  UC 97 : Sols sablo-graveleux acides des collines granitiques.
-  UC 98 : Complexe de sols acides des pentes boisées sur roches granitiques et alluvions des vallées.
-  UC 99 : Sols caillouteux-graveleux acides des collines de roches volcaniques.
-  UC 100 : Sols caillouteux-graveleux acides humifères des fortes pentes boisées sur roches volcaniques.
-  UC 101 : Sols des vallées et bas-fonds humides et tourbeux.

c) Les sols, archives de la Terre

Le modelé des paysages et de ses sols révèle **l'histoire de la Terre** sur plusieurs échelles de temps, de la centaine de millions d'années pour certains, du demi-million pour d'autres, à quelques dizaines ou même quelques millénaires seulement dans de nombreux cas.

Certains sols gardent **la mémoire des événements naturels ou anthropiques** qui se sont inscrits dans le temps et dans l'espace (*Figure 33*). L'histoire géologique des sols, la pédogenèse, explique le lien entre les événements naturels du passé et la composition des sols (cf. p. 11).

Les utilisations récentes peuvent s'imprimer dans les sols pendant quelques années. On peut ainsi

retrouver dans les sols argileux, par changement de couleur, les labours anciens qui se pratiquaient au-delà des 30 cm d'aujourd'hui.

Les traces des activités humaines passées se retrouvent aussi dans le paysage rural. Les observations vues du ciel détectent dans les champs les traces des voies romaines et les contours de parcellaires datant du Moyen Age ou même de l'époque gallo-romaine. Les témoins les plus anciens sont étudiés en archéologie préhistorique ou en paléobotanique. Plus les témoins sont proches de nous, plus ils sont nombreux et mieux conservés. Les sols sont les archives de la Terre, des archives d'autant plus riches que les marques viennent d'un passé récent.

Les pédopaysages

Un pédopaysage est une portion de la couverture pédologique ou unité cartographique (UC) qui regroupe plusieurs unités de type de sol (UTS). Chacun de ces types de sol est décrit par son contexte géologique (nature et profondeur d'apparition des matériaux géologiques), topographique (location topographique, orientation et déclivité des pentes), et les caractéristiques pédologiques globales (nombre de strates, profondeur du sol, texture dominante, pierrosité, degré d'hydromorphie).

Les informations sont disponibles dans la base de données du programme national Inventaire, gestion et conservation des sols (IGCS ; IGCS – Sols et Territoires de Bourgogne). 450 unités pédopaysagères ont été référencées en Bourgogne. Une unité pédopaysagère contient entre 1 et 10 types de sol. Un nombre de 3 à 5 est très fréquent.

Paysage : définition

« Le paysage est à l'interface de l'épiderme terrestre et de l'atmosphère. Forme visible du contact entre la biosphère, la lithosphère et l'hydrosphère, le paysage est caractérisé par une végétation naturelle plus ou moins dégradée, par une utilisation et une occupation humaine du sol dans un cadre géomorphologique donné ». (M. Bruneau)

Les sols, supports de la vie terrestre, gardent les traces du passé. Ils sont d'ailleurs utilisés pour dater les événements qui marquent notre histoire et celle de la Terre. Plus ce passé est proche, plus les sols sont marqués par cette vie, que ce soit les traces des cultures, des végétations anciennes ou des restes d'activités humaines.

Occupé par la végétation, le type de couverture reflète bien souvent les caractéristiques intrinsèques des sols : les fonctions nutritive et biologique sont intimement liées à la fonction de support.

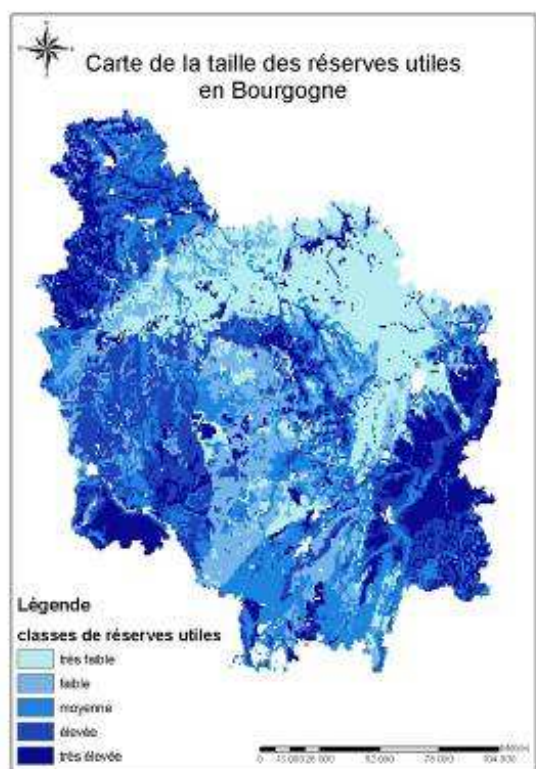


Figure 34 : Réserves utiles moyennes des sols de Bourgogne

La réserve utile (RU), un bon indicateur de qualité agronomique...

La RU représente la quantité d'eau, disponible pour la plante, qu'un sol peut retenir.

Le remplissage de cette RU est le résultat d'une équation entre les entrées (précipitations) et les sorties (évaporation, infiltration et ruissellement).

La carte de la taille des réserves utiles présente des valeurs contrastées, imputables en grande partie à la profondeur des sols. La corrélation avec la géologie est évidente : les petites RU sont essentiellement localisées sur les plateaux calcaires de l'Yonne et de la Côte-d'Or, les RU petites à moyennes sont situées dans le massif cristallin du Morvan et à l'ouest de la Saône-et-Loire, les RU plus grandes apparaissent au niveau des formations sédimentaires argileuses et marneuses et des dépôts limoneux (départements de l'Yonne, de la Nièvre et secteur de la Bresse). Les zones de faible RU sont les zones qui seront sensibles aux phénomènes de sécheresse.

...mais elle varie fortement

L'hétérogénéité des sols est forte. Les moyennes cachent des écarts locaux importants. La carte des écarts-types permet de visualiser les territoires qui ont de très fortes hétérogénéités de RU.

Peu de secteurs offrent une classe de RU dominante : les sols à RU < 50 mm sont concentrés sur le nord-est de la Côte-d'Or et les sols à RU > 150 mm sont en marge de la région et représentent peu de surfaces. L'hétérogénéité est figurée dans la rubrique « autre ». Cette catégorie est de loin la plus importante en termes de surface

Limites : représentation des 5 classes au sein des UCS

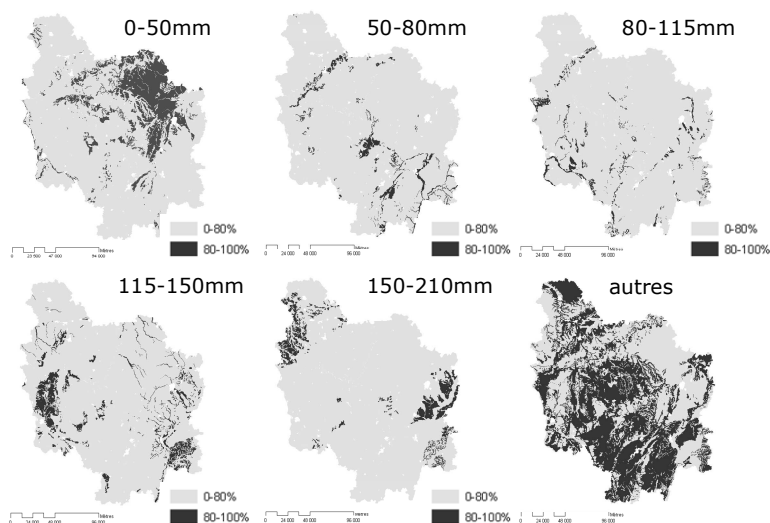


Figure 35 : Carte des RU de Bourgogne : importance des classes par secteur géographique (source AgroSup)

3.2 Les fonctions économiques : les sols, ressource et outil de production

a) Production de biomasse végétale : rôle nutritif des sols et notion de fertilité

Sur les sols poussent les plantes et les arbres, à l'origine de filières économiques. **Les sols en sont un des outils de production.** La production végétale est alimentaire ou non alimentaire : production de fibres (chanvre, lin), de médicaments (pavot, onagre...), de solvants organiques (ricin) ou encore de biomasse à destination énergétique (paille). Les forêts ont aussi une production très diversifiée. Le bois est utilisé comme matériau ou comme combustible. Les plantes de sous-bois peuvent donner lieu à une économie de cueillette alimentaire (baies, champignons...), médicinale ou cosmétique (lichens).

Selon les sols, les récoltes ont des potentiels plus ou moins bons. Les agriculteurs parlent de la fertilité des terres ou de la qualité agronomique des sols pour évoquer la capacité intrinsèque des sols à alimenter les cultures et à leur fournir des conditions favorables de croissance. La fertilité est déterminée par la capacité du sol à avoir une solution riche en éléments nutritifs, qui dépend de plusieurs caractéristiques :

- **la capacité de stockage ou réserve utile (RU)** : elle est déterminée par le volume de terre et la teneur en argile (Figure 34). Celle-ci varie fortement du fait de l'hétérogénéité des sols (Figure 35) ;
- leur richesse en agrégats argilo-humiques, qui dépend de **la teneur en matière organique** du sol et de l'activité des microorganismes ;
- **la structure du sol**, notamment de l'équilibre terre fine / eau / air : elle détermine la profondeur exploitable par les racines, leur libre circulation ainsi que celle de la solution du sol.

Les sols étant en perpétuelle évolution, la fertilité n'est pas un acquis définitif. De plus, les pratiques culturales anciennes et actuelles interfèrent sur la fertilité naturelle en l'améliorant, en la maintenant ou au contraire en l'érodant. Dans les pratiques dites « intensives », l'alimentation des plantes et leur contrôle sanitaire sont gérés chimiquement par les apports extérieurs. Les règles de vie propres aux sols n'interviennent que très peu dans les décisions de l'agriculteur : le sol est considéré avant tout comme un support ayant une capacité de stockage plus ou moins grande. D'autres pratiques, comme l'agriculture biologique, respectent et intègrent davantage les principes de fonctionnement des sols pour les utiliser au mieux.

La fonction de production (Figure 36) peut être optimisée par quelques règles dans les pratiques agricoles :

- **Equilibrer le bilan entrée / sortie** : les apports sur les cultures (matière organique des résidus de récolte, apports de fertilisants) doivent compenser sans excès les exportations par les récoltes ;
- **Maintenir le taux de matière organique** pour alimenter le mécanisme d'humification : restitution des pailles, apports de fumier... ;
- **Respecter la biodiversité des sols** et favoriser l'activité des microorganismes : matière organique, emploi modéré ou suppression de pesticides, rotation des cultures... ;
- **Préserver la bonne structure** des sols en évitant notamment les phénomènes de compaction par les passages d'outils ou de semelle de labour.

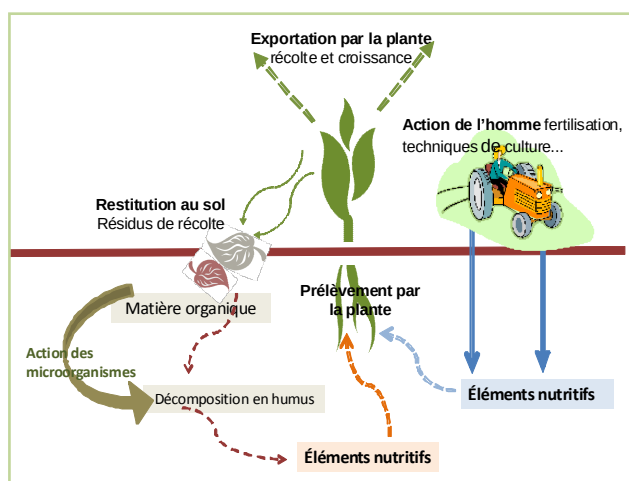


Figure 36 : Fonction de production végétale, cycle des éléments nutritifs

Les sols sont le réservoir des éléments nutritifs dans lequel puisent les plantes pour croître et produire. La **capacité des sols à mettre à disposition ces éléments nutritifs varie selon les types de sols mais aussi selon les pratiques agricoles.** Quelques règles de base permettent d'utiliser au mieux les fonctions naturelles des sols : préserver la structure et la vie biologique des sols et équilibrer les apports de fertilisants en fonction des exportations des plantes.

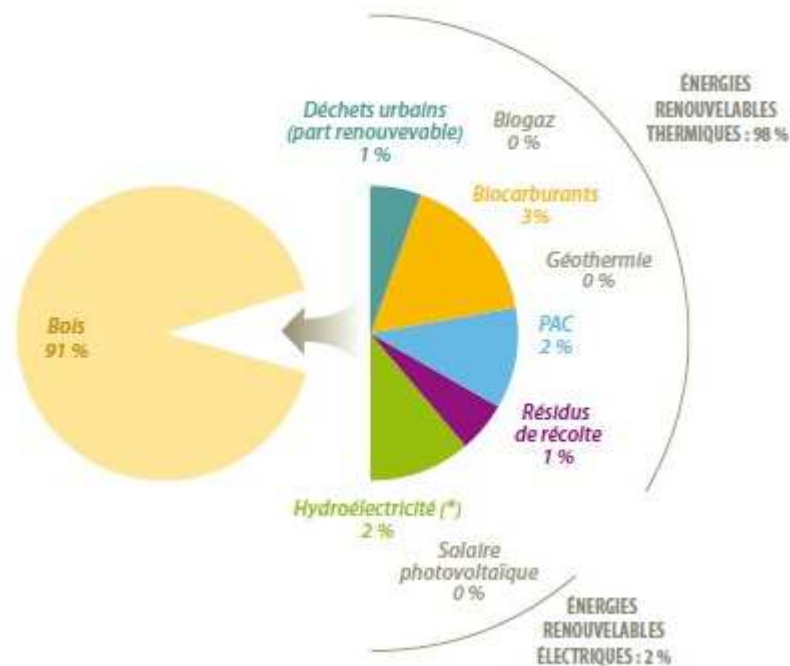
Les énergies renouvelables

représentent 8,6 % de l'approvisionnement énergétique de la Bourgogne en 2005. La production d'énergies renouvelables a augmenté lentement entre 2001 et 2005, de l'ordre de 6 %, puis depuis 2006, on observe une accélération sur l'ensemble des énergies renouvelables.

La part la plus importante est de loin celle du bois. Les autres productions de biomasse à usage énergétique (biocarburants et résidus de récolte) ne représentent que 9 % du « bouquet » des énergies renouvelables.

(Source : Alterre)

APPROVISIONNEMENT EN ÉNERGIES RENOUVELABLES : 427 MILLIERS DE TONNES-ÉQUIVALENT-PÉTROLE EN 2005



(*) il s'agit de la production bourguignonne d'hydroélectricité

Figure 37 : Part relative de chaque forme d'énergie renouvelable en Bourgogne (Extrait du Tableau de bord de l'environnement, Alterre Bourgogne, 2009)

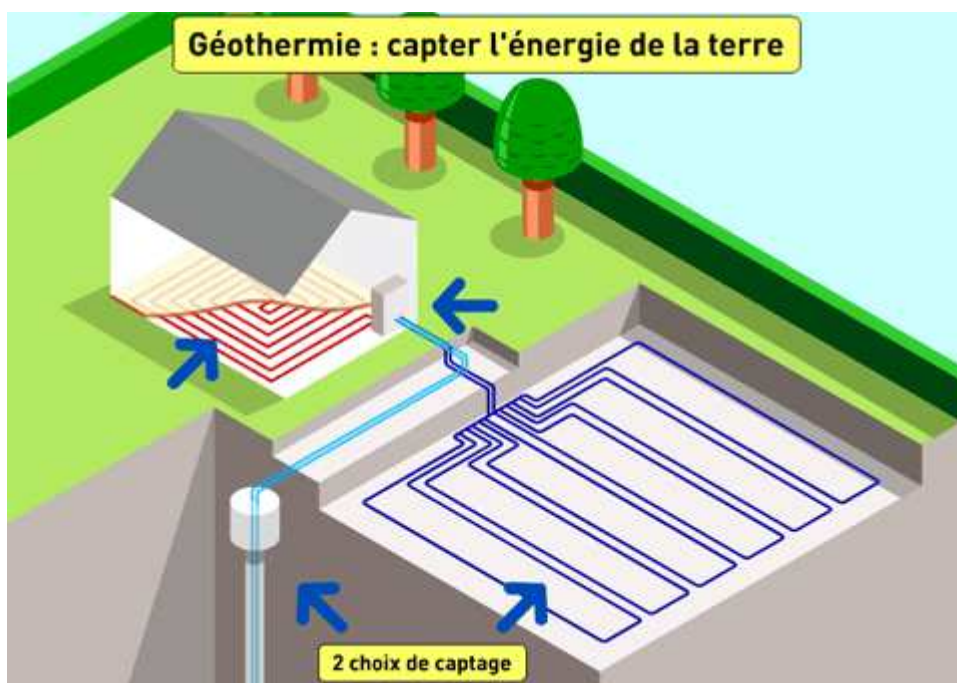


Figure 38 : Schéma d'une installation de chauffage géothermique

b) Production d'énergies renouvelables : biomasse énergétique et géothermie

Depuis la hausse du prix du pétrole des années 2000 et la prise de conscience du changement climatique, on redécouvre l'intérêt de la biomasse végétale pour produire de l'énergie renouvelable, du combustible ou du carburant. Celles-ci ne représentent encore qu'une faible part de l'approvisionnement (*Figure 37*).

- La plupart **des cultures alimentaires** peuvent avoir un usage énergétique pour le carburant : les récoltes de blé, de maïs ou de racines de betterave fournissent de l'éthanol, celles du colza ou du tournesol du diester pour le gasoil. Ethanol, huiles ou diester : leur destination est le carburant pour moteurs.
- **La biomasse** est également une source d'énergie thermique directement par combustion ou indirectement par méthanisation (switchgrass, miscanthus, paille, robinier à rotation courte, bois...).

- Le sol est lui-même une source d'énergie thermique, **la géothermie** : en-dessous de 4,5 m, le sol est à température constante : 12°C. Plus profondément, elle augmente en fonction de l'activité de la croûte terrestre. Des installations de réseaux contenant de l'eau ou autres fluides véhiculent cette énergie thermique aux bâtiments, permettant ainsi de réaliser des économies de chauffage (*Figure 38*). Ces installations sont souvent conçues de façon réversible, pour faire office de climatisation en été.

La géothermie, une source d'énergie à redécouvrir

La **géothermie** consiste à exploiter la chaleur naturellement présente dans le sous-sol ou les nappes d'eau souterraines. La température moyenne des nappes de faible profondeur (< 100 m) est en France de l'ordre de 10 à 14 °C. Elle augmente en moyenne de 3 °C tous les 100 m au fur et à mesure que l'on s'enfonce dans le sous-sol. Il faut distinguer :

- **La géothermie très basse énergie** qui exploite une ressource d'une température inférieure à 30 °C. Elle nécessite le recours à des pompes à chaleur qui prélèvent cette énergie pour l'augmenter à une température suffisante, pour le chauffage d'habitations par exemple. Ces pompes à chaleur fonctionnent à l'électricité : pour 1 kWh consommé, elles restituent de l'ordre de 4 kWh d'énergie, le différentiel provenant de l'énergie puisée dans le milieu naturel.
- **La géothermie basse et haute énergie** qui exploite des ressources d'une température entre 30 et 90 °C dans le premier cas et supérieure à 150 °C dans le second cas. Elle permet d'utiliser directement la chaleur par simple échange.

*Que la biomasse soit destinée à devenir **un carburant ou un combustible**, le type et la quantité d'énergie produite dépendront du type de cultures, des pratiques culturales et des modes opératoires pour produire l'énergie. La contribution des sols est la même que pour toute production végétale : la fertilité du sol.*

***La production de géothermie** est basée sur les caractéristiques thermiques des sols. La température devient constante à 12°C, à moyenne profondeur, puis elle augmente avec la profondeur. La conduction des sols, donc la structure physique, conditionne le rendement thermique de l'extraction de chaleur.*

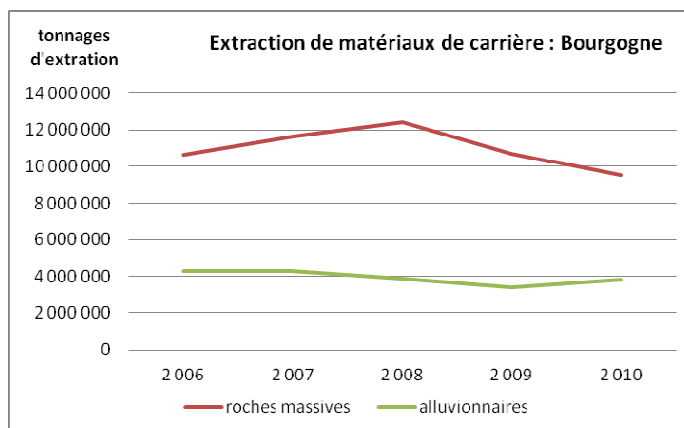
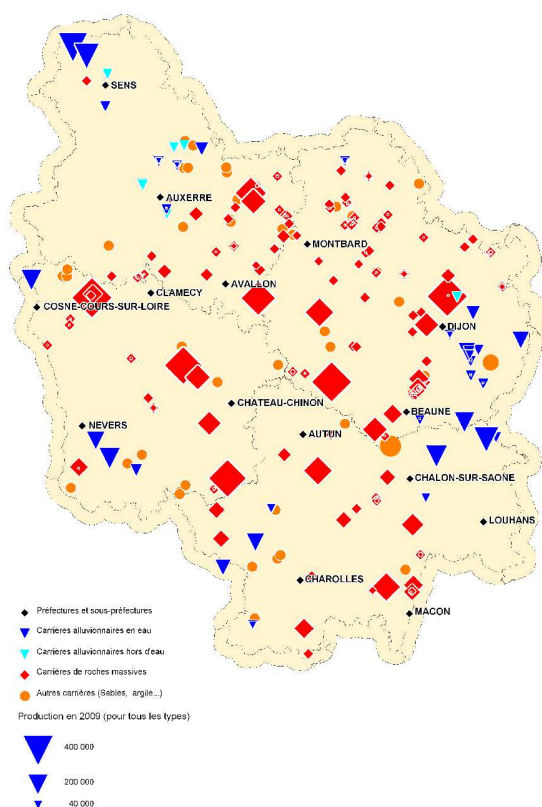


Figure 39 : Localisation des carrières selon l'importance des tonnages extraits
 (source : DREAL, données 2009)

Une ressource en matériaux en sous-sol : les extractions pour carrières de roches meubles et dures (Source : profil environnemental, DREAL 2011)

Les ressources géologiques de la Bourgogne, étendues et variées, sont constituées de roches calcaires et éruptives et de dépôts alluvionnaires. Elles font l'objet d'une exploitation principalement pour la production de granulats mais aussi de roches ornementales par les 220 carrières en activités (données 2010). Les matériaux extraits sont composés à 71 % de roche massive, principalement calcaire en Côte d'Or et l'Yonne, éruptive dans la Nièvre et la Saône-et-Loire et pour 29 % d'alluvionnaires. L'extraction de matériaux, notamment alluvionnaires, exerce des pressions assez fortes sur des milieux souvent fragiles (zones humides pour l'alluvionnaire, pelouses calcaires pour la roche massive calcaire). Une alternative à ces prélèvements est l'utilisation de matériaux recyclés, tels que les déchets inertes du BTP. Le gisement est important mais encore peu exploité.

c) Les sols, une ressource en tant que matériaux de construction

La terre est probablement un des matériaux les plus anciens utilisés pour la **construction des habitations**. Elle a été longtemps utilisée crue, mélangée ou non à de la paille. On estime que 40 % de l'humanité habite des constructions en terre crue (*source : UNCHS*). 17 % des monuments inscrits au patrimoine mondial de l'humanité sont en terre crue. Les plus anciennes traces remonteraient à 10 000 ans, l'utilisation de briques de terre cuite serait apparue 3 000 ans plus tard. Fabrication et utilisation sont des activités de proximité. L'avantage de la technique de la terre crue sur celle de la terre cuite est de ne nécessiter que très peu d'énergie.

Certains **granulats destinés à la fabrication d'ouvrages de travaux publics ou de génie civil** sont des roches meubles extraites de dépôts alluvionnaires (*Figure 39*). Parfois en mélange avec des limons et des argiles, leur extraction nécessite une phase de séparation. Les graviers sont prélevés dans la couche altérée de la roche, à l'interface sol-substrat. L'exploitation des gravières est soumise à un schéma directeur des carrières et est encadrée par une réglementation prévoyant la remise en état du site après extraction.

Un autre type de sol peut devenir une ressource de matériaux, les sols artificiels. Ils résultent de l'activité humaine et génèrent des matériaux variés : sols grossiers, sols fins non saturés remaniés, des matériaux appelés « tout venant », ou encore des matériaux à recycler. Pour des raisons économiques, ils sont de plus en plus utilisés dans les ouvrages géotechniques. Leur comportement mécanique complexe est difficile à caractériser compte tenu de leur nature composite et très fortement hétérogène.

Terre crue ou terre cuite : un matériau composite qui s'apparente aux bétons

La qualité du sol qui sera utilisé à la fabrication des briques de terre, crues ou cuites est déterminée selon la plasticité (donnée par le test d'Atterberg). En présence de très peu d'eau, la terre peut être compactée pour donner le pisé. Plus hydratée, le matériau devient plastique et malléable et se moule en briques dans des coffrages. Un stade plus visqueux en fait un enduit ou un mortier pour lier les briques entre elles. A un stade liquide, la terre se mélange à la paille ou aux copeaux de bois et donne un matériau plus composite. Quelle que soit sa forme, cuite, crue ou composite, la terre, en tant que matériau de construction, a une structure semblable à celle des bétons : les éléments minéraux grossiers, cailloux, graviers, sable, en constituent l'ossature granulaire et les argiles et l'eau le liant appelé aussi matrice.

*Le sol est une ressource de matériaux pour les ouvrages, les habitats et de nombreuses constructions. **La terre fine**, notamment grâce à ses argiles, est un des matériaux les plus anciens pour la construction d'habitats. **Les éléments plus grossiers**, souvent les altérites qui se situent sous*

*les horizons de terre arable, sont utilisés dans les constructions et ouvrages. Aujourd'hui, on tente de plus en plus d'utiliser les matériaux des **sols anthropisés**. Disparates et fortement hétérogènes, ces sols sont difficiles à caractériser et à utiliser au mieux.*

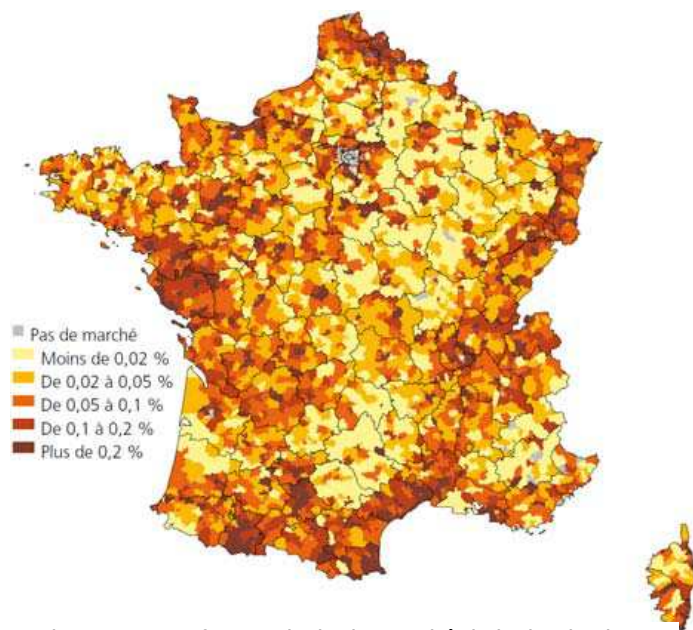


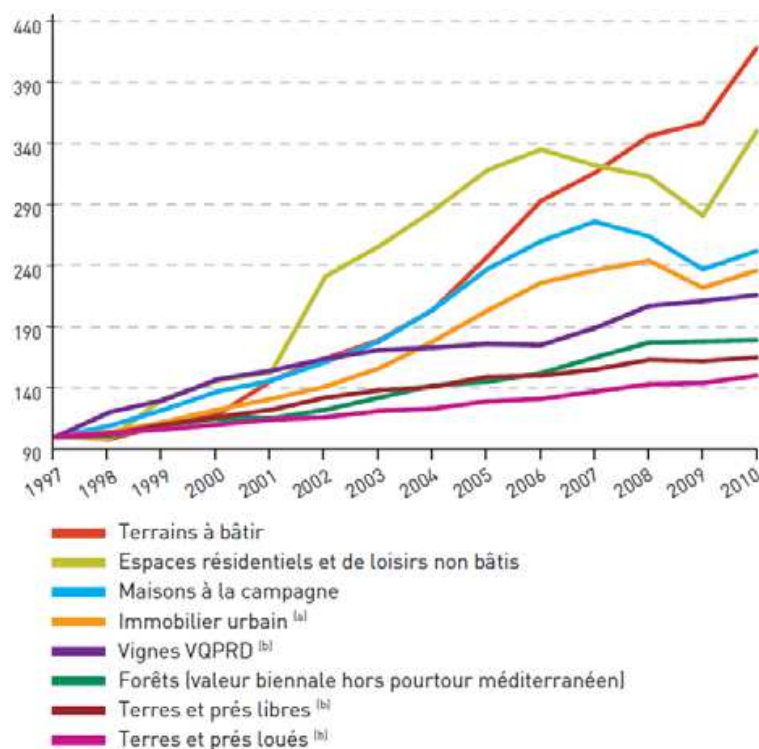
Figure 40 : Surface agricole du marché de l'urbanisation rapportée à la surface agricole en 2008-2010

L'urbanisation des terres agricoles :

Contrairement aux régions marquées par une forte évolution des agglomérations (Rhône Alpes, Pays de Loire, Midi Pyrénées), la Bourgogne est assez peu affectée par la conversion de terres agricoles en terres urbanisées. Sur sa façade ouest, le devenir des terres agricoles en surface urbanisable a été marqué par les projets d'emprise autoroutière qui se sont accompagnés de zones d'activités et de logistique. A l'est de la Bourgogne, le pôle urbain de Dijon et l'attraction de la zone lyonnaise influencent le marché des terres agricoles.

Moyenne nationale 2008-2010 : 0,078 %/an (23 600 ha) Evolution : - 0,007 %/an (- 2 200 ha)
Source : Terres d'Europe-Scafr d'après Safer

Base 100 en 1997



Source : Terres d'Europe-Scafr d'après Safer et (a) Maisons anciennes d'après la série INSEE-Notaires ; (b) Safer-SSP-Terres d'Europe-Scafr-INRA

Le marché foncier français (source fnsafer)

Le marché des terrains à bâtir de moins de 1 ha acquis par des particuliers est le plus dynamique : sa hausse est ininterrompue depuis 1997. Les marchés ruraux sont influencés par les dynamiques urbaines. Ils ont entamé un retournement de prix depuis 2007, tout comme le prix des espaces résidentiels et de loisirs. Le marché des maisons de campagne suit l'évolution de celui de l'immobilier urbain : la crise de 2008 pèse sur ces marchés.

Les marchés des forêts, des terres et des prés évoluent régulièrement. Ils sont proportionnellement moins affectés par les mouvements spéculatifs.

Figure 41 : Evolution des prix moyens par sous-marché foncier entre 1997 et 2010

d) Les sols, un outil de production qui a un prix

Comme tout autre outil de production, la terre, ou plus exactement la surface au sol, fait l'objet de transactions financières. L'acquisition est un préalable également pour bâtir sa maison, construire des logements collectifs ou des voiries.

Le suivi des échanges sur les marchés fonciers par la Fédération nationale des sociétés d'aménagement et d'établissement rural (FNSAFER) fait état d'une inflexion nette depuis treize ans. Entre 1997 et 2010, les prix des terres ont enregistré une importante augmentation : +66 % pour les terres vendues libres (non louées à un agriculteur par exemple).

Les prix varient en fonction de plusieurs critères (cf. Figure 41) :

- Les terres agricoles et les forêts sont considérées comme des **valeurs de placement** refuge et ce, dans une perspective de rendement sur le long terme.
- Les terres vendues libres sont plus chères que celles vendues louées.
- **L'orientation agricole** du secteur géographique (élevage ou grandes cultures) influe : dans une commune à dominante élevage viande, les tarifs des terres peuvent être de 10 % inférieurs à ceux pratiqués dans une commune spécialisée en céréales.
- Comme tout marché, le marché des terres agricoles est marqué par la conjoncture économique. Le niveau des revenus des agriculteurs impacte la demande de transactions et le niveau des échanges de terres.
- Le marché reflète la priorité des Français pour le logement : **près d'une ville**, une parcelle est environ 8 % plus chère qu'en milieu rural profond (cf. Figure 40).
- Les terres boisées en forêts ou plantées en vigne font l'objet d'un marché spécifique : les transactions de forêt sont marquées par la

recherche d'une diversification du patrimoine financier sur le long terme. **Les avantages fiscaux** ne sont pas étrangers à cet attrait de placements financiers.

Les acheteurs ont eux aussi évolué : les agriculteurs ne représentent plus que les deux tiers des acheteurs en 2010, contre les trois quarts en 1997. Particuliers et collectivités sont prêts à acheter les terrains plus chers que les agriculteurs et s'intéressent à des parcelles plus petites (Figure 41).

A l'échelle mondiale, l'évolution du marché des terres inquiète les ONG. Selon les estimations 2006 de l'IFPRI*, près de 20 millions d'hectares de terres agricoles ont fait l'objet de transactions impliquant des investisseurs étrangers. C'est l'équivalent de la surface agricole française. Les investissements étrangers peuvent, bien sûr, contribuer au développement des capacités productrices du pays par l'apport de techniques ou le financement d'infrastructures. Mais les craintes portent sur l'importance du phénomène. L'effet pourrait déstabiliser durablement les paysanneries locales et les marchés vivriers locaux. La FAO craint que ce nouveau marché foncier ne débouche sur une forme de « néocolonialisme ».

*International Food Policy Research Institute (IFPRI)

Le sol n'est pas une ressource extensible. Outil de production ou support pour les constructions individuelles ou collectives, il fait l'objet de transactions financières. Des différences de prix sont observées sur le marché foncier entre acquisition à destination agricole ou résidentielle. Ces différences sont d'autant plus nettes que les terres

sont à proximité d'une agglomération. A l'échelle mondiale, l'ampleur du phénomène d'acquisition de terres par des investisseurs étrangers pose la question du sol comme bien public mondial et du respect du droit à l'alimentation des populations.

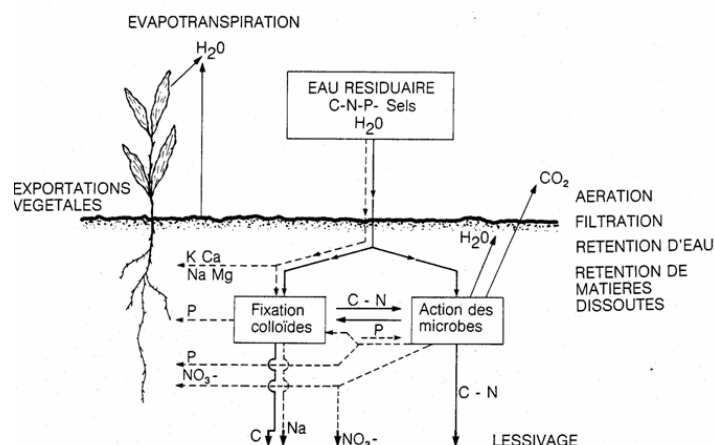


Figure 42 : les différents mécanismes d'épuration des sols^{iv}

Définitions

Filtration : c'est le phénomène qui permet de séparer l'eau des éléments solides qu'elle contient par son passage à travers un milieu poreux.

Epuration : c'est l'opération qui consiste à éliminer les substances jugées impures contenues dans l'eau. Les agrégats du sol retiennent certaines molécules à leur périphérie (*fixation colloïdale*). Les microorganismes (*action des microbes*) et les plantes (*exportation par les plantes*) interviennent pour absorber et désagréger les molécules (Figure 42). Mais ce phénomène reste sélectif et dépend du couple plante ou micro-organisme / polluant.

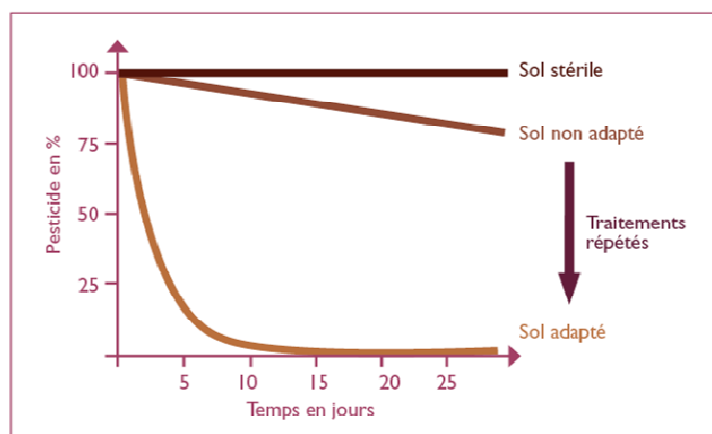


Figure 43 : dégradation des pesticides dans les sols - source : INRA / Université de Bourgogne (UMR Microbiologie du sol et de l'environnement)

Les « lits biologiques »

Le rôle épurateur du sol est utilisé dans le système de lagunage des boues d'épuration.

Une autre application a été mise au point pour le traitement des fonds de cuve de traitements phytosanitaires. Les traitements répétés d'un sol avec un même polluant, souvent un pesticide, peuvent conduire à sélectionner une microflore adaptée qui accélère la dégradation dudit pesticide. Ce procédé simple et peu coûteux a été mis au point par l'INRA. C'est un bac étanche comprenant un mélange de terre et de paille, riche en micro-organismes. La paille maintient une aération suffisante du substrat. La terre en mélange provient des parcelles cultivées car elle contient des populations microbiennes adaptées aux molécules utilisées. La vitesse de dégradation d'une molécule donnée est cependant très variable (Figure 43).

3.3 Les fonctions environnementales des sols

a) Fonction de filtration et d'épuration : rôle clé de la structure et des microorganismes

En passant dans le sol, les eaux « sales » se débarrassent d'une grande partie de leurs impuretés : le sol a un rôle d'épuration. La filtration conduit donc à un certain degré d'épuration des eaux chargées de matières (eaux résiduaires) ou de molécules indésirables (pesticides notamment).

Mais cette fonction de filtration et d'épuration a des limites dictées par les paramètres pédologiques du sol (porosité, taille du réservoir sol...), par les impuretés elles-mêmes (taille des résidus, molécules) et par des conditions externes (pluies, pente...) (Figure 42). Les principales caractéristiques d'un sol mises en jeu sont :

- **Sa texture et sa perméabilité** : le sol doit pouvoir laisser l'eau s'infiltrer, ni trop vite, ni trop lentement pour que les agrégats du sol retiennent les molécules. La perméabilité du sol est déterminée par son taux d'argile et sa porosité. Sont défavorables, les sols très argileux qui ont tendance à être imperméables, et à l'opposé, les sols très sableux qui sont trop perméables.
- **Sa capacité de stockage (RU)** : plus la capacité de rétention du sol est grande, plus le temps de passage de l'eau dans le filtre sera long, et donc la possibilité plus forte de retenir l'eau mais aussi les éléments.
- **Sa teneur en matière organique et l'activité des microorganismes** : la matière organique interfère chimiquement avec les substances, et les microorganismes contribuent à leur biodégradation. Ce rôle est important.
- **L'hydromorphie** : l'engorgement d'un sol par l'eau réduit sa capacité d'oxydation et donc son potentiel épurateur. La dégradation de la matière organique est limitée, elle jouera un

rôle moins actif dans l'adsorption des molécules.

Les études menées actuellement sur la capacité épuratoire des sols vis-à-vis des pesticides rend compte de la complexité des mécanismes en jeu :

- **La rétention** : Les composants du sol retiennent les molécules non ionisées sur une durée plus ou moins longue, éventuellement définitive.
- **La restitution ou relargage** : C'est un phénomène plus lent que celui de la rétention et mal connu. Il résulte probablement de l'interférence des propriétés physico-chimiques des pesticides et des composantes du sol (adsorption sur le complexe argilo-humique, température, humidité).
- **La biodégradation** des molécules dans le sol est un facteur de dépollution majeur. En effet, la microflore du sol présente une capacité naturelle à dégrader des pesticides (Figure 43) soit en les transformant partiellement (métabolites), soit en les minéralisant (transformation en composés simples). La biodégradation est fonction de la microflore, de la stabilité chimique de la molécule de pesticide, de la température et de l'humidité du sol.

Les sols ont un effet bénéfique de dépollution. Ils filtrent les eaux « sales » et retiennent tout ou partie des éléments solides ou dissous (matières résiduaires, pesticides, polluants organiques ou minéraux...). Ils participent à la dégradation active de certains polluants via les micro-organismes. L'épuration est conditionnée par la

perméabilité du sol, le volume de son réservoir (RU) et l'activité biologique. Mais les mécanismes de biodégradation ne sont pas systématiques. Les polluants peuvent être stockés puis relâchés dans le milieu, selon des mécanismes encore peu compris.

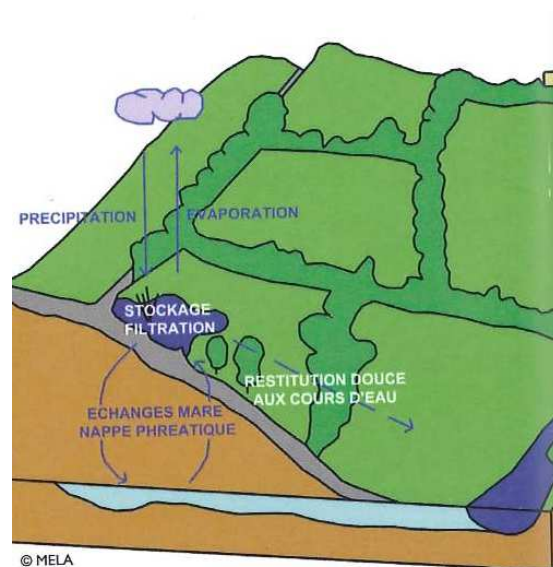


Figure 44 : schéma du fonctionnement d'une zone humide

Rôle de régulation hydrologique des sols

La loi sur l'eau de 1992 définit les zones humides comme des terrains, exploités ou non, habituellement inondés ou gorgés d'eau douce de façon permanente ou temporaire. La végétation, dominée par des plantes de type hygrophile, est adaptée à la submersion ou aux sols saturés d'eau pendant au moins une partie de l'année. Les zones humides regroupent de nombreux milieux différents : tourbières, mares, bords de rivières et ripysilves, roselières... Elles ne sont pas toutes d'origine naturelle et peuvent résulter de l'activité humaine comme les mares, les réhabilitations de gravières, les bassins d'orage aménagés... En Bourgogne, les zones humides sont estimées à 5 % du territoire bourguignon*. Elles font l'objet de plusieurs programmes de préservation ou d'inventaire (Natura 2000, ZNIEFF).

** Estimation de l'Institut français de l'environnement (IFEN)*

De par leurs capacités à se gorger d'eau, les zones humides sont de véritables éponges qui stockent les eaux pluviales ou de ruissellement. Elles les restituent ensuite lentement aux nappes phréatiques et aux rivières, souvent par filtration ou suintement.

Ce rôle est d'autant plus important que les surfaces imperméabilisées des villes et des routes accélèrent et concentrent les volumes d'eaux pluviales. Les plans d'eau (mares) sont des réservoirs de crues et des structures d'assainissement naturel.

b) Rôle de régulation et rôle tampon : importance de la structure et du volume de terre

Les sols sont une interface entre l'atmosphère et les milieux hydrologiques, tout comme la peau du corps humain est une interface entre l'air et le système sanguin. C'est un lien actif entre ces deux milieux. Le sol, avec ses vides, sa porosité, son complexe argilo-humique, **se comporte comme une éponge** vis-à-vis de l'eau. Il en va de même vis-à-vis des gaz, même si les mécanismes sont moins facilement observables et sont rendus complexes par le jeu des cycles (cf. p. 18).

Ainsi, lorsque de fortes pluies tombent sur un sol, des ruissellements apparaissent ou non selon que celui-ci est nu, enherbé ou artificialisé. L'absorption des pluies est meilleure sur sol couvert : la pénétration de l'eau est optimisée par la porosité qu'entretiennent les racines des plantes. Le sol joue là **un rôle de tampon**, il absorbe et atténue les chocs des pluies fortes. Il en est de même pour d'autres phénomènes : températures, sécheresses, apports de polluants...

En atténuant les chocs par sa capacité tampon, **le sol en régle les impacts**. Les effets sont « lissés » dans le temps : les berges enherbées d'une rivière (ou zone humide) permettent d'écarter les crues en stockant une partie des eaux ; puis, en cas d'étiage, elles restituent progressivement aux nappes phréatiques et aux rivières les eaux pluviales ou de ruissellement qu'elles ont emmagasinées (Figure 44).

Le sol est une interface active entre atmosphère et milieux hydrologiques. Son rôle de tampon et de régulation vis-à-vis de l'eau est bien connu ; les sols enherbés en bordure de rivière atténuent l'effet des fortes

On découvre aujourd'hui l'importance d'autres rôles de régulation pour la qualité de l'environnement, comme celui des gaz à effet de serre (cf. p. 63).

Le pouvoir de régulation d'un sol, notamment vis-à-vis de l'eau dépend de certaines de ses caractéristiques :

- Selon la taille du réservoir sol, c'est-à-dire sa réserve utile, le sol aura une capacité de stockage plus ou moins importante ;
- l'importance des éléments fins, la structure, la charge en éléments grossiers conditionnent la perméabilité du sol qui s'en trouve plus ou moins filtrant
- le type de couvert et notamment la colonisation racinaire contribue aussi à retenir l'eau.
- D'autres éléments de paysage interviennent également comme la pente ou la place relative des sols par rapport au réseau hydrologique (proximité de rivière, de talweg...).

Le pouvoir de régulation thermique est, quant à lui, lié à l'inertie thermique du matériau sol. Il est essentiellement lié au critère de conductance des minéraux et à la teneur en eau du sol.

pluies, stockent l'eau, puis la restitue progressivement. Bien que moins connu, le rôle de régulation vis-à-vis des gaz à effet de serre fait des sols un nouvel enjeu de préservation.

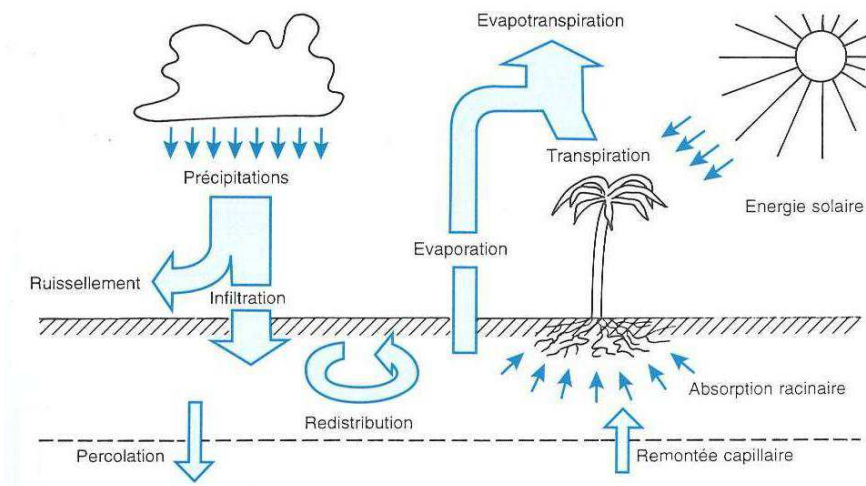


Figure 45 : Bilan hydrique : sol et cycle de l'eau

Source : « sol : interface fragile », P. Stengel, d'après A.Musy et M. Soutter

L'eau dans le sol : définition

Infiltration : l'eau en excès dans le sol s'évacue par drainage ou percolation pour rejoindre les nappes souterraines.

Ruissellement (ou écoulements de surface) : lorsque l'intensité des pluies dépasse la capacité d'infiltration du sol, l'eau en excès stagne à la surface du sol en l'absence de pente ou bien s'écoule dans le sens de la pente.

Évapotranspiration : c'est la somme de l'évaporation du sol et de la transpiration de la végétation.

Remontées capillaires : lorsque le sol se dessèche, l'eau contenue dans les microporosités du sol se diffuse et remonte vers les microporosités sèches.

Le sol dans le cycle de l'eau

Globalement, en Bourgogne, les précipitations moyennes sont comprises entre 700 et 1 000 mm par an, ce qui représente un volume d'eau annuel de 27 milliards de m³. On estime que 60 % font l'objet d'évapotranspiration. La quantité d'eau disponible pour chaque Bourguignon est de l'ordre de 6 600 m³ par an, soit 2,5 fois la moyenne française. Si la Bourgogne dispose d'un capital eau important sur son territoire, elle n'est toutefois pas la seule à en bénéficier puisque, située en tête de trois bassins, elle alimente les régions en aval.

4 Une interface de l'environnement qui fournit de véritables services

4.1 L'eau et les sols : deux milieux qui se rendent mutuellement service

a) Le rôle de l'eau dans le sol : importance de la solution du sol

Un sol sans eau est un désert minéral. L'eau intervient dans chacun des fonctionnements physique, chimique et biologique du sol :

- C'est un agent qui a un rôle dans la pédogenèse. L'eau a une action physique (fissuration puis éclatement des roches sous l'effet du gel/dégel, d'alternance sècheresse/humidité). C'est aussi un élément important de cohésion entre les particules minérales et organiques pour former les agrégats de la texture (cf. p. 13).
- L'eau intervient dans les réactions chimiques du sol (oxydoréduction...) en transportant les micro-organismes responsables des transformations chimiques dans le sol. C'est la base de la solution du sol (cf. p. 15). Les racines des plantes absorbent cette solution qui contient les éléments nutritifs.
- L'eau, nécessaire à l'alimentation de tout être vivant, participe à la vie de la faune et de la flore dans et sur le sol.

b) Le rôle du sol dans le cycle de l'eau : épuration et régulation hydrologique

Le sol est aussi un maillon du cycle de l'eau (Figure 45) :

- C'est un lieu de stockage et de réserve de l'eau (nappes phréatiques, réserve utile des sols...). A l'échelle mondiale, on considère qu'environ 60 % de l'eau douce est retenue dans les sols. Cette forme de stockage est aussi appelée eau « verte ». En Bourgogne, 80 % de notre alimentation en eau potable est d'origine souterraine.
 - Le sol constitue un système tampon au niveau du cycle hydrologique : il régule les cours d'eau, les fleuves. Les zones humides ont plusieurs fonctions, dont celle de régulation. En cas de crues, elles sont capables de stocker une partie des flux d'eau et de sédiments, diminuant ainsi les hauteurs de
- crue. En cas d'étiage, elles restituent progressivement aux nappes phréatiques et aux rivières les eaux pluviales ou de ruissellement qu'elles ont stockées.
- Enfin, son rôle d'épuration est important bien qu'encore mal compris (cf. p. 57). Les micro-organismes des sols sont des acteurs importants de la dégradation des polluants.

L'emplacement géographique des sols capables d'absorber de l'eau en excès est important : on redécouvre aujourd'hui l'intérêt des mares et des zones humides qui fournissent des services plus importants que leur surface pourrait le laisser croire. L'action de l'homme dans le maintien et l'entretien de ces zones peut être très positive.

L'eau est indispensable à la vie des sols comme à toute vie terrestre. Elle constitue le quart du volume d'un sol, transporte les éléments nutritifs et intervient dans la chimie du sol.

Situés à l'interface entre la vie biologique, les activités humaines et les réserves d'eaux superficielles ou

souterraines, les sols interviennent dans le cycle de l'eau. Ils jouent un rôle bénéfique de réservoir spongieux d'eau, régulent les crues et soutiennent les étiages des rivières. Ils retiennent et transforment les polluants organiques et minéraux ou les pesticides qui pourraient contaminer les eaux.

Stockage de carbone dans les sols bourguignons

Les 30 premiers centimètres des sols, correspondant classiquement à la profondeur de labour, est la partie la plus sujette aux transformations et aux échanges avec l'air. Le cycle du carbone y est le plus instable et des phénomènes de stockage-déstockage de CO₂ sont en jeu selon les pratiques culturales, l'affectation des sols, etc. L'INRA d'Orléans avait effectué des travaux pour le ministère de l'Ecologie en 2002 avec l'outil « Infosol », cartographie des sols et base de données d'analyses de sols, pour estimer le carbone stocké dans les sols en fonction de leur occupation. En Bourgogne, les sols forestiers, majoritairement du Morvan et du Châtillonnais, offrent une capacité de stockage en carbone non négligeable, près de 259 millions de tonnes.

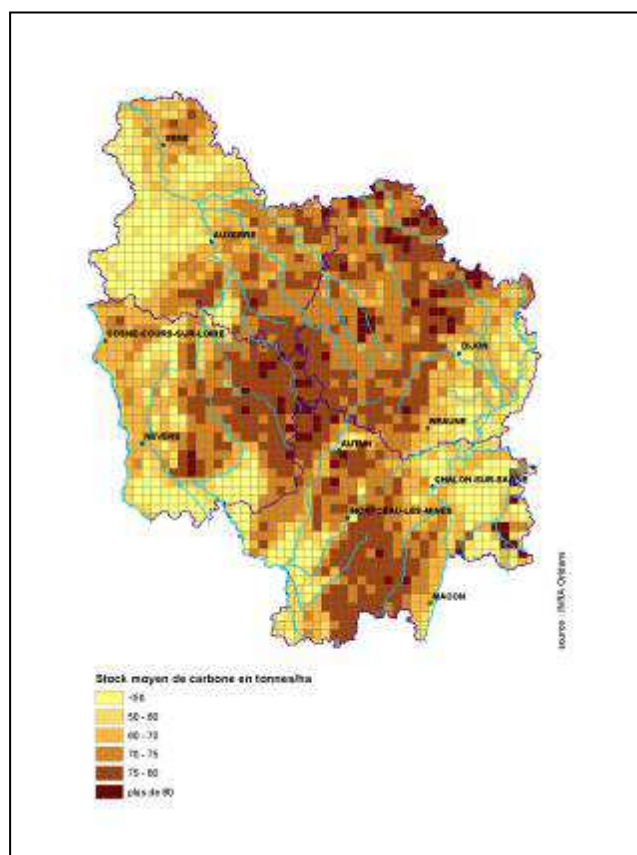


Figure 46 : Le stockage de carbone des sols bourguignons

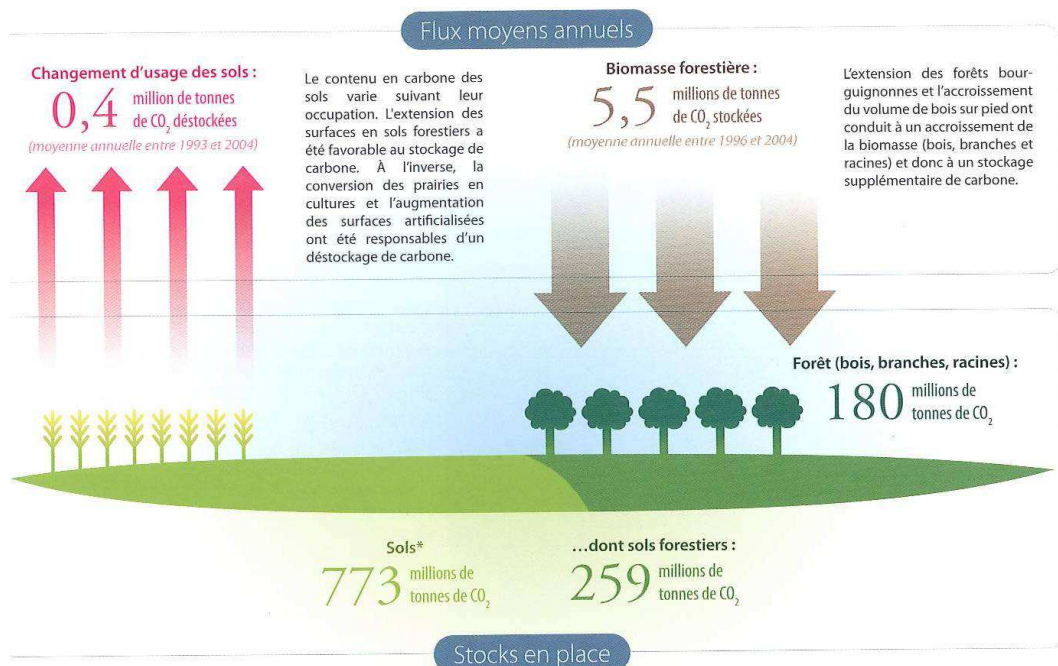
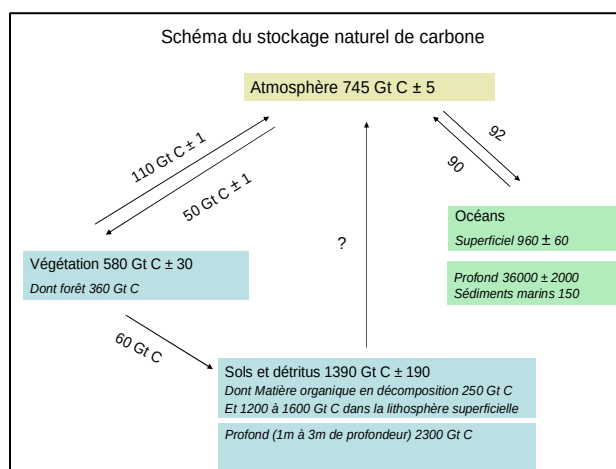


Figure 48 : bilan estimé des flux de GES des sols et des forêts en Bourgogne (Source : Alterre Bourgogne, L'empreinte climatique de la Bourgogne, Repères n°52, 2009)

4.2 Sols et climat : rôle dans l'atténuation des émissions de GES

Le rapport du GIEC de 2007 a mis en avant le rôle des sols dans la **séquestration du carbone**. Ils offriraient le plus fort potentiel de réduction des émissions du secteur agricole. La part des émissions de CH₄ et de N₂O des sols contribuerait dans une moindre mesure (respectivement 9 % et 2 %) à ce potentiel de réduction théorique. Selon les évaluations du stock mondial de carbone, l'accumulation de carbone dans les sols « absorberait » 1/4 de nos émissions de CO₂. On estime qu'en Bourgogne, 773 millions de tonnes de CO₂ seraient stockés dans les 30 premiers centimètres de sols, le tiers proviendrait des sols forestiers (*Figure 48 et 47*). Bien qu'instable, le stockage dans les sols représente un tonnage plus fort que celui de l'atmosphère et de l'ensemble de la

végétation réunis. L'INRA a montré qu'en France l'adoption de pratiques favorables pourrait permettre de contrôler 1 à 2 % des émissions de GES.



a) Les GES dans les sols : CO₂, CH₄, N₂O

Les sols interviennent dans le cycle des trois principaux gaz à effet de serre (GES), de manière différente selon leur nature, selon qu'ils sont plus ou moins gorgés d'eau et plus ou moins riches en matière organique :

- Le dioxyde de carbone (CO₂) : Certains sols stockent plus de carbone que d'autres. 15 à 30 % des stocks mondiaux de carbone dans les sols seraient dans les sols de **tourbières** en déclin un peu partout dans le monde.
- Le méthane (CH₄) : L'élevage est fortement émetteur de ce gaz. Les zones humides de type rizières ou marais le sont aussi. Les sols des zones exondées, largement majoritaires

en France, se caractérisent plutôt par leur capacité à français France constituent donc un "puits" vis-à-vis de ce gaz.

- L'oxyde nitreux ou protoxyde d'azote (N₂O) : les sols sont à l'échelle mondiale la principale source d'émission de protoxyde d'azote (70 %). Ce phénomène est lié à l'activité bactérienne qui transforme l'azote minéral NO₃ en gaz N₂O (cf. p.19). Pour ce gaz, toutes les mesures conduisant à éviter la présence d'azote minéral excédentaire dans le sol liée à la fertilisation (un tiers des émissions serait lié à l'épandage des déjections animales et deux tiers à l'épandage d'engrais minéraux) sont favorables à la réduction des émissions.

Les sols interviennent dans le cycle des trois principaux gaz à effet de serre, dont deux sont liés au cycle du carbone et un au cycle de l'azote. Bien qu'instable, le stockage dans les sols représente un tonnage important.

On estime qu'en Bourgogne, ce sont 773 millions de tonnes de CO₂ qui seraient stockés dans les 30 premiers centimètres de sols. Les sols agricoles représentent de gros volumes de N₂O.

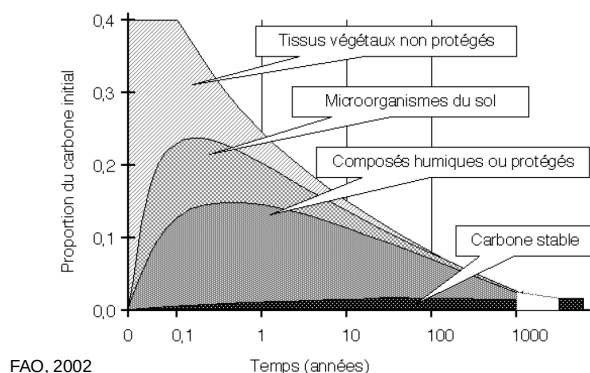


Figure 48 : Représentation qualitative et quantitative du devenir du carbone organique incorporé par les végétaux dans le sol, dans un agrosystème cultivé français moyen (Arrouays et al., 2002)

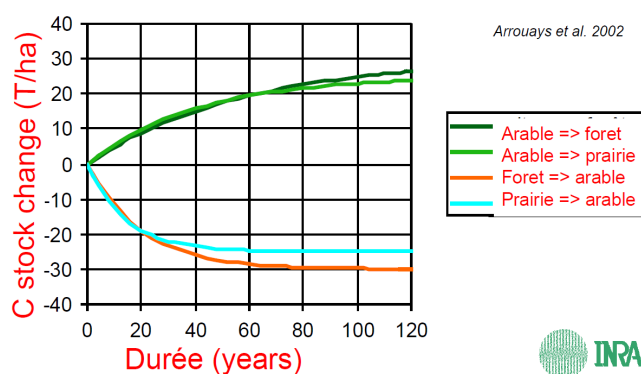


Figure 49 : Evolution du stock de carbone dans le sol en fonction de l'occupation du sol

Les rythmes de stockage et de déstockage du carbone dans le sol sont non linéaires et dissymétriques. Ils s'échelonnent sur une durée plus ou moins longue selon le type de couvert végétal : une vingtaine d'années pour les cultures, 70-80 ans pour les prairies et quelques siècles pour la forêt. Le déstockage de carbone dans le sol est plus rapide que le stockage. Sur 20 ans par exemple, le stockage lié à la conversion terre arable → forêt est deux fois plus faible que le déstockage induit par la conversion inverse. L'abandon ou l'interruption de pratiques « stockantes » se traduit le plus souvent par un déstockage rapide. On a donc tendance à surestimer le stockage dans les estimations moyennes.

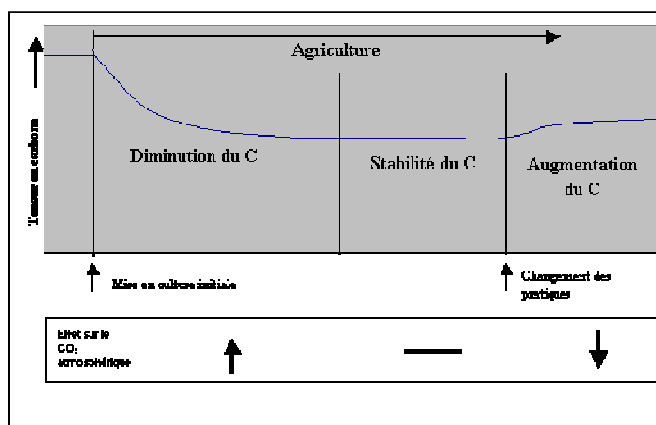


Figure 50 : Effet de la gestion des terres agricoles sur les quantités de carbone du sol

(R.L. Desjardins, Canada, 1998)

Gestion des terres et stockage carbone :

Toute modification de la gestion des terres a pour effet de perturber le cycle du carbone. Par exemple, lorsque les forêts et les prairies naturelles sont défrichées pour faire place à l'agriculture, une grande quantité de la matière organique est transformée en CO_2 et relâchée dans l'atmosphère. Puis, quand le sol est cultivé pendant quelques décennies, les quantités stockées dans le sol se stabilisent à nouveau. Pour un sol déterminé soumis à une pratique constante, un pseudo équilibre est atteint pour le contenu en matière organique du sol après 30 ou 50 ans (Greenland, 1995).

b) Puits ou source de GES : encore un rôle important de la matière organique

L'évolution de la capacité de stockage des systèmes sols-plantes reste encore très mal connue (Figure 49). Le temps de stockage dans le sol et les végétaux est relativement court, ce qui rend son stockage précaire. Les différentes formes de matière organique issue de la photosynthèse, ainsi que le carbone organique contenu dans les micro-organismes du sol, alimentent le stockage de carbone (Figure 48). Mais sa destruction des stocks peut être très rapide (incendie de forêt pour le stockage de carbone dans les bois, retournement de prairies...). La gestion des terres agricoles a un rôle prépondérant dans le maintien et la stabilisation des taux de carbone organique dans les sols (Figure 50).

Dans le sol, **la matière organique est l'élément clé** du cycle du carbone. Sa composition chimique évolue sous l'action de microorganismes jusqu'à la séparation finale entre partie minérale et partie gazeuse (CO_2 , CH_4 , N_2O ...).

Un puits de carbone peut se transformer en source, sous l'influence de phénomènes climatiques, anthropiques ou naturels. Les facteurs qui favorisent la durée de capture du carbone dans le sol sont la taille des particules de matière organique et la force de l'association avec le

minéral : plus la matière organique sera intimement associée à la phase minérale du sol, le complexe argilo-humique (cf. p. 14), plus elle offrira une stabilité au carbone emprisonné.

A l'inverse, les facteurs qui réduisent son temps de séjour dans le sol sont un réchauffement et une bonne humidité puisqu'ils accélèrent l'activité des microorganismes et par conséquent la décomposition de la matière organique, d'où une augmentation de dégagement de CO_2 .

Globalement, toute action visant à stabiliser ou accroître la teneur de la matière organique des sols est favorable au stockage de carbone. Cela va de pair avec maintien de la fertilité, de la rétention en eau et préservation de la biodiversité.

Quant au **protoxyde d'azote** (N_2O), GES dont le potentiel de réchauffement global à 100 ans est 298 fois celui du CO_2 , sa production est commandée dans le cycle de l'azote par les bactéries. Les plantes mycorhizées contribuent à la fixation de N_2O pour le restituer aux plantes sous forme de nitrate. La présence de légumineuses dans la rotation des cultures, l'ajustement des fertilisants azotés, participent à la réduction des émissions de N_2O .

*Retournement de prairies et déboisement sont les principaux changements d'occupation des terres qui influent sur le stockage de carbone dans les sols. **La matière organique** joue un rôle clé dans le stockage (ou le déstockage) du carbone dans le sol, **les bactéries** dans*

celui du protoxyde d'azote, un puissant GES. Toute pratique favorable au maintien d'une bonne teneur en matière organique contribue au stockage de carbone. Des pratiques favorables permettraient ainsi de contrôler 1 à 2 % des émissions de GES.

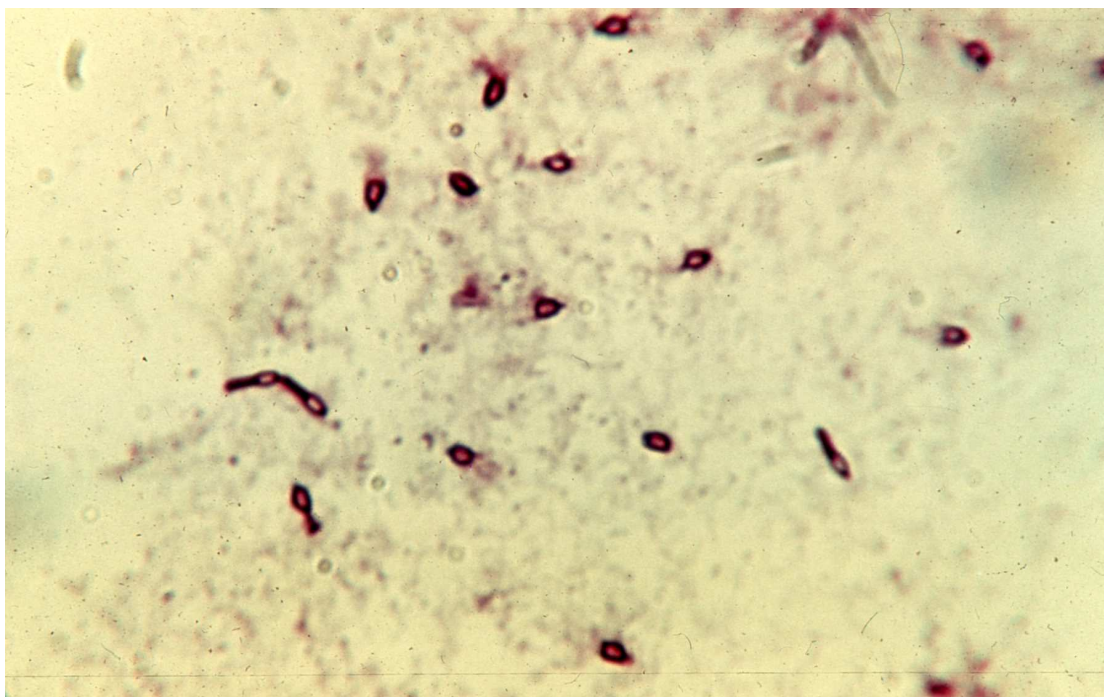


Figure 51 : *Clostridium sporogenes* (culture en boîte de pétri)

Clostridium : une bactérie du sol pour lutter contre les tumeurs cancéreuses

La recherche dans le domaine du traitement du cancer a inspiré les scientifiques britanniques et néerlandais à creuser la terre. Grâce à ces travaux, les chercheurs affirment qu'une bactérie spécifique présente dans le sol a la capacité de stimuler des médicaments anticancéreux directement au cœur des tumeurs.

Révélés par une équipe de chercheurs de l'Université de Nottingham (Angleterre) et l'Université de Maastricht (Hollande), les travaux mettent en évidence une bactérie qui vit dans le sol, *Clostridium sporogenes*, dont plusieurs espoirs reposent sur elle pour devenir un moyen de rendre actif et cibler des médicaments contre le cancer.

Source : <http://www.le-guide-sante.org/Article/205/Clostridium-bacterie-du-sol-pour-lutter-contre-les-tumeurs-Imprimer.html>

4.3 Sols et santé de l'Homme : entre source de bienfaits et transmission de contamination

a) Source de bienfaits

Parmi les services rendus par la biodiversité, celui de **réservoir « pharmaceutique »** naturel est souvent évoqué. La richesse de la flore bactérienne des sols laisse supposer un réservoir inexploré de bactéries utiles à la santé de l'homme. On cite souvent l'exemple de la pénicilline. Depuis très récemment, le clostridium ouvre de nouvelles perspectives thérapeutiques (Figure 51).

Un autre service en faveur de la santé est fourni indirectement par la **capacité d'épuration et de dépollution** des sols (cf. p. 57) : les polluants qui, par leur forte concentration, peuvent porter atteinte à la santé via les ressources en eau, sont dégradés.

Bien sûr, par leur fonction de production alimentaire, énergétique et hydrique, les sols fournissent les **aliments**. Omnivore, l'homme a besoin d'une diversité alimentaire pour son équilibre nutritif, que le sol lui fournit. Sans oublier les aliments typés par leur terroir comme les vins et autres produits alimentaires.

Un autre service général de la biodiversité est également évoqué : celui qui touche au **bien-être psychique**, au culturel et aux loisirs. Ces aménités sont indirectes, via la fonction de support des sols : les paysages, le jardinage, les terrains de sport, l'archéologie, etc.

Chacune des fonctions du sol offre une source de bienfaits pour la santé :

- sa fonction nourricière est la première source de santé,
- en tant que support d'activités et expressions de paysages, les sols participent aux loisirs et aux besoins culturels de l'homme,
- de par ses fonctions d'épuration et sa capacité à biodégrader les polluants, ils contribuent à limiter les

contaminations dans l'environnement, notamment dans l'eau,

- enfin, sa richesse biologique, notamment en bactérie, ouvre des perspectives pharmaceutiques encore peu explorées. Par ailleurs, la diversité biologique limite les pressions de maladies sur végétaux Les sols ont un rôle de prévention des contaminations.

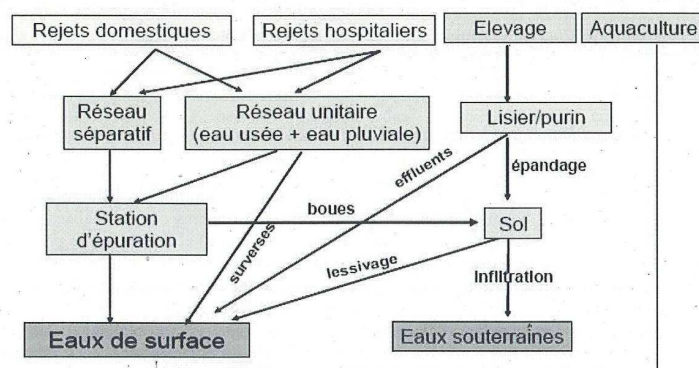


Figure 52 : Schéma théorique de transmission de germes pathogènes via l'environnement
(Source : A.Hartmann, INRA Dijon)

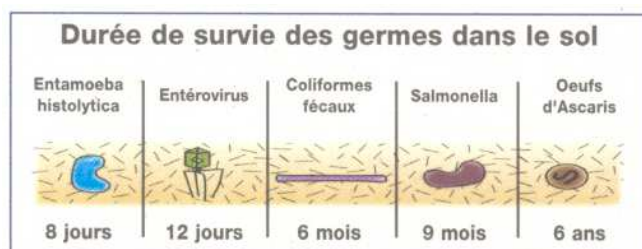


Figure 53 : Durée de survie de germes pathogènes dans le sol

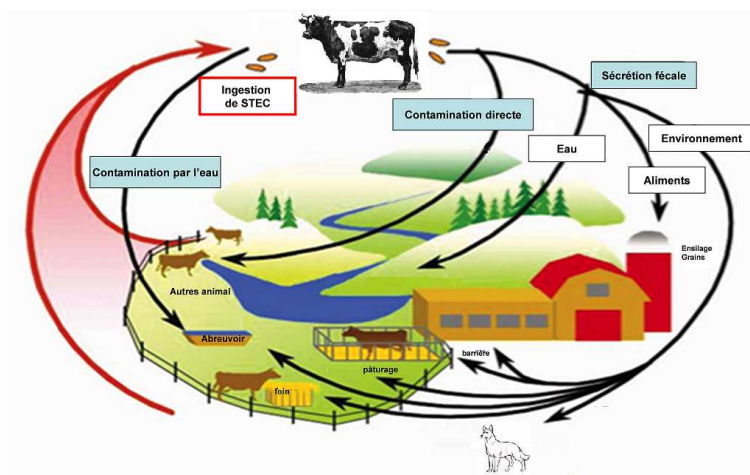


Figure 54 : Cycle de contamination de bactérie, de type Salmonellose ou E. Coli.

Les sols, un passage avant la chaîne alimentaire pour des germes pathogènes

Certaines bactéries comme la salmonella peuvent persister plusieurs mois dans le sol avant de rentrer dans la chaîne alimentaire. Les déjections animales sont souvent à l'origine de la contamination des aliments, du sol et de l'eau d'abreuvement des animaux. Les E. coli producteurs de Shiga toxines (STEC) sont capables de survivre tout en restant pathogènes pendant plusieurs mois dans l'environnement de la ferme. L'hygiène générale et le compostage des fumiers limitent les risques de contaminations. Le sol est un simple maillon de transmission entre l'homme et l'animal.

b) Contaminations biologiques

Réservoir de vie, le sol n'est pas exempt de contamination biologique par des agents pathogènes d'origine naturelle ou apportés par les animaux ou l'homme. La durée de vie du pathogène dans le sol varie avec le type de germe, allant de quelques jours à quelques années (*Figure 53*). Les bactéries du sol peuvent être des agents de transmission de maladies. C'est l'exemple du tétanos, maladie transmise par une toxine libérée par un bacille présent naturellement dans le sol : la contamination se fait à la faveur d'une plaie (souvent une coupure), en touchant la terre infectée.

Les bactéries ou autres agents infectieux peuvent être transmis d'homme à homme ou d'animal à homme lors d'un **cycle qui passe par le sol**, celui-ci étant un réservoir intermédiaire (*Figure 54*).

Les sols abritent aussi des microorganismes qui peuvent se révéler être pathogènes pour l'homme. Les sols sont soumis à des actions anthropiques (agriculture, industrie ou urbanisation) qui peuvent

conduire à des perturbations des communautés microbiennes et de leur fonctionnement. Le recyclage en agriculture de produits résiduels organiques (fumiers, lisiers, ordures ménagères, boues de station d'épuration, compostés ou non) comme amendement des sols peut conduire à une contamination des sols par des pathogènes humains tels que *Listeria*, *Salmonella* ou *Staphylococcus* ... Peu de données existent sur la capacité de ces pathogènes à survivre dans les sols et la capacité des sols à servir de réservoir dans le cycle biologique de ces pathogènes. [Extrait de la note INRA, *Microflore des sols et bactéries pathogènes de l'homme*, A. Hartmann]

Actuellement, la recherche se pose la question de la place de l'environnement, dont le **sol, dans la contamination par des pathogènes** résistants aux antibiotiques. (*Figure 52*). La maîtrise des eaux résiduaires urbaines et la gestion des déjections et des boues d'épuration pourraient se révéler importantes pour la bonne maîtrise de la contamination.

Comme tous les organismes vivants, les pathogènes font partie de la biodiversité. Ils contribuent à la régulation des populations. Les sols n'en sont pas exempts et constituent un réservoir de germes pathogènes qui sont d'ailleurs soumis à la concurrence d'autres organismes.

A l'instar des autres pollutions, les apports anthropiques (boues de station d'épuration, concentration des dépôts de fumiers, résidus en provenance des hôpitaux...) peuvent

devenir problématiques et faire augmenter les concentrations de ces germes. L'attention se portera prochainement sur les taux de contamination des résidus urbains et d'élevage, et sur la gestion de ces résidus.

Le sol, maillon de l'environnement et support de production agricole, est aussi un maillon de la chaîne trophique et alimentaire.

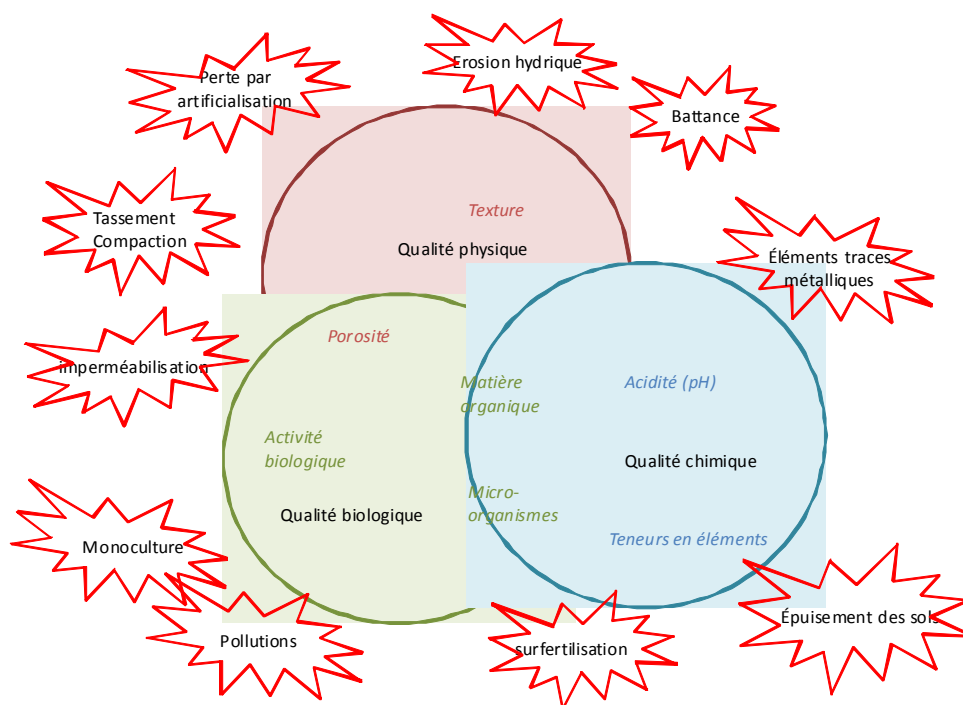


Figure 55: Critères de qualité des sols et sources de dégradation

Agriculture

Pratiquer une agriculture durable : allongement des rotations, maîtrise des intrants, pour favoriser l'activité biologique des sols. La réintroduction des légumineuses dans les rotations a un effet particulièrement favorable sur l'activité biologique du fait de la richesse naturelle de ces plantes en ryzobactéries.

Maintenir un taux de matière organique suffisant pour l'activité biologique : enfouissement des pailles, apports de fumier, de lisier ou de compost... favorisent l'activité des microorganismes des sols. Toutefois, cette activité biologique peut être contrecarrée par la compaction ou un tassement excessif.

Pratiquer le travail minimum du sol quand les conditions agronomiques le permettent.

Viticulture

Enherber les vignes : l'enherbement sur les rangs de vigne limite le ruissellement des pluies et l'entraînement des pesticides, il favorise l'activité biologique.

Entretenir les murets : de construction ancienne, ils arrêtent les écoulements de boue à mi-pente, préserve les infrastructures de bas de pente, agrémentent le paysage.

Sylviculture

Favoriser la minéralisation de l'humus donc l'enrichissement du sol passe par la réalisation de coupes sélectives, ce qui permet au sol de bénéficier de la lumière.

Protéger le sol lors des exploitations implique la création de cloisonnements d'exploitation : petits chemins sur lesquels circulent les engins d'exploitation et de débardage, et sur sols fragiles (humides, frais, limoneux, argileux...), l'exploitation et le débardage en période sèche.

Diversifier les essences entraîne l'enrichissement de l'humus puis des sols, après sa dégradation.

Aménagement urbain

Aménager les espaces non imperméabilisés : le maintien, même partiel, de surfaces enherbées (aires de jeux, noues, végétalisation des parkings...) limite le ruissellement des pluies et contribue au rôle de filtre vis-à-vis de contaminants.

La gestion raisonnée de l'artificialisation tient compte de la continuité fonctionnelle et écologique entre les sols : continuité hydrique, couloirs de biodiversité,... les services écosystémiques des sols sont en partie maintenus. Adapter les usages à la spécificité des sols permet de valoriser leurs potentialités et d'éviter les dégradations.

Introduire des critères agronomiques des sols dans les PLU permettrait de mieux tenir compte de la vocation des sols en milieu urbain, au-delà d'une simple répartition spatiale des activités.

Conclusion

Vers une gestion durable des sols

Les sols constituent le support de toutes les activités humaines et de la plupart des écosystèmes et offrent des ressources essentielles aux sociétés humaines et aux écosystèmes :

- **Support d'activité** avec l'implantation des bâtiments, des infrastructures et des écosystèmes, ils sont un héritage culturel de l'histoire de la Terre, de nos civilisations et de nos sociétés, héritage qui a modelé et façonné une diversité de paysages.
- Intimement liés aux autres compartiments de l'environnement, l'air, l'eau et la biosphère, les sols assurent **une fonction environnementale** de régulation et d'épuration, mais aussi de réservoir biologique.
- Ils sont aussi support et source de **production** alimentaire et agricole, de production à but énergétique (cultures énergétiques, bois...) et de matériaux (terres, gravats, roches...).

Ces fonctions interagissent entre elles. La complexité des mécanismes du sol en fait un écosystème à part entière :

- **C'est le berceau de cycles biogéochimiques** : altération des minéraux, libération d'éléments nutritifs, recyclage des éléments nutritifs et du carbone pour produire une nouvelle biomasse, décomposition des matériaux toxiques par la faune et la flore du sol...
- **C'est une composante importante dans le cycle de l'eau** : infiltration de l'eau, stockage de l'eau pour assurer l'alimentation des racines, ruissellement en surface ou sur une couche imperméable de sol, réservoir sollicité lors de l'évapotranspiration...
- Il intervient de façon non **négligeable dans la lutte contre le changement climatique**, grâce à sa capacité de stocker des gaz à effet de serre, ou au contraire d'en libérer. Il régule les cycles d'azote, de carbone, de méthane. **Son inertie assure un rôle tampon** : les variations

brutales de température sont amorties (utilisation par le concept de puits canadien),

- **Il contribue au stockage, à l'élimination ou la restitution** de certains éléments, nutritifs ou polluants : le complexe argilo-humique permet d'adsorber les éléments qui pourront ensuite être restitués au milieu et aux racines ou être dégradés par les microorganismes du sol, ou encore être stockés dans le sol pour une durée plus ou moins longue.

De cette diversité de fonctions peuvent découler des conflits d'usages entre production alimentaire, de biomasse ou de matériaux, implantation urbaine ou d'infrastructure, réserve de nature...

Mais surtout, les pressions qui conduisent à une dégradation de la qualité des sols sont nombreuses (*Figure 55*) : mode de production agricole intensive (surfertilisation, monoculture, battance, épuisement des sols...), développement urbain et industriel (imperméabilisation, tassement ou compaction des sols, perte par artificialisation...), réseaux de transport, loisirs...

Or, le sol n'est pas une ressource renouvelable. C'est pourquoi il est nécessaire de désormais s'orienter vers **une gestion adaptée des sols, d'en assurer et d'en encadrer le bon usage**. De bonnes pratiques favorisent le fonctionnement des sols et permettent de préserver la qualité biologique, de maintenir la qualité physique et optimiser la qualité. Préserver leur bon fonctionnement et limiter les pressions doivent aller de pair. Chaque activité sectorielle est concernée, que ce soit l'agriculture, la viticulture, la sylviculture ou les travaux publics en aménagement urbain.

A défaut d'une directive cadre européenne des sols qui peine à voir jour, une planification des usages des sols permettrait de mettre en adéquation les caractéristiques des sols et les utilisations que l'on veut en faire (agriculture, routes, lotissements urbains...) et cela, en fonction des objectifs de développement.

Références bibliographiques

ⁱ « L'érosion du vignoble et ses conséquences en Côte d'or » Patrick Claude – ministère de l'agriculture - 1996

ⁱⁱ « L'artificialisation des sols s'opère aux dépens des terres agricoles » Le Point sur, n°75 février 2011, commissariat générale au développement durable

ⁱⁱⁱ European atlas for soil biodiversity - JRC European commission – 2010- voir pages 36-37

^{iv} « Le sol, interface dans l'environnement, ressource pour le développement » M. Robert. 1996

Alterre Bourgogne est l'agence régionale pour l'environnement et le développement soutenable en Bourgogne. Créée en 2006 dans le prolongement de l'OREB (Observatoire régional de l'environnement en Bourgogne), Alterre est une association loi 1901, majoritairement financée par l'Etat, le Conseil régional de Bourgogne, l'ADEME et l'Europe, à travers le fonds FEDER.

Alterre Bourgogne a pour mission de **mobiliser les acteurs régionaux afin que les enjeux liés à l'environnement et au développement soutenable soient placés au cœur des politiques et des actions des territoires bourguignons.**

Ses actions sont de 3 types :

- observation de l'environnement et évaluation de politiques publiques,
- accompagnement de porteurs de projets,
- développement de l'éducation et de la formation dans le domaine de l'environnement et du développement durable.