

# Qu'est-ce qu'un sol fertile ?

Le sol est l'épiderme des continents. Il est constitué de combinaisons complexes d'éléments minéraux et d'éléments organiques. Il faut plusieurs milliers d'années pour que se forme un sol fertile. Il ne faut que quelques années voire quelques minutes pour le détruire.

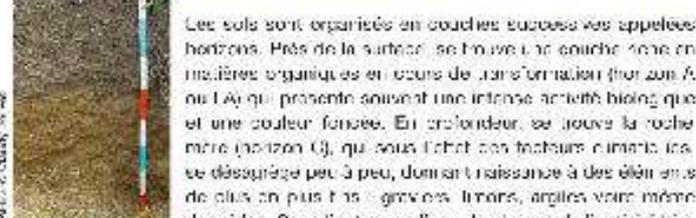
## Une multitude de sols



Les sols présentent une grande variété

Les conditions climatiques, la nature de la roche-mère, le type de végétation, l'action de l'homme, donnent naissance à des sols très différents. En zone tropicale, par exemple, les sols peuvent atteindre une épaisseur de plusieurs mètres alors qu'en France, l'épaisseur varie entre 20 cm et 1 mètre. Certains sols peuvent être quasi exclusivement organiques (tourbières) ou au contraire très minéraux (zones désertiques). Ils peuvent être riches en calcaire, en fer (sols rouges tropicaux), en argile. Les sols sont en perpétuelle évolution. L'eau et l'activité biologique contribuent à accélérer ce processus.

## Des couches superposées



Les sols sont organisés en couches successives appelées horizons. Près de la surface, se trouve la couche riche en matières organiques en cours de transformation (horizon A ou E) qui présente souvent une intense activité biologique et une couleur foncée. En profondeur, se trouve la roche mère (horizon C), qui sous l'effet des fractures minérales, se désagrège peu à peu, donnant naissance à des éléments de plus en plus fins : graviers, limons, argiles voire même des vides. Sous l'action de l'eau de pluie et de l'activité biologique, les éléments du sol migrent. Certains sont entraînés par l'eau (matières organiques, argile, calcaire). D'autres éléments minéraux remontent par capillarité ou sont absorbés en profondeur par les racines des plantes. Les organismes vivants du sol participent activement à ces transferts qui aboutissent à la formation d'un ou de plus durs horizons intermédiaires (horizons B, S ou si généralement bien visibles).

## Des éléments plus ou moins gros

Les agrégats caractérisent les terres cultivables, selon leur texture, c'est-à-dire la grosseur des éléments minéraux qui la constituent. Selon la proportion de graviers, de sables, de limons et d'argiles, un sol sera dit « sable limoneux », « limono-sablo-argileux » ou « argilo-sableux ».

Le sol limono-argilo-sableux comprend  
22 % de sables,  
58 % de limons et  
18 % d'argiles.



## Une organisation structurée



© P. L. B. / Agence de Régulation de l'Eau

Les agrégats mesurent quelques millimètres de diamètre et rassemblent les particules du sol en petites

En évoluant, les particules des sols s'agglomèrent. Les graviers deviennent sables qui deviennent limons puis argiles. Les sols deviennent donc de plus en plus fins et compacts. C'est sans compter sur le secret qui rend ces sols fertiles : le couple argile-matières organiques, appelé complexe argilo-humique. Formant une sorte de colle, les argiles et les matières organiques rassemblent et maintiennent les particules entre elles sous forme d'agrégats, sortes de grumeaux de

quelques millimètres ou de petites poignées. Les agrégats structurent, stabilisent et aèrent les sols. En outre, argiles et matières organiques sont un véritable garde-manger pour les plantes grâce à leur grande capacité de stockage de l'eau et les éléments minéraux.

## Un milieu chimique complexe

Les racines des plantes absorbent l'eau du sol et les sels minéraux qui y sont dissous. L'azote est fourni par la transformation de la partie organique du sol. Le glucose des autres sels minéraux proviennent de la partie minérale du sol qui sous l'effet de l'eau et de l'activité biologique est transformé en sels solubles. L'acide du sol joue un rôle primordial dans ce processus. Elle favorise l'acidification des roches mais nuit à l'activité biologique. Un sol très acide est souvent un sol où les réserves minérales ont été lessivées et où les réserves organiques s'accumulent sans se transformer.

Bien que très riche en matière organique, une tourbière acide est un milieu nutritif généralement pauvre.



© S. S. / Agence de Régulation de l'Eau

## Un milieu vivant

Il n'existe pas de sol fertile sans une vie intense. Cette activité, peu visible, repose essentiellement sur de petits organismes, dont le plus connu est le ver de terre. Les autres, encore plus discrets, sont souvent invisibles à l'œil humain : acariens, collemboles, bousiers, nématodes, champignons. Pourtant certains organismes permettent de mieux cerner l'importance de ce biotope. Une cuillère à café de terre de jardin peut accueillir plus d'un million d'organismes de plusieurs milliers d'espèces différentes !

Le sol est peuplé de petits organismes dont beaucoup sont invisibles à l'œil nu.

© P. L. B. / Agence de Régulation de l'Eau



## Des vides

Les éléments solides des sols cultivables ne représentent en moyenne que 50 % du volume. Les 50 % restants sont des vides de différentes dimensions (micro et macroporosité) qui permettent de stocker l'eau et l'air, indispensables à l'activité biologique des sols (racines, vers de terre, microorganismes).

À gauche, un sol structuré. À droite le même sol après destruction. Le volume perdu ne représente qu'une partie des vides du sol. Il subsiste encore une macroporosité dans l'écoulement de cristaux.



© P. L. B. / Agence de Régulation de l'Eau

# Les sols fertiles : essentiels mais menacés

Les sols fertiles forment une ressource naturelle non renouvelable à l'échelle humaine. Indispensables aux hommes et aux écosystèmes, ils sont au cœur d'enjeux essentiels et pourtant contradictoires.

## Nourrir les hommes

Seuls 17% des terres émergées sont cultivables.



**83%** des terres émergées ne sont pas adaptées à la production alimentaire pour des raisons de climats (désertiques, polaires, montagneux), ou de nature des sols (trop rocheux, trop humides, trop escarpés, etc.).

L'augmentation de la population mondiale (vraisemblablement 10 milliards en 2050 contre 6 milliards à l'heure actuelle), ainsi que l'élévation probable de son niveau de vie, impliquent a minima le doublement des besoins nets en alimentation et en énergie. La mise en culture des terres potentiellement cultivables est donc un enjeu majeur des années à venir. Ces réserves de sols fertiles se situent principalement en Afrique subsaharienne, en Amérique du sud et Amérique centrale.



L'Amérique du sud et centrale (ici, le sud du Brésil), représente un immense réservoir en sols fertiles.

La France bénéficie d'une situation exceptionnelle puisque plus de 50% de son territoire est cultivé ou enherbé (prairies permanentes). Le potentiel de développement de sa surface agricole est par ailleurs estimé à presque 50%.

## Accueillir la biodiversité

Les sols abritent une biodiversité faunistique et microbienne particulièrement riche bien que méconnue. Cette richesse écologique, socle de leur fertilité rend également des services écologiques divers, et parfois surprenants. Ainsi, bon nombre d'antibiotiques sont issus de bactéries du sol. Et sait-on que beaucoup d'insectes pollinisateurs se développent dans le sol au stade larvaire.



Comme beaucoup de pollinisateurs, l'abeille des citrouilles fait son nid dans le sol.

## Réguler, stocker et filtrer l'eau

La porosité des sols permet à l'eau de s'infiltrer. En se comportant comme des éponges, les sols jouent un rôle crucial vis-à-vis des crues et de l'érosion. Par ailleurs, l'eau qui s'infiltré est stockée et mise à disposition de la biomasse du sol. Le surplus d'eau passe dans le sous-sol et alimente les nappes phréatiques. À l'aide des plantes et des organismes qu'il abrite, le sol, durant ce processus, assure une véritable épuration de l'eau en dégradant ou en immobilisant de multiples polluants qu'il s'y trouvent.

Le lac Monroe au Canada



Les sols jouent un rôle majeur dans la régulation, le stockage et l'épuration de l'eau.

## Stocker le carbone

Il est admis qu'au niveau mondial, les sols contiennent 2 fois plus de carbone que l'atmosphère et 3 fois plus que celui contenu dans la végétation. La baisse de la matière organique des sols, en relâchant du gaz carbonique, gaz à effet de serre, contribue directement au réchauffement climatique.

Les sols stockent presque 3 fois plus de carbone que la végétation.

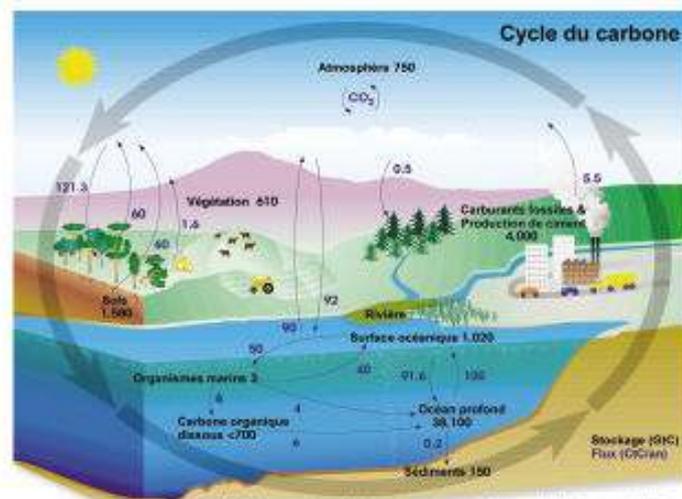


Fig. 5.19 - Schéma montrant le cycle du carbone. Les nombres sont indiqués en milliards de tonnes de carbone (1 milliard de tonnes = 1 GtC = 10<sup>9</sup> tonnes). Les données sont pour 2004. Les nombres positifs indiquent les flux entrants de carbone entre les réservoirs. Les nombres négatifs indiquent les flux sortants de carbone.

## Les sols menacés de toutes parts

L'érosion et l'urbanisation détruisent des dizaines de milliers de km<sup>2</sup> de sols chaque année. Les pesticides, hydrocarbures, solvants, boues et métaux lourds polluent les sols et les nappes phréatiques. L'agriculture intensive, en privilégiant la mécanisation et les intrants engendre le compactage, la salinisation, des pollutions diffuses, une perte de matière organique et une chute de la biodiversité des sols.

En Europe, des milliers de km<sup>2</sup> de sols fertiles sont détruits chaque année du fait de l'urbanisation et du tassement des sols.



# Le sol : un continent à explorer

Un simple mètre carré de sol accueille souvent des centaines de milliers, voire des millions d'espèces différentes dont beaucoup nous sont encore inconnues.

## Une biodiversité stupéfiante

L'énorme variété des sols et des conditions environnementales (composition, organisation, humidité, température, équilibres chimiques, modes de gestion), génère une multitude de niches écologiques à l'origine d'une biodiversité stupéfiante et méconnue.

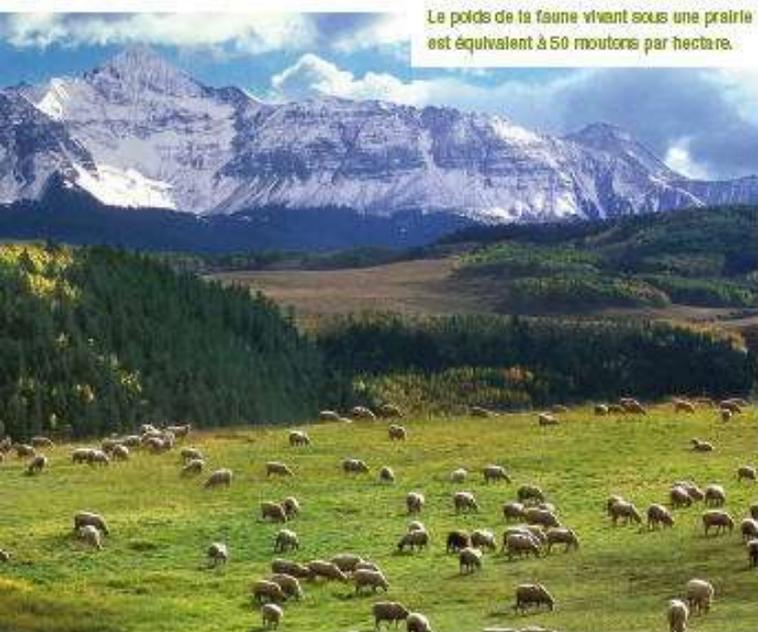
Les plus petits organismes, bactéries, champignons, algues, nématodes, protozoaires, sont les plus nombreux, les plus diversifiés mais aussi les moins connus. Un mètre carré de sol peut ainsi abriter plus de 100 000 espèces différentes de bactéries et des milliards d'individus. Il en est de même pour les champignons des sols, particulièrement abondants et méconnus, puisqu'on estime à seulement 5 % les espèces décrites à ce jour.



Les bactéries sont particulièrement abondantes dans les sols.

Les tout petits animaux, acariens et collembolles sont également abondamment représentés par dizaines voire par centaines d'espèces, dont bon nombre restent encore à décrire. La macrofaune visible à l'œil nu (vers de terre, termites, fourmis et larves d'insectes) se compte fréquemment par centaines d'individus par mètre carré. Une prairie permanente en zone tempérée abrite ainsi environ 1 500 kg par hectare de faune cachée, soit environ le poids de 50 moutons.

Le poids de la faune vivant sous une prairie est équivalent à 50 moutons par hectare.



Bactéries et champignons sont particulièrement abondants dans les sols bien que très mal connus.



## Les ingénieurs du sol

La biodiversité du sol représente une énorme machinerie biologique d'une complexité qui défie encore nos connaissances et notre compréhension. Cependant, il apparaît de plus en plus évident que le bon fonctionnement d'un sol et sa fertilité sont indissociables de cette activité biologique. Cette vie grouillante, majoritairement microscopique, s'établit dans les vides du sol afin d'y trouver l'eau et l'air nécessaires. Chaque espèce fait partie d'une chaîne alimentaire complexe et assure des fonctions variées.

Ainsi, une cohorte d'organismes, en particulier bactéries et champignons, produit des acides organiques qui permettent l'altération des roches. Certains de ces organismes émettent des sortes de colles ou des filaments qui maintiennent les particules du sol entre elles. Des cyanobactéries fixent le carbone atmosphérique et enrichissent le sol en azote. Tandis que les vers de terre, myriapodes ou divers insectes régulent les populations de microorganismes, réorganisent et aèrent le sol, fragmentent et dégradent la matière organique.

## Une biodiversité au service de tous

L'activité biologique des sols influe de manière déterminante sur notre environnement. Outre son impact sur la fertilité des sols et donc sur notre alimentation, elle conditionne fortement le stockage et l'épuration de l'eau ainsi que le stockage et l'émission de carbone.

Par ailleurs, cette biodiversité représente une immense ressource biotechnologique qui reste encore à explorer mais dont il a déjà été tiré de nombreux bénéfices. La pénicilline et certains stéroïdes comme la cortisone sont ainsi issus de champignons du sol. De nombreux enzymes, solvants ou détergents sont issus de bactéries ou de champignons du sol. Le traitement des eaux usées ou de certaines pollutions se fait à l'aide de bactéries du sol. Le champ médical et industriel restant à explorer est immense.

Les organismes du sol sont de grands pourvoyeurs de produits pharmaceutiques et biotechnologiques.



# Microfaune et microorganismes

Les bactéries et les nématodes, bien que microscopiques, sont les grands transformateurs de la matière organique.



## Les bactéries, des organismes tout terrain

Grâce à leur grande variabilité génétique, les bactéries sont des organismes unicellulaires particulièrement adaptables, que l'on retrouve dans tous les types de milieux y compris les plus extrêmes. Lorsque l'environnement change, leur population peut diminuer brutalement.

Mais ces organismes ont développé des formes de dormance très résistantes qui leur permettent de renaître dès que les conditions leur sont à nouveau favorables. Il existe une multitude d'espèces de bactéries du sol, dont la plupart sont encore inconnues.



## Gourmandes en sucres et généreuses en azote

Dans les sols, les bactéries sont souvent associées à la matière organique et aux racines de végétaux. Elles y trouvent les sucres dont elles ont besoin. Elles sont donc généralement plus abondantes dans les horizons superficiels. Elles transforment les matières organiques déjà bien fragmentées mais sont également championnes de la symbiose. Elles peuvent s'allier à toutes sortes d'organismes. Les lichens sont ainsi le résultat d'une alliance entre une algue, un champignon et une cyanobactérie. Certaines bactéries s'associent aux racines des plantes. Elles captent alors l'azote atmosphérique et le mettent à disposition des plantes qui leur fournissent des sucres en retour.

Les racines de légumineuses présentent des nodosités (sortes de kystes) typiques d'une symbiose avec une bactérie fixatrice d'azote.

Les nématodes ressemblent à de petits vers filiformes et sont particulièrement abondants dans le sol en quantité et en nombre d'espèces.



## Les nématodes, maillons de la chaîne alimentaire

Les nématodes ont la forme de minces tubes multicellulaires, tels des vers filiformes. Hormis certains parasites d'animaux, ils sont petits voire microscopiques et vivent dans l'eau du sol.

Après les bactéries, ce sont les organismes les plus abondants du sol : jusqu'à 10 millions d'individus par m<sup>2</sup> de sol cultivé. Leur diversité est également remarquable, puisqu'on estime qu'environ 30 000 espèces, soit seulement 5% des nématodes, sont actuellement décrites. On retrouve ces organismes dans les environnements les plus variés et les plus extrêmes, y compris en Antarctique, dans les déserts ou dans la mer.



## Des alliés contre les ravageurs des cultures

Les nématodes ont développé de multiples stratégies alimentaires. Certains broutent les bactéries, participant à la régulation de ces populations. D'autres broutent les champignons, ce qui peut avoir un effet positif sur les plantes lorsqu'il s'agit de champignons pathogènes, ou négatif lorsqu'il s'agit de champignons mycorhiziens. D'autres sont phytophages et sont alors connus comme des ravageurs. Quelques-uns sont même des parasites.

Les nématodes sont un maillon essentiel de la chaîne alimentaire. La plupart des espèces sont bénéfiques à la fertilité des sols et l'agriculture biologique a même appris à utiliser certaines espèces parasites pour lutter contre les larves de hannetons, d'otiorhynques, de tipules ou de limaces.

Certains nématodes sont utilisés pour lutter contre les vers blancs ou gris. Ils pénètrent dans la larve et l'infectent grâce à des bactéries. La larve meurt et sert de réceptacle à une nouvelle génération de nématodes.

## Capables de photosynthèse ?

Certaines bactéries appelées cyanobactéries présentent la particularité d'être capables de photosynthèse ce qui leur permet de capter le carbone atmosphérique et de pourvoir à leurs besoins en sucres. Particulièrement résistantes aux conditions extrêmes de sécheresse et d'éclairement, elles sont présentes à la surface de la plupart des sols de la planète. Ces micro-organismes jouent un rôle important dans la fertilité des sols. Ils améliorent sensiblement la structure des sols et leur capacité de rétention d'eau. Par ailleurs, ils jouent un rôle fertilisant non négligeable puisque leur apport annuel en azote est évalué à environ 10 à 25 kg par hectare. Elles sont par exemple connues pour jouer un rôle fondamental dans la fertilité des rizières.



Les cyanobactéries jouent un rôle fondamental dans la fertilité des rizières.

## Les rotifères, pour épurer l'eau

Les rotifères sont également très représentés dans les couches supérieures des sols. On peut dénombrer des populations supérieures à 2 millions d'individus au m<sup>2</sup> dans certains sols humides. Ces animaux aquatiques de moins d'un demi millimètre de long sont munis de cils qui leur permettent d'être mobiles. Ils sont souvent microphages, se nourrissant de films bactériens ou de particules en suspension dans l'eau. Certains sont des parasites, notamment des vers de terre. En général, ils sont la proie de beaucoup de microorganismes, nématodes, vers plats ou tardigrades et ne sont pas considérés comme un groupe clé du fonctionnement éco-systémique du sol. En revanche, ils sont fréquemment utilisés pour maintenir ou rétablir la pureté de l'eau, par exemple en aquariophilie ou dans les bassins de décantation des stations d'épuration.



Les rotifères sont largement utilisés en aquariophilie pour leur capacité à digérer bactéries et matières en suspension dans l'eau.

# Indispensables champignons

## Le règne des champignons

Les champignons sont des organismes très différents des végétaux. Ils forment d'ailleurs un règne à part. Dépourvus de tiges, de feuilles, de racines et de fonction chlorophyllienne, ils sont constitués de cellules groupées sous forme de filaments microscopiques appelés hyphes. Ces filaments se faufilent, se ramifient et fusionnent jusqu'à former un réseau étendu appelé mycélium. Seuls quelques champignons produisent des organes aériens visibles à l'œil nu. Morilles, cèpes, veisse de loup, ne sont que la partie visible d'un organisme souterrain bien plus étendu. Un seul gramme de sol comprend des centaines de mètres d'hyphes. Certains mycéliums peuvent atteindre des tailles vertigineuses. Par exemple, le mycélium d'un individu d'armillaire a été capable de couvrir une aire de plus de 890 hectares dans une forêt d'Amérique !



Les morilles, très appréciées pour leurs qualités gustatives, sont la partie visible d'un champignon du sol.

© Christian de Haugmaere

## Apporter des nutriments aux plantes

Les champignons sont de grands décomposeurs de la matière organique notamment de matériaux complexes comme la lignine et la cellulose des végétaux, difficilement digérables par les bactéries. Ce faisant, ils libèrent des éléments essentiels à la nutrition des plantes. De plus, certains d'entre eux produisent des substances qui rendent disponibles des éléments du sol comme le fer ou le phosphore.

Les champignons dégradent la lignine et la cellulose des végétaux et libèrent des éléments essentiels à la nutrition des microorganismes et des végétaux.



© J. Baccé

## Structurer le sol

Le mycélium, véritable toile d'araignée souterraine, emballe les agrégats, les colle et les relie entre eux et contribue ainsi à la structuration des sols, leur stabilité et la prévention de l'érosion. Particulièrement présents dans les systèmes forestiers, les champignons du sol sont très perturbés par certaines interventions comme le pâturage, le retournement du sol, la fertilisation ou l'arrosage, qui peuvent engendrer une chute de la population ou un changement de sa composition.

Les hyphes des champignons emballent les agrégats du sol et les relient entre eux.



© Urban Européenne 2013



© Urban Européenne 2013

Le volume de sol exploité par la plante (parties blanches) est démultiplié car prolongé et complété par les hyphes du champignon compagnon.

## S'allier aux racines

Alors que seuls certains végétaux s'associent à des bactéries, 90% des espèces végétales s'associent à des champignons du sol. Ces associations mutualistes sont proches de la symbiose et sont appelées mycorhizes. Les hyphes des champignons colonisent les racines des végétaux et le sol alentour. Le champignon reçoit les sucres et les vitamines dont il a besoin et restitue en retour au végétal de l'eau et des nutriments, notamment phosphate et azote. Il sert également de barrière contre d'éventuels bio-agresseurs. Ce système permet de démultiplier le volume exploité par le système racinaire des plantes.



© A. Picaud

Les racines (brunes) d'un épicéa glauque (*Picea glauca*) sont associées au mycélium (blanc) d'un champignon mycorhizien.

## Guerre et paix en sous-sol

La plupart des champignons mycorhiziens sont peu spécifiques d'une espèce et d'un sol. On estime que seulement 200 espèces de champignons colonisent 80 % des plantes vasculaires terrestres, c'est-à-dire plus de 400 000 espèces. Ces champignons montrent une grande adaptabilité et les associations formées sont complexes et instables. Il arrive même qu'un champignon se révèle bénéfique pour une plante à un instant et pathogène à un autre, suivant son stade de développement, les conditions du milieu ou l'espèce de la plante support.

De nombreux essais ont été réalisés afin de recréer artificiellement des compagnonnages racines/champignons. Quelques tentatives ont été de vraies réussites. C'est ainsi qu'a été développée la trufficulture qui a même pu s'exporter en Nouvelle Zélande grâce à des plants mycorhizés. Mais le plus souvent, le contexte sol est dominant. Dans la grande majorité des cas, l'association qui se développe après la plantation se fait avec un champignon indigène déjà présent dans le sol.



© Wacouffe

Des plants mycorhizés plantés en Nouvelle Zélande commencent à produire des truffes.

# La mésofaune

Une multitude de petits organismes peuple les sols. Ceux dont la taille avoisine le millimètre sont classés dans la mésofaune. Certains sont très étranges et beaucoup restent à découvrir.

## Des tardigrades dans l'espace

Ces petits animaux mesurent en général moins d'un millimètre. Leur étrange morphologie les fait ressembler à un minuscule ours. Leur nom (tardus : lent, grado : marcheur) vient de leur extrême lenteur à se déplacer. Les tardigrades terrestres vivent en général à la surface des sols, dans les mousses et les lichens. Beaucoup sont carnivores ou tout du moins omnivores. Grâce à leur stylet aiguilé, ils aspirent les liquides internes des cellules végétales ou des micro-organismes du sol. Ces animaux passionnent les chercheurs pour leur capacité à survivre aux conditions les plus extrêmes, températures avoisinant les 100° C, radiations ionisantes mais aussi, plus incroyable encore, le vide de l'espace !



Photo Tardigrade © eye of science

Les tardigrades ressemblent à de minuscules ours mesurant moins d'1 mm.

Photo Collembola © Wolfgang



Les collemboles, minuscules insectes sauteurs, jouent un rôle important dans la décomposition de la matière organique.

## Les collemboles, brouteurs infatigables

Ces petits arthropodes à 6 pattes, de quelques millimètres de long, sont connus pour leur capacité à sauter lorsqu'ils se sentent menacés. On les trouve abondamment dans les sols, les litières, les branches mortes et sous toutes les latitudes. Une poignée de sol d'une pâture peut ainsi contenir plusieurs centaines de milliers d'individus. Les espèces sont réparties verticalement. Celles vivant près de la surface présentent des poils et une couleur foncée leur permettant de résister aux rayons du soleil et à la dessiccation. Les espèces souterraines sont souvent dépigmentées et moins protégées de poils et d'écaillés. Brouteurs de bactéries et de champignons, détritivores, ils jouent un rôle important dans la décomposition de la matière organique, dans le contrôle des populations bactériennes mais aussi dans la dispersion des spores chez les mousses.

gions, détritivores, ils jouent un rôle important dans la décomposition de la matière organique, dans le contrôle des populations bactériennes mais aussi dans la dispersion des spores chez les mousses.

Les acariens sont très polyphages et certaines espèces, piqueuses suceuses sont considérées comme des ravageurs des plantes.



Photo acarien © Thomas Shalton

© 2009 Thomas Shalton

## Les acariens, voraces et polyvalents

Ces arachnides sont, avec les collemboles, les arthropodes les plus abondants dans le sol. On peut en comptabiliser plusieurs centaines de milliers par m<sup>2</sup>. Le groupe des acariens est très riche avec plus de 48 000 espèces décrites pour un total estimé entre 400 000 et 900 000 espèces. Adaptés à presque toutes les conditions environnementales, ils ont développé toutes les stratégies alimentaires possibles : prédation, parasitisme, phytophagie... Beaucoup contribuent à la formation de l'humus et ils sont considérés comme de bons indicateurs de l'état biologique du sol.

## Les vers blancs, discrets mais indispensables



Photo enchytraide © www.hugobryard.fr

Les Enchytraeides sont de petits vers blancs, mesurant entre 2 et 20 mm de long. Ils ont de nombreux prédateurs comme les mille-pattes, nématodes, acariens et parasites. Très dépendants de l'humidité, ils peuvent n'être que quelques centaines au m<sup>2</sup> dans les sols secs contre des centaines de milliers dans les sols forestiers humides de conifères.

Environ 700 espèces sont décrites à ce jour. Ces espèces consomment majoritairement des microorganismes et des déchets de matière organique en ingérant directement le sol. Ils jouent un rôle majeur dans les forêts acides où les vers de terre sont absents. Leurs déjections peuvent ainsi constituer une grande proportion des horizons organiques. Leur corps est couvert de récepteurs qui leur permettent de repérer la nourriture, mais aussi d'éviter les substances chimiques qui leur sont toxiques. Cette caractéristique en fait de très bons bio-indicateurs dans les tests éco-toxicologiques.

Les Enchytraeides sont de petits vers blancs dont le rôle est majeur dans les forêts acides.

Les Enchytraeides sont de petits vers blancs dont le rôle est majeur dans les forêts acides.

L'embranchement des arthropodes comprend un grand nombre d'animaux, dont les insectes, les arachnides et les crustacés. Ces invertébrés sont munis d'un exosquelette et leur corps est segmenté et possède des appendices jointifs.

# La macrofaune

Vers de terre, mille-pattes, cloportes, sont souvent mal considérés, voire craints par le jardinier amateur alors qu'ils sont indispensables au bon état des sols.



Photo turricules © Alan Delavie

Les turricules produits par les vers de terre sont particulièrement fertiles.

## Les vers de terre, ingénieurs du sol

On connaît environ 3 000 espèces de vers de terre dont 400 en Europe. Présents dans tous les sols, y compris en antarctique, ils jouent un rôle majeur dans la fertilité des sols. Les vers de terre ingèrent le sol, entre 10 et 30 fois leur poids quotidiennement. Ils redéposent la terre digérée dans le sol ou à la surface sous forme de turricules, véritables trésors pour les jardiniers. Cette terre digérée est structurée et concentrée en éléments nutritifs. Elle peut contenir jusqu'à 5 fois plus d'azote, 7 fois plus de phosphore, et 11 fois plus de potassium que la terre environnante. L'intense production des vers de terre, jusqu'à 20 kg de turricules par m<sup>2</sup> par an sous une prairie permet non seulement d'enrichir, mais aussi de mélanger, d'aérer et de structurer le sol.

On connaît environ 3 000 espèces de vers de terre dont 400 en Europe. Présents dans tous les sols, y compris en antarctique, ils jouent un rôle majeur dans la fertilité des sols.



Photo ver épige © wernbergatmich

Les vers de terre sont divisés en trois groupes selon leur morphologie et leur distribution dans le sol. Les épigés, sont de petits vers colorés qui vivent en surface. Ils ne créent pas de galeries mais fragmentent activement la matière végétale.



Les anéciques sont de gros vers de terre à la tête colorée. Leurs galeries verticales peuvent atteindre plusieurs mètres de long et sont particulièrement attractives pour les racines. Ils laissent leurs déjections à la surface et mélangent au sol les fragments végétaux qu'ils prélèvent. Ce type de ver de terre est très affecté par le travail du sol qui fait chuter durablement sa population.



Photo ver endogé © Phœbétra

Les vers endogés ne remontent quasiment jamais à la surface. Petits et peu colorés, ils ingèrent le sol déjà mélangé à la matière organique. Leurs vastes réseaux de galeries horizontales génèrent une structure grumeleuse très favorable à la fertilité.

## 1 000 pattes et 10 000 espèces

Les myriapodes, appelé communément 1 000 pattes, sont également un élément important de la biodiversité des sols. Les diplopodes possèdent 2 paires de pattes identiques sur la plupart des segments de leurs corps.



Photo mille-pattes © patrice-kegeles.net

En général, ils vivent en surface et sont détritivores, consommant des débris végétaux en décomposition.

Les diplopodes consomment les débris végétaux et apprécient particulièrement les sols calcaires.

Environ 10 000 espèces ont été décrites à ce jour, mais la densité de ces organismes varie considérablement selon les conditions de sol et la teneur en calcaire qui leur est particulièrement favorable.

## Les fourmis, clé de voûte de la biomasse

Les fourmis représentent entre 15 et 25 % de la biomasse animale terrestre. On connaît aujourd'hui plus de 12 500 espèces réparties sur tous les continents à l'exception de l'Antarctique, du Groenland, de l'Islande et d'une partie de la Polynésie et des îles d'Hawaï. Les fourmis occupent un large éventail de niches écologiques, pouvant être herbivores, prédateurs, charognards, mutualistes, parasites mais aussi éleveurs de plantes, de champignons et même d'insectes. L'importance de leur biomasse fait qu'elles influent sur la disponibilité des ressources nutritives et sont souvent définies à ce titre comme des ingénieurs écologiques.



Photo néo-châtaignier-enclos.com

Les fourmis par l'importance de leur biomasse influent de façon significative sur l'équilibre écologique des sols.



Photo cloportes © C. Gauthier - Photosomat.net

Les cloportes décomposent activement la matière organique végétale.

## 14 pattes et une mauvaise réputation

Les cloportes sont des crustacés terrestres présents dans un grand nombre de biotopes. Les quelques 3 600 espèces connues nécessitent toutes un degré d'humidité élevé. S'ils sont très présents en surface, dans les litières de feuilles par exemple, de nombreuses autres espèces préfèrent les horizons profonds du sol. Ces animaux inoffensifs sont de grands décomposeurs, mais sont également la proie de beaucoup d'animaux.

## Les termites, rois du recyclage



Photo termites © University of Florida

Les termites jouent un rôle majeur dans le recyclage de la matière végétale et la fertilité des sols dans les régions tropicales et subtropicales.

Si on n'en compte qu'une dizaine d'espèces en Europe, les termites sont particulièrement abondants dans les régions tropicales et subtropicales. Leur intestin leur permet de digérer la lignocellulose, un composé du bois indigeste pour pratiquement tous les animaux. Chaque année environ 1/3 de tout le matériel végétal produit dans le monde est ainsi consommé par ces insectes. Dans les régions tropicales et subtropicales, les termites jouent un rôle primordial dans le recyclage de la matière organique et dans la fabrication des sols qu'ils drainent, stabilisent et enrichissent grâce à des galeries souterraines. Dans les zones désertiques d'Afrique du Nord ou de l'Ouest, l'activité des termites aide à restaurer les sols dégradés par le surpâturage. En revanche, en Europe et en Amérique du Nord, les termites sont considérés comme nuisibles au regard de leurs dégâts sur les constructions en bois.

# L'union sol-plantes

Les plantes sont intimement dépendantes du sol qui leur fournit eau et substances nutritives. Mais elles influent également sur leur milieu, en modifiant notamment le sol, de manière physique, chimique et même biologique.

## Les plantes pionnières

Comment un sol volcanique, une ancienne carrière, un éboulis ou un sol décapé peuvent-ils devenir fertiles ? Certaines plantes se sont spécialisées dans la colonisation de ces milieux minéraux dépourvus de matière organique. Ces plantes sont dites pionnières. Les bactéries sont les premières à s'installer, suivies par des organismes épiphytes, lichen, puis mousses lorsque les conditions d'humidité deviennent favorables. L'accumulation de cette litière organique permet l'installation d'une microflore qui transforme la nécromasse accumulée et le mélange avec le sol. Les champignons colonisent alors le substrat et avec eux les racines de plantes vasculaires adaptées à ces sols pauvres. Celles-ci, peu résistantes à la concurrence, laisseront la place à d'autres végétaux au fur et à mesure de la colonisation.



Photo: bobo bar, lens © comedia, loggipol.t

Les bouleaux sont des arbres pionniers capables de coloniser des sols pauvres et peu épais.

## Le sol idéal existe-t-il ?

Chacun rêve d'un lopin de terre fertile où tout pousserait sans peine et imagine qu'il existe une terre à la proportion idéale de sable, limon et argile apte à accueillir tout type de culture. C'est ignorer

à quel point le système sol est complexe. Une granulométrie moyenne ne contrebalancera jamais une sécheresse chronique, un déséquilibre chimique ou des pratiques culturales inadaptées. Les conditions pédoclimatiques ont abouti à la formation d'une grande variété de sols où se sont développés des systèmes vivants spécifiques. Plutôt que de rechercher l'image unique et illusoire d'un sol idéal, il vaut mieux apprendre à connaître la terre qui se trouve sous nos pieds et s'y adapter, en choisissant judicieusement les espèces végétales et en développant des pratiques culturales adaptées qui permettront d'entretenir voire de développer sa fertilité. Loin de constituer un handicap, cette diversité est une véritable richesse, valorisée par exemple à travers les notions de terroir et d'appellations contrôlées.

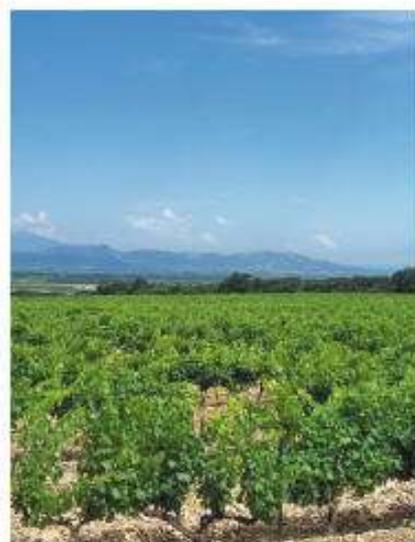


Photo: vigne © Wikipédia

La vigne est attachée à des terroirs de climats et de sols et se plait sur des sols caillouteux peu propices à certaines autres agricultures.

## Les plantes, ingénieurs du sol

La biodiversité souterraine n'est pas l'unique socle de la fertilité des sols. Les plantes interagissent directement avec leurs sols nourriciers. Leur couvert protège les sols de l'érosion, et accueille une grande variété d'organismes. Leurs réseaux de racines fixent et aèrent les sols. Elles modifient l'équilibre chimique par prélèvement et apport de substances. Elles influent également sur la typologie des populations souterraines. Les agriculteurs connaissent parfaitement certaines de ces interactions et ont développé des techniques culturales leur permettant d'améliorer la fertilité de leurs sols grâce aux végétaux qu'ils cultivent. Les engrais verts, par exemple, protègent, structurent et enrichissent le sol. Les plantes nématicides aident à lutter contre les nématodes ravageurs des cultures. Et les plantes répulsives éloignent certains insectes non désirés.



Photo: tréfle blanc © Wikipédia

Le tréfle blanc est une plante naine qui capte l'azote de l'air et enrichit ainsi le sol.

## Toutes les plantes n'aiment pas tous les sols

Toutes les plantes n'ont pas les mêmes besoins en éléments nutritifs, en eau ou en éclaircissement. Si certaines sont tolérantes à des conditions environnementales variées, d'autres ne pousseront que sur des milieux bien définis : secs, humides, acides, calcaires, azotés, ... Ces plantes, attachées à un biotope restreint, sont appelées plantes indicatrices. Leur simple présence permet en effet de caractériser facilement la nature d'un sol.



Photo: solanum nigrum © Wikipédia

Le solanum nigrum (morelle noire) est indicateur d'un sol riche en azote.

## Les sols agricoles, un écosystème menacé

L'agriculture s'est développée il y a environ 10 000 ans. Depuis une soixantaine d'années certains pays ont augmenté les rendements de manière spectaculaire grâce à la chimie, l'irrigation, la mécanisation et la sélection des plantes. Ces pratiques ont cependant un coût environnemental élevé. Le doublement de la production alimentaire mondiale s'est accompagné d'une augmentation de 7 fois des apports d'engrais azotés et de 3,5 fois des engrais phosphatés. Cette agriculture intensive conduit à la dégradation des sols et des ressources naturelles et à une réduction globale de la biodiversité du sol. Les agroécosystèmes ne pourront pas rester productifs encore très longtemps dans de telles conditions. Les mesures qui maintiennent ou qui développent la biodiversité du sol sont au centre de toutes les pratiques qui contribuent à une agriculture durable. Elles reposent sur la préservation de la matière organique, un travail réduit du sol, des cultures intercalaires, la rotation des cultures et la lutte biologique intégrée.



Champs de blé Cevennes.

© www.photo-per-jung.com

# Vivre sans sol ?

Puisque le sol fertile est une ressource rare et menacée, est-il envisageable de produire sans sol ou de le remplacer ?

## Pousser sans sol ?

Toutes les espèces végétales n'ont pas besoin d'un sol pour croître. Les plantes épiphytes, qui représentent quelques 30 000 espèces, se contentent de capter l'humidité atmosphérique, voire les quelques déchets organiques qui s'accumulent à leur base. Mais hormis les mousses et les lichens, présents sous toutes les latitudes, la plupart sont issues des régions tropicales, comme beaucoup d'orchidées ou de broméliacées. Si ces plantes peuvent se révéler de véritables trésors pharmaceutiques, elles ne semblent pas présenter un grand avenir lorsqu'il s'agit de nourrir la population mondiale.



Si les plantes épiphytes n'ont pas besoin de sol, elles ne constituent pas une piste crédible en terme de ressource alimentaire.

© Benigno

## Fabriquer des sols fertiles ?

Certains déchets peuvent être utilisés pour créer des sols artificiels.

De nombreux chercheurs tentent de fabriquer des sols parfaitement adaptés à des problématiques particulières comme la plantation d'arbres en milieu urbain, ou les mélanges allégés pour la végétalisation des toitures. Ces sols peuvent être constitués de matériaux de recyclage, comme des boues d'épuration, des composts, des déchets de papeterie et de l'industrie du bois, du caoutchouc ou encore des gravats.



© www.kitabo.scribd.com

### Attention à l'excès de matière organique

Comme pour les terreaux, certaines formules, très riches en matières organiques produisent de bons résultats les premières années puis s'avèrent de plus en plus déséquilibrées au fil des ans. Leur altération massive produit des structures fragiles et compactes qui à terme influencent négativement la fertilité du substrat.

## Et la mer ?

Les plantes aquatiques, et notamment les algues, sont beaucoup plus prometteuses. Beaucoup se révèlent d'excellents aliments. Riches en vitamines, minéraux, fibres et même protéines, leur consommation est traditionnelle en Asie. Au Japon, elles représentent 10 % des rations alimentaires. La production d'algues progresse régulièrement et aujourd'hui, environ 11 millions de tonnes d'algues sont consommées annuellement. Une micro-algue, appelée Spiruline, à haute valeur nutritionnelle, est utilisée comme complément alimentaire, en particulier dans la lutte contre la malnutrition.



© infoculture.be.org

La spiruline est une micro-algue particulièrement nutritive qui peut aisément être cultivée dans des bassins fortement éclairés et maintenus à 35°C.



Sous réserve d'une bonne alimentation en eau, la fertilité globale du mélange terre-pierre, étudiée depuis plus de 20 ans, semble satisfaisante.

© S. J. J.

## Remplacer les sols ? Des techniques peu durables



Les substrats très riches en matières organiques se dégradent rapidement et nécessitent des remplacements fréquents.

### Le terreau n'est pas du sol

Parce qu'ils ont démontré leur aptitude à la croissance des plantes, on considère souvent que les substrats organiques de type terreaux peuvent avantageusement remplacer les sols naturels. C'est une erreur car ils s'avèrent peu durables. Un sol correctement cultivé produit durant des centaines d'années. À l'inverse, un terreau devra être intégralement remplacé après quelques mois. Pourquoi une telle différence ? Les terreaux sont majoritairement constitués de matières organiques végétales (tourbes, fibres, composts) qui évoluent très vite dans un milieu cultivé. En l'absence d'une fraction minérale stable, et notamment d'argiles, le terreau se décompose sans former le complexe argilo-humique. Il se déstructure, devient compact, imperméable et impropre à la culture.

### Laines de roche et fibres de coco

D'autres techniques misent sur les supports inertes, de type laine de roche ou fibre de coco. Ces matériaux fournissent aux plantes un support aéré propice au développement de leurs racines mais n'apportent aucune substance nutritive rendant indispensables les systèmes de fertilisation intensive. Beaucoup de fraises, de concombres et de tomates sont ainsi produits sans n'avoir jamais été en contact avec le moindre sol. Outre la consommation intensive d'engrais chimiques propres à ces techniques, se pose la question du recyclage de ces matériaux à très courte durée de vie.

Les techniques de production hors sols sont particulièrement efficaces mais très consommatrices d'engrais et productrices de nombreux déchets.



© Agri France

## Préférer la stabilité et la pauvreté

Les sols fabriqués les plus prometteurs semblent ceux qui privilégient une structure poreuse stable, souvent au détriment de la fertilité immédiate. Une forte proportion de matériaux inertes à granulométrie grossière, assortie d'une couche supérieure à l'activité organique intense permettrait d'espérer que ces mélanges évoluent vers des organisations durables.

Le mélange terre-pierre fait partie de ces sols fabriqués. Très utilisé pour planter les arbres en milieu urbain, il est constitué à 70 % de gros cailloux de type pouzzolane et de 30 % de terre végétale. Il est particulièrement résistant au compactage, mais pauvre au niveau de ses réserves nutritives et hydriques.

# La ville fertile : une ville rêvée ?

En Europe, 80 % de la population vit en zone urbanisée. Cette situation génère des préoccupations en matière de développement durable, qui ont fait naître le concept de ville fertile, sorte de cité idéale pourvoyeuse de nature, de biodiversité, mais aussi de denrées alimentaires. Quelle est la part de rêve dans ce concept ?

## Les sols urbains

Les sols urbains sont généralement considérés comme peu fertiles. Ils sont fréquemment compactés, imperméabilisés, mélangés à des matériaux de remblais, mités de multiples réseaux souterrains et pollués par les hydrocarbures, les sels et les métaux lourds. Y faire pousser des végétaux est généralement un gageure. Lorsqu'une mise en culture est envisagée, la solution habituelle est l'apport de matériaux découpés d'une zone agricole. Ces apports exogènes se font parfois sur de grandes épaisseurs, 1 mètre et plus pour la plantation d'arbres. Les sols urbains sont extrêmement perturbés par les multiples aménagements qu'ils reçoivent.



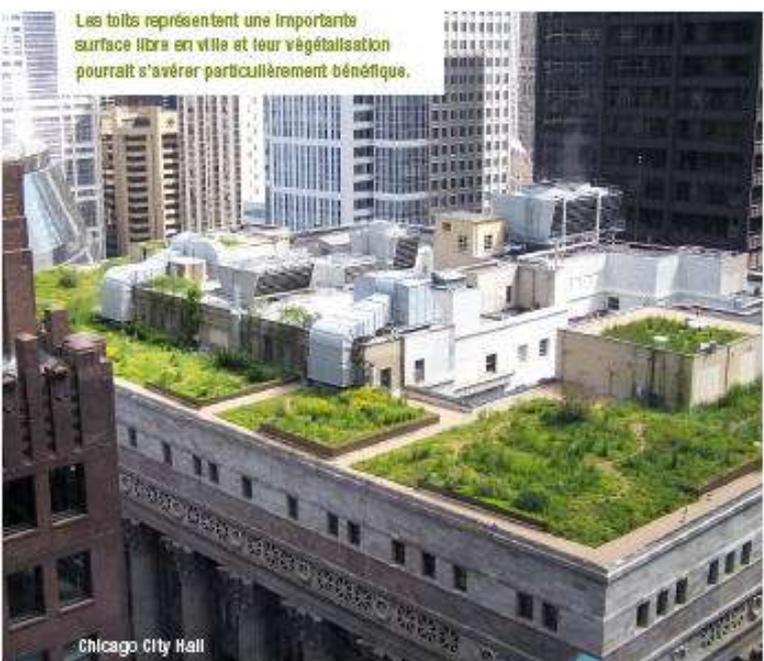
Extension de réseau à Vénissieux.

© www.ville-vert.com/soil

## Végétaliser les toits

Les toits présentent un véritable potentiel lorsqu'il s'agit de faire entrer la nature en ville. Outre leur aspect esthétique et leur apport en terme de biodiversité, les toitures végétalisées présentent trois intérêts majeurs : amélioration de la performance thermique des bâtiments, rétention et filtration des eaux pluviales, lutte contre l'augmentation de la température en milieu urbain.

Les toits représentent une importante surface libre en ville et leur végétalisation pourrait s'avérer particulièrement bénéfique.

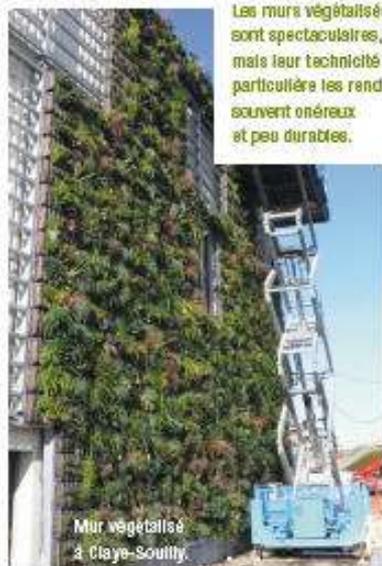


Chicago City Hall

© www.ourgreenhouse.com

## Végétaliser les murs

Depuis quelques années, les systèmes de végétalisation verticales tendent à se multiplier. Outre son aspect esthétique, végétaliser les murs présente en effet un véritable intérêt théorique : régulation thermique des bâtiments, limitation du réchauffement urbain, création de corridors écologiques reliant les habitats entre eux. Mais les aménagements proposés, souvent spectaculaires, s'avèrent onéreux et peu durables. Ils nécessitent l'utilisation de substrats horticoles et de systèmes complexes d'arrosage. La traditionnelle plante grimpante économe en terre et en eau, tels le lierre et la vigne-vierge, devrait donc continuer à faire recette dans les années qui viennent.



Mur végétalisé à Claye-Souilly.

2012 élan.org

## Vers une agriculture urbaine ?

Afin de répondre à l'urbanisation et au besoin de sécurité alimentaire, l'agriculture urbaine est une des solutions proposée par la FAO (organisme des Nations Unies en charge de l'agriculture et de l'alimentation). L'idée est de produire localement, souvent sous forme associative ou individuelle. Bien que le développement de l'agriculture urbaine se heurte à la pénurie de terres et à leur mauvaise qualité (fertilité, pollution), beaucoup d'expérimentations voient le jour. Les Jardins ouvriers ou Jardins Familiaux, connaissent un engouement sans précédent. De nombreuses opérations immobilières intègrent maintenant cet élément dans leur programme d'aménagement. Nombre de jardins partagés sont installés en ville, sur des friches ou dans des jardins publics. D'autres expérimentations prennent place sur des toits, comme à New York, ou plus proche, sur le toit d'AgroParisTech au plein cœur du 5<sup>ème</sup> arrondissement.

Une ferme urbaine à Chicago : la production locale, ici en plein cœur de Chicago, présente un intérêt économique, écologique mais aussi social.



© L'Espresso

La ville de Todmorden en Angleterre vit une véritable révolution verte depuis 2008, date à laquelle des cultures de plantes à partager (aromatiques et légumes) ont commencé à parsemer la ville et sont mis à disposition de chacun. Cette initiative s'est même exportée en France sous le nom d'"Incroposables comestibles", à Nantes en particulier. Peut-être une révolution sociale et culturelle est-elle en marche ?



Todmorden community box © Ardis Mathias

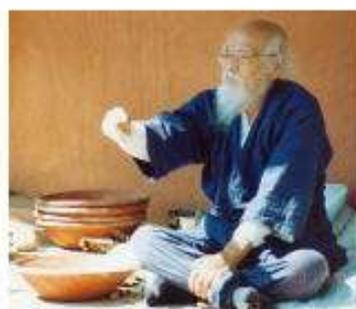
Un bac de légumes à partager à Todmorden en Angleterre

# Préserver les sols

Aujourd'hui, l'agriculture intensive est montrée du doigt, accusée de provoquer érosion, pollutions, tassement, lessivage, perte de matière organique et fragilisation des biotopes. D'autres modèles émergent et semblent plus économiques et plus durables.

## Cultiver autrement

De nombreuses initiatives présentent des modèles alternatifs à l'agriculture intensive. L'agriculture de conservation, largement pratiquée dans le monde mais pourtant méconnue en France, propose de concilier une production abondante et durable sur la base d'un principe simple : un sol toujours à couvert et jamais bouleversé. La permaculture, ou agriculture naturelle, est une démarche parente qui s'appuie sur une approche systémique globale tenant compte des relations entre les différents éléments constituant le système écologique et ses capacités d'évolution. La permaculture repose sur 4 principes. Le premier est de proscrire le travail du sol pour laisser faire les racines des plantes et l'activité biologique. Le second est de remplacer les fertilisants par les ressources locales tels que les engrais verts, les résidus de culture et les fientes des volailles vivant sur place. Le troisième principe est de ne pas désherber mais de simplement contrôler les herbes non désirées. Le dernier principe est de n'apporter aucun produit chimique, et notamment aucun pesticide, en privilégiant un environnement sain et des plantes vigoureuses.



Le japonais, Masanobu Fukuoka, microbiologiste et phytopathologiste de formation, est l'auteur de *La révolution d'un seul brin de paille*, qui pose les principes de la permaculture.

Cet ouvrage s'inspire de plus de 50 années d'expérimentation réussie menée dans sa ferme de Ilie de Shikoku.

## Associer les plantes

Le compagnonnage végétal, ou cultures associées, est une technique essentiellement maraîchère consistant à associer des plantes susceptibles de s'échanger divers services : fertilisation, action répulsive, toxique, ... Ainsi, les légumineuses enrichissent les sols en azote, l'armoise inhibe la germination des graines, l'aneth attire les auxiliaires, tandis que l'all limite les attaques d'oïdium et éloigne les ravageurs ou que la capucine concentre les pucerons qui épargnent alors les cultures avoisinantes.



Les 3 sœurs des Amérindiens, courge, maïs et haricot grimpant sont un exemple de compagnonnage. Le haricot fertilise le sol, le maïs supporte le haricot et la courge couvre le sol.

© Wikipédia

## Changer de végétaux

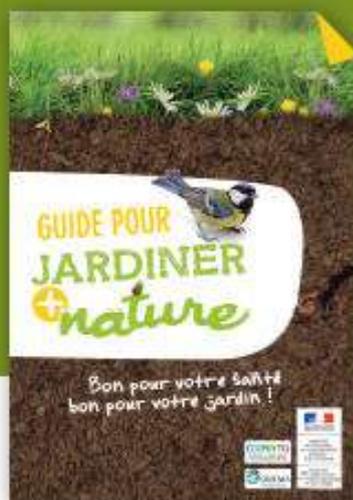
L'agriculture intensive repose sur des méthodes culturales, des intrants et la sélection variétale. Depuis plusieurs années, la question des semences est au centre de nombreux débats. Les variétés commercialisées sont accusées d'être fragiles (nécessité d'utiliser des intrants), non reproductibles par l'agriculteur (variétés stériles, non fixées ou protégées par des droits), ou potentiellement dangereuses pour l'environnement (Organismes Génétiquement Modifiés). Parallèlement, un courant de valorisation des variétés anciennes et locales se développe, afin de promouvoir des plantes librement diffusables et adaptées aux écosystèmes dans lesquelles elles prendront place. De nombreuses associations œuvrent à la diffusion et à la protection de ces variétés locales, comme par exemple, l'association Graine de Noé qui promeut des variétés anciennes de céréales.



© Wikipédia

La France est le premier pays producteur de semences protégées en Europe et le deuxième exportateur mondial, derrière les Pays-Bas et avant les États-Unis. Cette industrie est au centre de nombreuses polémiques.

## Connaitre et respecter son sol



Le jardinier amateur doit sauvegarder le sol placé sous sa responsabilité afin de le transmettre aux générations futures. Cet enjeu, et notamment la limitation des pesticides est devenu un objectif national. De nombreuses initiatives peuvent l'aider dans cette démarche.

Le site *jardiner autrement*, est par exemple une mine d'idées.

Le *Guide pour jardiner plus nature*, édité par le ministère de l'écologie est facilement téléchargeable.

# Les sols fertiles : essentiels mais menacés

Les sols fertiles forment une ressource naturelle non renouvelable à l'échelle humaine. Indispensables aux hommes et aux écosystèmes, ils sont au cœur d'enjeux essentiels et pourtant contradictoires.

## Nourrir les hommes

Seuls 17% des terres émergées sont cultivables.



**83%** des terres émergées ne sont pas adaptées à la production alimentaire pour des raisons de climats (désertiques, polaires, montagneux), ou de nature des sols (trop rocheux, trop humides, trop escarpés, etc.).

L'augmentation de la population mondiale (vraisemblablement 10 milliards en 2050 contre 6 milliards à l'heure actuelle), ainsi que l'élévation probable de son niveau de vie, impliquent a minima le doublement des besoins nets en alimentation et en énergie. La mise en culture des terres potentiellement cultivables est donc un enjeu majeur des années à venir. Ces réserves de sols fertiles se situent principalement en Afrique subsaharienne, en Amérique du sud et Amérique centrale.



L'Amérique du sud et centrale (ici, le sud du Brésil), représente un immense réservoir en sols fertiles.

La France bénéficie d'une situation exceptionnelle puisque plus de 50% de son territoire est cultivé ou enherbé (prairies permanentes). Le potentiel de développement de sa surface agricole est par ailleurs estimé à presque 50%.

## Accueillir la biodiversité

Les sols abritent une biodiversité faunistique et microbienne particulièrement riche bien que méconnue. Cette richesse écologique, socle de leur fertilité rend également des services écologiques divers, et parfois surprenants. Ainsi, bon nombre d'antibiotiques sont issus de bactéries du sol. Et sait-on que beaucoup d'insectes pollinisateurs se développent dans le sol au stade larvaire.



Comme beaucoup de pollinisateurs, l'abeille des citrouilles fait son nid dans le sol.

## Réguler, stocker et filtrer l'eau

La porosité des sols permet à l'eau de s'infiltrer. En se comportant comme des éponges, les sols jouent un rôle crucial vis-à-vis des crues et de l'érosion. Par ailleurs, l'eau qui s'infiltré est stockée et mise à disposition de la biomasse du sol. Le surplus d'eau passe dans le sous-sol et alimente les nappes phréatiques. À l'aide des plantes et des organismes qu'il abrite, le sol, durant ce processus, assure une véritable épuration de l'eau en dégradant ou en immobilisant de multiples polluants qui s'y trouvent.

Le lac Monroe au Canada



Les sols jouent un rôle majeur dans la régulation, le stockage et l'épuration de l'eau.

## Stocker le carbone

Il est admis qu'au niveau mondial, les sols contiennent 2 fois plus de carbone que l'atmosphère et 3 fois plus que celui contenu dans la végétation. La baisse de la matière organique des sols, en relâchant du gaz carbonique, gaz à effet de serre, contribue directement au réchauffement climatique.

Les sols stockent presque 3 fois plus de carbone que la végétation.

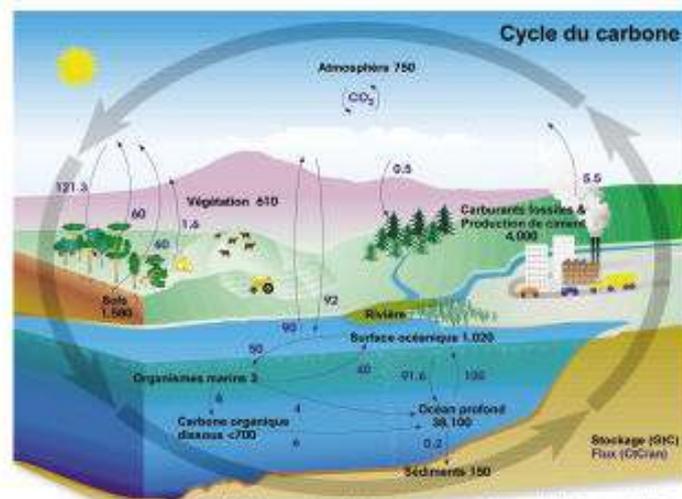


Fig. S.19 - Schéma montrant le cycle du carbone. Les nombres sont indiqués en milliards de tonnes de carbone (soit 10<sup>12</sup> kg) dans différents réservoirs, en milliards de tonnes de CO<sub>2</sub> = équivalent carbonique de carbone et les données sont pour 2004. Les nombres positifs indiquent les flux sortants de carbone entre les réservoirs. Les valeurs négatives indiquent les flux entrants. Les données ne sont pas incluses dans le diagramme, s'ajoutent pas les ~20 milliards GtC de roches carbonatées et de karstiques (MAG)

## Les sols menacés de toutes parts

L'érosion et l'urbanisation détruisent des dizaines de milliers de km<sup>2</sup> de sols chaque année. Les pesticides, hydrocarbures, solvants, boues et métaux lourds polluent les sols et les nappes phréatiques. L'agriculture intensive, en privilégiant la mécanisation et les intrants engendre le compactage, la salinisation, des pollutions diffusées, une perte de matière organique et une chute de la biodiversité des sols.

En Europe, des milliers de km<sup>2</sup> de sols fertiles sont détruits chaque année du fait de l'urbanisation et du tassement des sols.



# Le sol : un continent à explorer

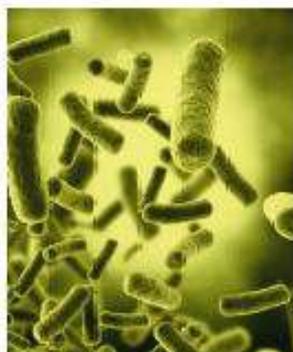
Un simple mètre carré de sol accueille souvent des centaines de milliers, voire des millions d'espèces différentes dont beaucoup nous sont encore inconnues.

## Une biodiversité stupéfiante

L'énorme variété des sols et des conditions environnementales (composition, organisation, humidité, température, équilibres chimiques, modes de gestion), génère une multitude de niches écologiques à l'origine d'une biodiversité stupéfiante et méconnue.

Les plus petits organismes, bactéries, champignons, algues, nématodes, protozoaires, sont les plus nombreux, les plus diversifiés mais aussi les moins connus. Un mètre carré de sol peut ainsi abriter plus de 100 000 espèces différentes de bactéries et des milliards d'individus. Il en est de même pour les champignons des sols, particulièrement abondants et méconnus, puisqu'on estime à seulement 5 % les espèces décrites à ce jour.

Les tout petits animaux, acariens et collembolles sont également abondamment représentés par dizaines voire par centaines d'espèces, dont bon nombre restent encore à décrire. La macrofaune visible à l'œil nu (vers de terre, termites, fourmis et larves d'insectes) se compte fréquemment par centaines d'individus par mètre carré. Une prairie permanente en zone tempérée abrite ainsi environ 1 500 kg par hectare de faune cachée, soit environ le poids de 50 moutons.



Les bactéries sont particulièrement abondantes dans les sols.

Bactéries et champignons sont particulièrement abondants dans les sols bien que très mal connus.

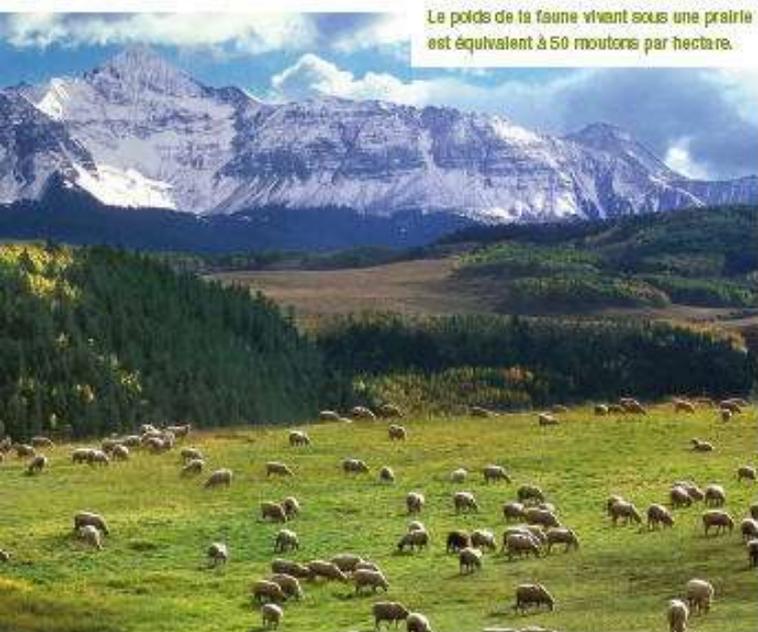


## Les ingénieurs du sol

La biodiversité du sol représente une énorme machinerie biologique d'une complexité qui défie encore nos connaissances et notre compréhension. Cependant, il apparaît de plus en plus évident que le bon fonctionnement d'un sol et sa fertilité sont indissociables de cette activité biologique. Cette vie grouillante, majoritairement microscopique, s'établit dans les vides du sol afin d'y trouver l'eau et l'air nécessaires. Chaque espèce fait partie d'une chaîne alimentaire complexe et assure des fonctions variées.

Ainsi, une cohorte d'organismes, en particulier bactéries et champignons, produit des acides organiques qui permettent l'altération des roches. Certains de ces organismes émettent des sortes de colles ou des filaments qui maintiennent les particules du sol entre elles. Des cyanobactéries fixent le carbone atmosphérique et enrichissent le sol en azote. Tandis que les vers de terre, myriapodes ou divers insectes régulent les populations de microorganismes, réorganisent et aèrent le sol, fragmentent et dégradent la matière organique.

Le poids de la faune vivant sous une prairie est équivalent à 50 moutons par hectare.



## Une biodiversité au service de tous

L'activité biologique des sols influe de manière déterminante sur notre environnement. Outre son impact sur la fertilité des sols et donc sur notre alimentation, elle conditionne fortement le stockage et l'épuration de l'eau ainsi que le stockage et l'émission de carbone.

Par ailleurs, cette biodiversité représente une immense ressource biotechnologique qui reste encore à explorer mais dont il a déjà été tiré de nombreux bénéfices. La pénicilline et certains stéroïdes comme la cortisone sont ainsi issus de champignons du sol. De nombreux enzymes, solvants ou détergents sont issus de bactéries ou de champignons du sol. Le traitement des eaux usées ou de certaines pollutions se fait à l'aide de bactéries du sol. Le champ médical et industriel restant à explorer est immense.

Les organismes du sol sont de grands pourvoyeurs de produits pharmaceutiques et biotechnologiques.



# Microfaune et microorganismes

Les bactéries et les nématodes, bien que microscopiques, sont les grands transformateurs de la matière organique.



## Les bactéries, des organismes tout terrain

Grâce à leur grande variabilité génétique, les bactéries sont des organismes unicellulaires particulièrement adaptables, que l'on retrouve dans tous les types de milieux y compris les plus extrêmes. Lorsque l'environnement change, leur population peut diminuer brutalement.

Mais ces organismes ont développé des formes de dormance très résistantes qui leur permettent de renaître dès que les conditions leur sont à nouveau favorables. Il existe une multitude d'espèces de bactéries du sol, dont la plupart sont encore inconnues.



## Gourmandes en sucres et généreuses en azote

Dans les sols, les bactéries sont souvent associées à la matière organique et aux racines de végétaux. Elles y trouvent les sucres dont elles ont besoin. Elles sont donc généralement plus abondantes dans les horizons superficiels. Elles transforment les matières organiques déjà bien fragmentées mais sont également championnes de la symbiose. Elles peuvent s'allier à toutes sortes d'organismes. Les lichens sont ainsi le résultat d'une alliance entre une algue, un champignon et une cyanobactérie. Certaines bactéries s'associent aux racines des plantes. Elles captent alors l'azote atmosphérique et le mettent à disposition des plantes qui leur fournissent des sucres en retour.

Les racines de légumineuses présentent des nodosités (sortes de kystes) typiques d'une symbiose avec une bactérie fixatrice d'azote.

Les nématodes ressemblent à de petits vers filiformes et sont particulièrement abondants dans le sol en quantité et en nombre d'espèces.



## Les nématodes, maillons de la chaîne alimentaire

Les nématodes ont la forme de minces tubes multicellulaires, tels des vers filiformes. Hormis certains parasites d'animaux, ils sont petits voire microscopiques et vivent dans l'eau du sol.

Après les bactéries, ce sont les organismes les plus abondants du sol : jusqu'à 10 millions d'individus par m<sup>2</sup> de sol cultivé. Leur diversité est également remarquable, puisqu'on estime qu'environ 30 000 espèces, soit seulement 5% des nématodes, sont actuellement décrites. On retrouve ces organismes dans les environnements les plus variés et les plus extrêmes, y compris en Antarctique, dans les déserts ou dans la mer.



## Des alliés contre les ravageurs des cultures

Les nématodes ont développé de multiples stratégies alimentaires. Certains broutent les bactéries, participant à la régulation de ces populations. D'autres broutent les champignons, ce qui peut avoir un effet positif sur les plantes lorsqu'il s'agit de champignons pathogènes, ou négatif lorsqu'il s'agit de champignons mycorhiziens. D'autres sont phytophages et sont alors connus comme des ravageurs. Quelques-uns sont même des parasites.

Les nématodes sont un maillon essentiel de la chaîne alimentaire. La plupart des espèces sont bénéfiques à la fertilité des sols et l'agriculture biologique a même appris à utiliser certaines espèces parasites pour lutter contre les larves de hannetons, d'otiorhynques, de tipules ou de limaces.

Certains nématodes sont utilisés pour lutter contre les vers blancs ou gris. Ils pénètrent dans la larve et l'infectent grâce à des bactéries. La larve meurt et sert de réceptacle à une nouvelle génération de nématodes.

## Capables de photosynthèse ?

Certaines bactéries appelées cyanobactéries présentent la particularité d'être capables de photosynthèse ce qui leur permet de capter le carbone atmosphérique et de pourvoir à leurs besoins en sucres. Particulièrement résistantes aux conditions extrêmes de sécheresse et d'éclairement, elles sont présentes à la surface de la plupart des sols de la planète. Ces micro-organismes jouent un rôle important dans la fertilité des sols. Ils améliorent sensiblement la structure des sols et leur capacité de rétention d'eau. Par ailleurs, ils jouent un rôle fertilisant non négligeable puisque leur apport annuel en azote est évalué à environ 10 à 25 kg par hectare. Elles sont par exemple connues pour jouer un rôle fondamental dans la fertilité des rizières.



Les cyanobactéries jouent un rôle fondamental dans la fertilité des rizières.

## Les rotifères, pour épurer l'eau

Les rotifères sont également très représentés dans les couches supérieures des sols. On peut dénombrer des populations supérieures à 2 millions d'individus au m<sup>2</sup> dans certains sols humides. Ces animaux aquatiques de moins d'un demi millimètre de long sont munis de cils qui leur permettent d'être mobiles. Ils sont souvent microphages, se nourrissant de films bactériens ou de particules en suspension dans l'eau. Certains sont des parasites, notamment des vers de terre. En général, ils sont la proie de beaucoup de microorganismes, nématodes, vers plats ou tardigrades et ne sont pas considérés comme un groupe clé du fonctionnement éco-systémique du sol. En revanche, ils sont fréquemment utilisés pour maintenir ou rétablir la pureté de l'eau, par exemple en aquariophilie ou dans les bassins de décantation des stations d'épuration.



Les rotifères sont largement utilisés en aquariophilie pour leur capacité à digérer bactéries et matières en suspension dans l'eau.

# Indispensables champignons

## Le règne des champignons

Les champignons sont des organismes très différents des végétaux. Ils forment d'ailleurs un règne à part. Dépourvus de tiges, de feuilles, de racines et de fonction chlorophyllienne, ils sont constitués de cellules groupées sous forme de filaments microscopiques appelés hyphes. Ces filaments se faufilent, se ramifient et fusionnent jusqu'à former un réseau étendu appelé mycélium. Seuls quelques champignons produisent des organes aériens visibles à l'œil nu. Morilles, cèpes, veisse de loup, ne sont que la partie visible d'un organisme souterrain bien plus étendu. Un seul gramme de sol comprend des centaines de mètres d'hyphes. Certains mycéliums peuvent atteindre des tailles vertigineuses. Par exemple, le mycélium d'un individu d'armillaire a été capable de couvrir une aire de plus de 890 hectares dans une forêt d'Amérique !



Les morilles, très appréciées pour leurs qualités gustatives, sont la partie visible d'un champignon du sol.

© Christian de Haugmaere

## Apporter des nutriments aux plantes

Les champignons sont de grands décomposeurs de la matière organique notamment de matériaux complexes comme la lignine et la cellulose des végétaux, difficilement digérables par les bactéries. Ce faisant, ils libèrent des éléments essentiels à la nutrition des plantes. De plus, certains d'entre eux produisent des substances qui rendent disponibles des éléments du sol comme le fer ou le phosphore.

Les champignons dégradent la lignine et la cellulose des végétaux et libèrent des éléments essentiels à la nutrition des microorganismes et des végétaux.



© J. Baccé

## Structurer le sol

Le mycélium, véritable toile d'araignée souterraine, emballe les agrégats, les colle et les relie entre eux et contribue ainsi à la structuration des sols, leur stabilité et la prévention de l'érosion. Particulièrement présents dans les systèmes forestiers, les champignons du sol sont très perturbés par certaines interventions comme le pâturage, le retournement du sol, la fertilisation ou l'arrosage, qui peuvent engendrer une chute de la population ou un changement de sa composition.

Les hyphes des champignons emballent les agrégats du sol et les relient entre eux.



© Urban Européenne 2013

## S'allier aux racines

Alors que seuls certains végétaux s'associent à des bactéries, 90% des espèces végétales s'associent à des champignons du sol. Ces associations mutualistes sont proches de la symbiose et sont appelées mycorhizes. Les hyphes des champignons colonisent les racines des végétaux et le sol alentour. Le champignon reçoit les sucres et les vitamines dont il a besoin et restitue en retour au végétal de l'eau et des nutriments, notamment phosphate et azote. Il sert également de barrière contre d'éventuels bio-agresseurs. Ce système permet de démultiplier le volume exploité par le système racinaire des plantes.



© Urban Européenne 2013

Le volume de sol exploité par la plante (parties blanches) est démultiplié car prolongé et complété par les hyphes du champignon compagnon.

## Guerre et paix en sous-sol

La plupart des champignons mycorhiziens sont peu spécifiques d'une espèce et d'un sol. On estime que seulement 200 espèces de champignons colonisent 80 % des plantes vasculaires terrestres, c'est-à-dire plus de 400 000 espèces. Ces champignons montrent une grande adaptabilité et les associations formées sont complexes et instables. Il arrive même qu'un champignon se révèle bénéfique pour une plante à un instant et pathogène à un autre, suivant son stade de développement, les conditions du milieu ou l'espèce de la plante support.



Les racines (brunes) d'un épicéa glauque (Picea glauca) sont associées au mycélium (blanc) d'un champignon mycorhizien.

© A. Pizard

De nombreux essais ont été réalisés afin de recréer artificiellement des compagnonnages racines/champignons. Quelques tentatives ont été de vraies réussites. C'est ainsi qu'a été développée la trufficulture qui a même pu s'exporter en Nouvelle Zélande grâce à des plants mycorhizés. Mais le plus souvent, le contexte sol est dominant. Dans la grande majorité des cas, l'association qui se développe après la plantation se fait avec un champignon indigène déjà présent dans le sol.



© Wazoube

Des plants mycorhizés plantés en Nouvelle Zélande commencent à produire des truffes.

# La mésofaune

Une multitude de petits organismes peuple les sols. Ceux dont la taille avoisine le millimètre sont classés dans la mésofaune. Certains sont très étranges et beaucoup restent à découvrir.

## Des tardigrades dans l'espace

Ces petits animaux mesurent en général moins d'un millimètre. Leur étrange morphologie les fait ressembler à un minuscule ours. Leur nom (tardus : lent, grado : marcheur) vient de leur extrême lenteur à se déplacer. Les tardigrades terrestres vivent en général à la surface des sols, dans les mousses et les lichens. Beaucoup sont carnivores ou tout du moins omnivores. Grâce à leur stylet algues, ils aspirent les liquides internes des cellules végétales ou des micro-organismes du sol. Ces animaux passionnent les chercheurs pour leur capacité à survivre aux conditions les plus extrêmes, températures avoisinant les 100° C, radiations ionisantes mais aussi, plus incroyable encore, le vide de l'espace !



Photo Tardigrade © eye of science

Les tardigrades ressemblent à de minuscules ours mesurant moins d'1 mm.

Photo Collembolle © Wikipédia



Les collembolles, minuscules insectes sauteurs, jouent un rôle important dans la décomposition de la matière organique.

## Les collembolles, brouteurs infatigables

Ces petits arthropodes à 6 pattes, de quelques millimètres de long, sont connus pour leur capacité à sauter lorsqu'ils se sentent menacés. On les trouve abondamment dans les sols, les litières, les branches mortes et sous toutes les latitudes. Une poignée de sol d'une pâture peut ainsi contenir plusieurs centaines de milliers d'individus. Les espèces sont réparties verticalement. Celles vivant près de la surface présentent des poils et une couleur foncée leur permettant de résister aux rayons du soleil et à la dessiccation. Les espèces souterraines sont souvent dépigmentées et moins protégées de poils et d'écaillies. Brouteurs de bactéries et de champignons, détritivores, ils jouent un rôle important dans la décomposition de la matière organique, dans le contrôle des populations bactériennes mais aussi dans la dispersion des spores chez les mousses.

gions, détritivores, ils jouent un rôle important dans la décomposition de la matière organique, dans le contrôle des populations bactériennes mais aussi dans la dispersion des spores chez les mousses.

Les acariens sont très polyphages et certaines espèces, piqueuses suceuses sont considérées comme des ravageurs des plantes.



Photo acarien © Thomas Shalton

© 2009 Thomas Shalton

## Les acariens, voraces et polyvalents

Ces arachnides sont, avec les collembolles, les arthropodes les plus abondants dans le sol. On peut en comptabiliser plusieurs centaines de milliers par m<sup>2</sup>. Le groupe des acariens est très riche avec plus de 48 000 espèces décrites pour un total estimé entre 400 000 et 900 000 espèces. Adaptés à presque toutes les conditions environnementales, ils ont développé toutes les stratégies alimentaires possibles : prédation, parasitisme, phytophagie... Beaucoup contribuent à la formation de l'humus et ils sont considérés comme de bons indicateurs de l'état biologique du sol.

## Les vers blancs, discrets mais indispensables



Photo enchytraeide © www.hugobonard.fr

Les Enchytraeides sont de petits vers blancs, mesurant entre 2 et 20 mm de long. Ils ont de nombreux prédateurs comme les mille-pattes, nématodes, acariens et parasites. Très dépendants de l'humidité, ils peuvent n'être que quelques centaines au m<sup>2</sup> dans les sols secs contre des centaines de milliers dans les sols forestiers humides de conifères.

Environ 700 espèces sont décrites à ce jour. Ces espèces consomment majoritairement des microorganismes et des déchets de matière organique en ingérant directement le sol. Ils jouent un rôle majeur dans les forêts acides où les vers de terre sont absents. Leurs déjections peuvent ainsi constituer une grande proportion

Les Enchytraeides sont de petits vers blancs dont le rôle est majeur dans les forêts acides.

des horizons organiques. Leur corps est couvert de récepteurs qui leur permettent de repérer la nourriture, mais aussi d'éviter les substances chimiques qui leur sont toxiques. Cette caractéristique en fait de très bons bio-indicateurs dans les tests éco-toxicologiques.

**L'embranchement des arthropodes** comprend un grand nombre d'animaux, dont les insectes, les arachnides et les crustacés. Ces invertébrés sont munis d'un exosquelette et leur corps est segmenté et possède des appendices jointifs.

# La macrofaune

Vers de terre, mille-pattes, cloportes, sont souvent mal considérés, voire craints par le jardinier amateur alors qu'ils sont indispensables au bon état des sols.



Photo turricules © Alan Delavie

Les turricules produits par les vers de terre sont particulièrement fertiles.

## Les vers de terre, ingénieurs du sol

On connaît environ 3 000 espèces de vers de terre dont 400 en Europe. Présents dans tous les sols, y compris en antarctique, ils jouent un rôle majeur dans la fertilité des sols. Les vers de terre ingèrent le sol, entre 10 et 30 fois leur poids quotidiennement. Ils redéposent la terre digérée dans le sol ou à la surface sous forme de turricules, véritables trésors pour les jardiniers. Cette terre digérée est structurée et concentrée en éléments nutritifs. Elle peut contenir jusqu'à 5 fois plus d'azote, 7 fois plus de phosphore, et 11 fois plus de potassium que la terre environnante. L'intense production des vers de terre, jusqu'à 20 kg de turricules par m<sup>2</sup> par an sous une prairie permet non seulement d'enrichir, mais aussi de mélanger, d'aérer et de structurer le sol.

On connaît environ 3 000 espèces de vers de terre dont 400 en Europe. Présents dans tous les sols, y compris en antarctique, ils jouent un rôle majeur dans la fertilité des sols.



Photo vers épigés © wernshagenbach

Les vers de terre sont divisés en trois groupes selon leur morphologie et leur distribution dans le sol. Les épigés, sont de petits vers colorés qui vivent en surface. Ils ne créent pas de galeries mais fragmentent activement la matière végétale.



Les anéciques sont de gros vers de terre à la tête colorée. Leurs galeries verticales peuvent atteindre plusieurs mètres de long et sont particulièrement attractives pour les racines. Ils laissent leurs déjections à la surface et mélangent au sol les fragments végétaux qu'ils prélèvent. Ce type de ver de terre est très affecté par le travail du sol qui fait chuter durablement sa population.



Photo ver endogé © Phœbétra

Les vers endogés ne remontent quasiment jamais à la surface. Petits et peu colorés, ils ingèrent le sol déjà mélangé à la matière organique. Leurs vastes réseaux de galeries horizontales génèrent une structure grumeleuse très favorable à la fertilité.

## 1 000 pattes et 10 000 espèces

Les myriapodes, appelé communément 1 000 pattes, sont également un élément important de la biodiversité des sols. Les diplopodes possèdent 2 paires de pattes identiques sur la plupart des segments de leurs corps.



Photo mille-pattes © patricja-krugma-zet

En général, ils vivent en surface et sont détritivores, consommant des débris végétaux en décomposition.

Les diplopodes consomment les débris végétaux et apprécient particulièrement les sols calcaires.

Environ 10 000 espèces ont été décrites à ce jour, mais la densité de ces organismes varie considérablement selon les conditions de sol et la teneur en calcaire qui leur est particulièrement favorable.

## Les fourmis, clé de voûte de la biomasse

Les fourmis représentent entre 15 et 25 % de la biomasse animale terrestre. On connaît aujourd'hui plus de 12 500 espèces réparties sur tous les continents à l'exception de l'Antarctique, du Groenland, de l'Islande et d'une partie de la Polynésie et des îles d'Hawaï. Les fourmis occupent un large éventail de niches écologiques, pouvant être herbivores, prédateurs, charognards, mutualistes, parasites mais aussi éleveurs de plantes, de champignons et même d'insectes. L'importance de leur biomasse fait qu'elles influent sur la disponibilité des ressources nutritives et sont souvent définies à ce titre comme des ingénieurs écologiques.



Photo néo-châtaignier-enclosure.com

Les fourmis par l'importance de leur biomasse influent de façon significative sur l'équilibre écologique des sols.



Photo cloportes © C. Gauthier - Photosurmatant

## 14 pattes et une mauvaise réputation

Les cloportes sont des crustacés terrestres présents dans un grand nombre de biotopes. Les quelques 3 600 espèces connues nécessitent toutes un degré d'humidité élevé. S'ils sont très présents en surface, dans les litières de feuilles par exemple, de nombreuses autres espèces préfèrent les horizons profonds du sol. Ces animaux inoffensifs sont de grands décomposeurs, mais sont également la proie de beaucoup d'animaux.

Les cloportes décomposent activement la matière organique végétale.

## Les termites, rois du recyclage



Photo termites © University of Florida

Les termites jouent un rôle majeur dans le recyclage de la matière végétale et la fertilité des sols dans les régions tropicales et subtropicales.

Si on n'en compte qu'une dizaine d'espèces en Europe, les termites sont particulièrement abondants dans les régions tropicales et subtropicales. Leur intestin leur permet de digérer la lignocellulose, un composé du bois indigeste pour pratiquement tous les animaux. Chaque année environ 1/3 de tout le matériel végétal produit dans le monde est ainsi consommé par ces insectes. Dans les régions tropicales et subtropicales, les termites jouent un rôle primordial dans le recyclage de la matière organique et dans la fabrication des sols qu'ils drainent, stabilisent et enrichissent grâce à des galeries souterraines. Dans les zones désertiques d'Afrique du Nord ou de l'Ouest, l'activité des termites aide à restaurer les sols dégradés par le surpâturage. En revanche, en Europe et en Amérique du Nord, les termites sont considérés comme nuisibles au regard de leurs dégâts sur les constructions en bois.

# L'union sol-plantes

Les plantes sont intimement dépendantes du sol qui leur fournit eau et substances nutritives. Mais elles influent également sur leur milieu, en modifiant notamment le sol, de manière physique, chimique et même biologique.

## Les plantes pionnières

Comment un sol volcanique, une ancienne carrière, un éboulis ou un sol décapé peuvent-ils devenir fertiles ? Certaines plantes se sont spécialisées dans la colonisation de ces milieux minéraux dépourvus de matière organique. Ces plantes sont dites pionnières. Les bactéries sont les premières à s'installer, suivies par des organismes épiphytes, lichen, puis mousses lorsque les conditions d'humidité deviennent favorables. L'accumulation de cette litière organique permet l'installation d'une microflore qui transforme la nécromasse accumulée et le mélange avec le sol. Les champignons colonisent alors le substrat et avec eux les racines de plantes vasculaires adaptées à ces sols pauvres. Celles-ci, peu résistantes à la concurrence, laisseront la place à d'autres végétaux au fur et à mesure de la colonisation.



Photo: bobolobur lens © comenarta.blogspot.fr

Les bouleaux sont des arbres pionniers capables de coloniser des sols pauvres et peu épais.

## Le sol idéal existe-t-il ?

Chacun rêve d'un lopin de terre fertile où tout pousserait sans peine et imagine qu'il existe une terre à la proportion idéale de sable, limon et argile apte à accueillir tout type de culture. C'est ignorer

à quel point le système sol est complexe. Une granulométrie moyenne ne contrebalancera jamais une sécheresse chronique, un déséquilibre chimique ou des pratiques culturales inadaptées. Les conditions pédoclimatiques ont abouti à la formation d'une grande variété de sols où se sont développés des systèmes vivants spécifiques. Plutôt que de rechercher l'image unique et illusoire d'un sol idéal, il vaut mieux apprendre à connaître la terre qui se trouve sous nos pieds et s'y adapter, en choisissant judicieusement les espèces végétales et en développant des pratiques culturales adaptées qui permettront d'entretenir voire de développer sa fertilité. Loin de constituer un handicap, cette diversité est une véritable richesse, valorisée par exemple à travers les notions de terroir et d'appellations contrôlées.

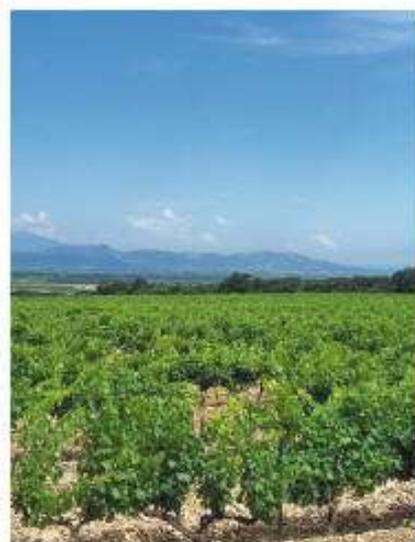


Photo: vigne © Wikipédia

La vigne est attachée à des terroirs de climats et de sols et se plait sur des sols caillouteux peu propices à certaines autres agricultures.

## Les plantes, ingénieurs du sol

La biodiversité souterraine n'est pas l'unique socle de la fertilité des sols. Les plantes interagissent directement avec leurs sols nourriciers. Leur couvert protège les sols de l'érosion, et accueille une grande variété d'organismes. Leurs réseaux de racines fixent et aèrent les sols. Elles modifient l'équilibre chimique par prélèvement et apport de substances. Elles influent également sur la typologie des populations souterraines. Les agriculteurs connaissent parfaitement certaines de ces interactions et ont développé des techniques culturales leur permettant d'améliorer la fertilité de leurs sols grâce aux végétaux qu'ils cultivent. Les engrais verts, par exemple, protègent, structurent et enrichissent le sol. Les plantes nématicides aident à lutter contre les nématodes ravageurs des cultures. Et les plantes répulsives éloignent certains insectes non désirés.



Photo: tréfl blanc © Wikipédia

Le tréfle blanc est une plante naine qui capte l'azote de l'air et enrichit ainsi le sol.

## Les sols agricoles, un écosystème menacé

L'agriculture s'est développée il y a environ 10 000 ans. Depuis une soixantaine d'années certains pays ont augmenté les rendements de manière spectaculaire grâce à la chimie, l'irrigation, la mécanisation et la sélection des plantes. Ces pratiques ont cependant un coût environnemental élevé. Le doublement de la production alimentaire mondiale s'est accompagné d'une augmentation de 7 fois des apports d'engrais azotés et de 3,5 fois des engrais phosphatés. Cette agriculture intensive conduit à la dégradation des sols et des ressources naturelles et à une réduction globale de la biodiversité du sol. Les agroécosystèmes ne pourront pas rester productifs encore très longtemps dans de telles conditions. Les mesures qui maintiennent ou qui développent la biodiversité du sol sont au centre de toutes les pratiques qui contribuent à une agriculture durable. Elles reposent sur la préservation de la matière organique, un travail réduit du sol, des cultures intercalaires, la rotation des cultures et la lutte biologique intégrée.

## Toutes les plantes n'aiment pas tous les sols

Toutes les plantes n'ont pas les mêmes besoins en éléments nutritifs, en eau ou en éclaircissement. Si certaines sont tolérantes à des conditions environnementales variées, d'autres ne pousseront que sur des milieux bien définis : secs, humides, acides, calcaires, azotés, ... Ces plantes, attachées à un biotope restreint, sont appelées plantes indicatrices. Leur simple présence permet en effet de caractériser facilement la nature d'un sol.



Photo: solanum nigrum © Wikipédia

Le solanum nigrum (morelle noire) est indicateur d'un sol riche en azote.



Champs de blé Cevennes.

© www.photo-per-jung.com

# Vivre sans sol ?

Puisque le sol fertile est une ressource rare et menacée, est-il envisageable de produire sans sol ou de le remplacer ?

## Pousser sans sol ?

Toutes les espèces végétales n'ont pas besoin d'un sol pour croître. Les plantes épiphytes, qui représentent quelques 30 000 espèces, se contentent de capter l'humidité atmosphérique, voire les quelques déchets organiques qui s'accumulent à leur base. Mais hormis les mousses et les lichens, présents sous toutes les latitudes, la plupart sont issues des régions tropicales, comme beaucoup d'orchidées ou de broméliacées. Si ces plantes peuvent se révéler de véritables trésors pharmaceutiques, elles ne semblent pas présenter un grand avenir lorsqu'il s'agit de nourrir la population mondiale.



© Benigno

Si les plantes épiphytes n'ont pas besoin de sol, elles ne constituent pas une piste crédible en terme de ressource alimentaire.



© infoculture.be.org

La spiruline est une micro-algue particulièrement nutritive qui peut aisément être cultivée dans des bassins fortement éclairés et maintenus à 35°C.

## Et la mer ?

Les plantes aquatiques, et notamment les algues, sont beaucoup plus prometteuses. Beaucoup se révèlent d'excellents aliments. Riches en vitamines, minéraux, fibres et même protéines, leur consommation est traditionnelle en Asie. Au Japon, elles représentent 10 % des rations alimentaires. La production d'algues progresse régulièrement et aujourd'hui, environ 11 millions de tonnes d'algues sont consommées annuellement. Une micro-algue, appelée Spiruline, à haute valeur nutritionnelle, est utilisée comme complément alimentaire, en particulier dans la lutte contre la malnutrition.

## Fabriquer des sols fertiles ?

Certains déchets peuvent être utilisés pour créer des sols artificiels.

De nombreux chercheurs tentent de fabriquer des sols parfaitement adaptés à des problématiques particulières comme la plantation d'arbres en milieu urbain, ou les mélanges allégés pour la végétalisation des toitures. Ces sols peuvent être constitués de matériaux de recyclage, comme des boues d'épuration, des composts, des déchets de papeterie et de l'industrie du bois, du caoutchouc ou encore des gravats.



© www.kitara-science.com

## Attention à l'excès de matière organique

Comme pour les terreaux, certaines formules, très riches en matières organiques produisent de bons résultats les premières années puis s'avèrent de plus en plus déséquilibrées au fil des ans. Leur altération massive produit des structures fragiles et compactes qui à terme influencent négativement la fertilité du substrat.



Sous réserve d'une bonne alimentation en eau, la fertilité globale du mélange terre-pierre, étudiée depuis plus de 20 ans, semble satisfaisante.

© S. J. J.

## Remplacer les sols ? Des techniques peu durables



Les substrats très riches en matières organiques se dégradent rapidement et nécessitent des remplacements fréquents.

### Le terreau n'est pas du sol

Parce qu'ils ont démontré leur aptitude à la croissance des plantes, on considère souvent que les substrats organiques de type terreaux peuvent avantageusement remplacer les sols naturels. C'est une erreur car ils s'avèrent peu durables. Un sol correctement cultivé produit durant des centaines d'années. À l'inverse, un terreau devra être intégralement remplacé après quelques mois. Pourquoi une telle différence ? Les terreaux sont majoritairement constitués de matières organiques végétales (tourbes, fibres, composts) qui évoluent très vite dans un milieu cultivé. En l'absence d'une fraction minérale stable, et notamment d'argiles, le terreau se décompose sans former le complexe argilo-humique. Il se déstructure, devient compact, imperméable et impropre à la culture.

### Laines de roche et fibres de coco

D'autres techniques misent sur les supports inertes, de type laine de roche ou fibre de coco. Ces matériaux fournissent aux plantes un support aéré propice au développement de leurs racines mais n'apportent aucune substance nutritive rendant indispensables les systèmes de fertilisation intensive. Beaucoup de fraises, de concombres et de tomates sont ainsi produits sans n'avoir jamais été en contact avec le moindre sol. Outre la consommation intensive d'engrais chimiques propres à ces techniques, se pose la question du recyclage de ces matériaux à très courte durée de vie.

Les techniques de production hors sols sont particulièrement efficaces mais très consommatrices d'engrais et productrices de nombreux déchets.



© Agri France

## Préférer la stabilité et la pauvreté

Les sols fabriqués les plus prometteurs semblent ceux qui privilégient une structure poreuse stable, souvent au détriment de la fertilité immédiate. Une forte proportion de matériaux inertes à granulométrie grossière, assortie d'une couche supérieure à l'activité organique intense permettrait d'espérer que ces mélanges évoluent vers des organisations durables.

Le mélange terre-pierre fait partie de ces sols fabriqués. Très utilisé pour planter les arbres en milieu urbain, il est constitué à 70 % de gros cailloux de type pouzzolane et de 30 % de terre végétale. Il est particulièrement résistant au compactage, mais pauvre au niveau de ses réserves nutritives et hydriques.

# La ville fertile : une ville rêvée ?

En Europe, 80 % de la population vit en zone urbanisée. Cette situation génère des préoccupations en matière de développement durable, qui ont fait naître le concept de ville fertile, sorte de cité idéale pourvoyeuse de nature, de biodiversité, mais aussi de denrées alimentaires. Quelle est la part de rêve dans ce concept ?

## Les sols urbains

Les sols urbains sont généralement considérés comme peu fertiles. Ils sont fréquemment compactés, imperméabilisés, mélangés à des matériaux de remblais, mités de multiples réseaux souterrains et pollués par les hydrocarbures, les sels et les métaux lourds. Y faire pousser des végétaux est généralement un gageure. Lorsqu'une mise en culture est envisagée, la solution habituelle est l'apport de matériaux découpés d'une zone agricole. Ces apports exogènes se font parfois sur de grandes épaisseurs, 1 mètre et plus pour la plantation d'arbres. Les sols urbains sont extrêmement perturbés par les multiples aménagements qu'ils reçoivent.



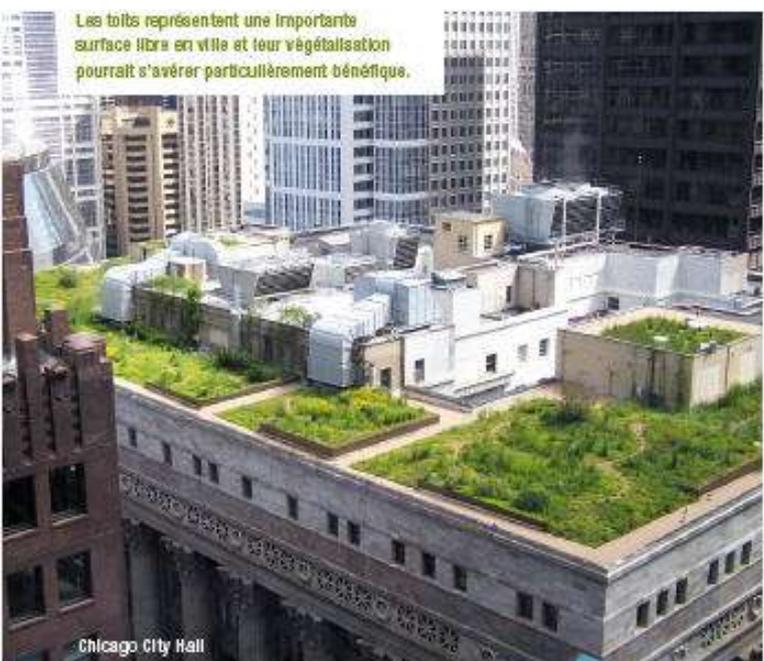
Extension de réseau à Vénissieux.

© www.ville-vert.com/soil

## Végétaliser les toits

Les toits présentent un véritable potentiel lorsqu'il s'agit de faire entrer la nature en ville. Outre leur aspect esthétique et leur apport en terme de biodiversité, les toitures végétalisées présentent trois intérêts majeurs : amélioration de la performance thermique des bâtiments, rétention et filtration des eaux pluviales, lutte contre l'augmentation de la température en milieu urbain.

Les toits représentent une importante surface libre en ville et leur végétalisation pourrait s'avérer particulièrement bénéfique.

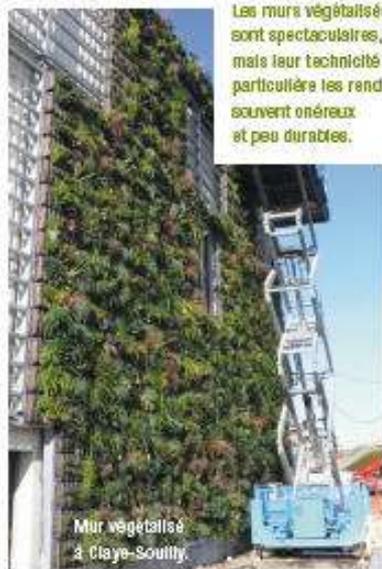


Chicago City Hall

© www.ourgreenhouse.com

## Végétaliser les murs

Depuis quelques années, les systèmes de végétalisation verticales tendent à se multiplier. Outre son aspect esthétique, végétaliser les murs présente en effet un véritable intérêt théorique : régulation thermique des bâtiments, limitation du réchauffement urbain, création de corridors écologiques reliant les habitats entre eux. Mais les aménagements proposés, souvent spectaculaires, s'avèrent onéreux et peu durables. Ils nécessitent l'utilisation de substrats horticoles et de systèmes complexes d'arrosage. La traditionnelle plante grimpante économe en terre et en eau, tels le lierre et la vigne-vierge, devrait donc continuer à faire recette dans les années qui viennent.



Mur végétalisé à Claye-Souilly.

2012 élan.org

## Vers une agriculture urbaine ?

Afin de répondre à l'urbanisation et au besoin de sécurité alimentaire, l'agriculture urbaine est une des solutions proposée par la FAO (organisme des Nations Unies en charge de l'agriculture et de l'alimentation). L'idée est de produire localement, souvent sous forme associative ou individuelle. Bien que le développement de l'agriculture urbaine se heurte à la pénurie de terres et à leur mauvaise qualité (fertilité, pollution), beaucoup d'expérimentations voient le jour. Les Jardins ouvriers ou Jardins Familiaux, connaissent un engouement sans précédent. De nombreuses opérations immobilières intègrent maintenant cet élément dans leur programme d'aménagement. Nombre de jardins partagés sont installés en ville, sur des friches ou dans des jardins publics. D'autres expérimentations prennent place sur des toits, comme à New York, ou plus proche, sur le toit d'AgroParisTech au plein cœur du 5<sup>ème</sup> arrondissement.

Une ferme urbaine à Chicago : la production locale, ici en plein cœur de Chicago, présente un intérêt économique, écologique mais aussi social.



© L'Esca

La ville de Todmorden en Angleterre vit une véritable révolution verte depuis 2008, date à laquelle des cultures de plantes à partager (aromatiques et légumes) ont commencé à parsemer la ville et sont mis à disposition de chacun. Cette initiative s'est même exportée en France sous le nom d'"Incroposables comestibles", à Nantes en particulier. Peut-être une révolution sociale et culturelle est-elle en marche ?



Todmorden community box © Ardis Mathias

Un bac de légumes à partager à Todmorden en Angleterre

# Préserver les sols

Aujourd'hui, l'agriculture intensive est montrée du doigt, accusée de provoquer érosion, pollutions, tassement, lessivage, perte de matière organique et fragilisation des biotopes. D'autres modèles émergent et semblent plus économiques et plus durables.

## Cultiver autrement

De nombreuses initiatives présentent des modèles alternatifs à l'agriculture intensive. L'agriculture de conservation, largement pratiquée dans le monde mais pourtant méconnue en France, propose de concilier une production abondante et durable sur la base d'un principe simple : un sol toujours à couvert et jamais bouleversé. La permaculture, ou agriculture naturelle, est une démarche parente qui s'appuie sur une approche systémique globale tenant compte des relations entre les différents éléments constituant le système écologique et ses capacités d'évolution. La permaculture repose sur 4 principes. Le premier est de proscrire le travail du sol pour laisser faire les racines des plantes et l'activité biologique. Le second est de remplacer les fertilisants par les ressources locales tels que les engrais verts, les résidus de culture et les fientes des volailles vivant sur place. Le troisième principe est de ne pas désherber mais de simplement contrôler les herbes non désirées. Le dernier principe est de n'apporter aucun produit chimique, et notamment aucun pesticide, en privilégiant un environnement sain et des plantes vigoureuses.



Le japonais, Masanobu Fukuoka, microbiologiste et phytopathologiste de formation, est l'auteur de *La révolution d'un seul brin de paille*, qui pose les principes de la permaculture.

Cet ouvrage s'inspire de plus de 50 années d'expérimentation réussie menée dans sa ferme de Ilie de Shikoku.

## Associer les plantes

Le compagnonnage végétal, ou cultures associées, est une technique essentiellement maraîchère consistant à associer des plantes susceptibles de s'échanger divers services : fertilisation, action répulsive, toxique, ... Ainsi, les légumineuses enrichissent les sols en azote, l'armoise inhibe la germination des graines, l'aneth attire les auxiliaires, tandis que l'all limite les attaques d'oïdium et éloigne les ravageurs ou que la capucine concentre les pucerons qui épargnent alors les cultures avoisinantes.



Les 3 sœurs des Amérindiens, courge, maïs et haricot grimpant sont un exemple de compagnonnage. Le haricot fertilise le sol, le maïs supporte le haricot et la courge couvre le sol.

© Wikipédia

## Changer de végétaux

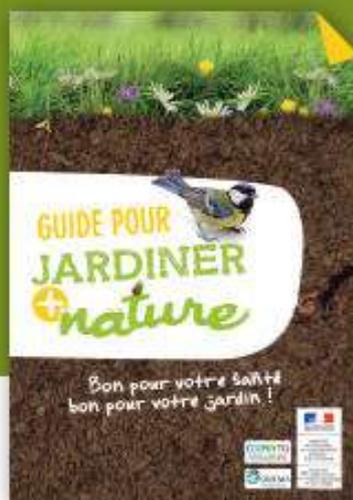
L'agriculture intensive repose sur des méthodes culturales, des intrants et la sélection variétale. Depuis plusieurs années, la question des semences est au centre de nombreux débats. Les variétés commercialisées sont accusées d'être fragiles (nécessité d'utiliser des intrants), non reproductibles par l'agriculteur (variétés stériles, non fixées ou protégées par des droits), ou potentiellement dangereuses pour l'environnement (Organismes Génétiquement Modifiés). Parallèlement, un courant de valorisation des variétés anciennes et locales se développe, afin de promouvoir des plantes librement diffusables et adaptées aux écosystèmes dans lesquelles elles prendront place. De nombreuses associations œuvrent à la diffusion et à la protection de ces variétés locales, comme par exemple, l'association Graine de Noé qui promeut des variétés anciennes de céréales.



© Wikipédia

La France est le premier pays producteur de semences protégées en Europe et le deuxième exportateur mondial, derrière les Pays-Bas et avant les États-Unis. Cette industrie est au centre de nombreuses polémiques.

## Connaitre et respecter son sol



Le jardinier amateur doit sauvegarder le sol placé sous sa responsabilité afin de le transmettre aux générations futures. Cet enjeu, et notamment la limitation des pesticides est devenu un objectif national. De nombreuses initiatives peuvent l'aider dans cette démarche.

Le site *jardiner autrement*, est par exemple une mine d'idées.

Le *Guide pour jardiner plus nature*, édité par le ministère de l'écologie est facilement téléchargeable.