



Vers de terre.
© P.-F. Chabalier

La fraction biologique du sol

La fraction biologique du sol peut être divisée en deux grandes catégories :

- les organismes vivants, également appelés biomasse. Ils peuvent être d'origine végétale, animale ou microbienne ;
- la matière organique du sol. Elle est composée de la matière organique fraîche végétale (résidus végétaux) et animale (déjections, cadavres), et de l'humus (molécules organiques complexes liées en général à la matière minérale, notamment aux argiles).

Après la description des organismes vivants et de la matière organique, ce chapitre explique la manière dont les différentes composantes de ces deux catégories (appelées souvent « compartiments ») interagissent.

Organismes vivants du sol	36
<i>Biomasse microbienne</i>	36
<i>Champignons du sol</i>	37
<i>Biomasse végétale</i>	37
<i>Biomasse animale</i>	38
Transformation de la matière organique dans le sol	41
<i>Minéralisation</i>	41
<i>Humification</i>	44
Rôles de la matière organique du sol	46
<i>Source de carbone</i>	46
<i>Alimentation des plantes</i>	46
<i>Structure des sols</i>	47
Matière organique du sol et cycle de l'azote	48
Ce qu'il faut retenir du chapitre 3	52

Organismes vivants du sol

L'ensemble de la biomasse atteint jusqu'à 20 % de la masse totale de la fraction biologique dans un sol de prairie (milieu très actif sur le plan biologique). Cela peut donc représenter plusieurs dizaines de tonnes de biomasse à l'hectare.



Staphylin (Coleoptera, Staphylinidae). Prédateurs de larves d'insectes.
© J. Rochat



Lycose (Araneae, Lycosidae). Araignée vivant typiquement dans la litière.
Prédateur. Transporte ses petits sur le dos. © J. Rochat



Grillon (Orthoptera, Gryllidae : *Gryllus bimaculatus*). Au sol.
Même mode de vie que les blattes. Creuse des terriers. © J. Rochat

Biomasse microbienne

La biomasse microbienne, appelée aussi micro-organismes ou microflore, représente quelques tonnes par hectare. Elle est formée de bactéries et d'actinomycètes (groupe des eubactéries ramifiées, proches des champignons). On trouve également des algues et des cyanophycées (algues photosynthétiques) dont certaines peuvent fixer l'azote de l'air. Toutes ces espèces sont présentes dans les sols de La Réunion.

Les bactéries jouent un rôle essentiel dans la solubilisation et dans la précipitation des minéraux, mais aussi dans toutes les transformations de la matière organique, dont la minéralisation. Elles synthétisent des polysaccharides très résistants à la dégradation qui forment une part importante de la matière organique humifiée (c'est-à-dire l'humus).



Pratique

Acidité des sols et minéralisation

L'activité des bactéries dépend fortement des conditions physico-chimiques du sol. Les bactéries qui minéralisent la matière organique ne sont pas actives lorsque le pH descend au-dessous de 5,5 (sols très acides). La forte acidité de nombreux sols de La Réunion limite l'activité des bactéries minéralisatrices. C'est pourquoi, dans les sols cultivés, le chaulage est nécessaire pour maintenir le pH au-dessus de 5,5.

Champignons du sol

Les champignons du sol sont très variés : champignons inférieurs, moisissures, champignons formant des fructifications (les carpophores, plus ou moins comestibles selon les espèces), etc.

Tous sont hétérotrophes, c'est-à-dire qu'ils utilisent des aliments organiques comme source de carbone. Ils sont formés de filaments ramifiés visibles à l'œil nu en période humide. Ces filaments s'étendent sur des surfaces considérables : on estime que la longueur totale de filaments dans le sol est de l'ordre de 50 à 250 m par gramme de sol. Ce sont des colonisateurs à grand rayon d'action. Ils peuvent transporter des quantités élevées d'eau et de substances d'un endroit à l'autre du sol, sur une distance de plusieurs mètres. Ils sont moins sensibles que

les bactéries aux conditions du milieu et résistent bien aux conditions acides du sol.

Certains champignons basidiomycètes, comme les bolets, et certaines pourritures molles fabriquent des composés humiques incorporés rapidement à la matière organique du sol.

Les mycorhizes, associations symbiotiques entre un certain type de champignon et les racines d'un végétal, collectent les sels minéraux qu'elles transfèrent à la plante. Leur pouvoir d'extraction est particulièrement élevé pour le phosphore. Certaines familles de plantes comme les alliées (ail, oignon, poireau) ont peu de racines et utilisent les mycorhizes.

Biomasse végétale

Le système racinaire des plantes est un constituant important des organismes vivant dans le sol. Il comprend plusieurs parties, caractérisées par le diamètre et le niveau de ramification. La longueur et la forme des racines dépendent de facteurs génétiques des plantes et des contraintes du milieu. Ce sont les racines les plus petites, ou radicelles, qui permettent la nutrition des plantes. Elles absorbent l'eau et les éléments minéraux, elles sécrètent des substances organiques plus ou moins complexes. La radicelle et son environnement de sol immédiat sont un lieu privilégié d'échange appelé la rhizosphère. C'est une zone du sol très riche en microorganismes et en champignons.



Colonisation des coulées récentes par des jeunes filloas dont les racines passent par les fissures de la lave. La nutrition azotée est assurée par des bactéries symbiotiques. © V. van de Kerchove



En savoir plus

Sols et racines à La Réunion

Les plantes indigènes qui poussent sur les andosols des hauts ont des racines assez superficielles et traçantes. De ce fait, les arbres comme les tamarins (*Acacia heterophylla*) sont sensibles au vent, qui les couche.

En zone sèche, le prosopis (*Prosopis juliflora*) est un arbuste épineux qui s'adapte bien au sol sec et peu épais des coulées récentes de lave de l'Ouest. Ses racines ont la faculté d'aller chercher l'eau très en profondeur à travers les fissures des roches. Cet arbuste, originaire d'Amérique du Sud, colonise les milieux difficiles.

Certaines coulées de lave récentes de l'Est portent de belles forêts naturelles car les racines des arbres passent dans les fentes entre les blocs de basalte pour aller coloniser les sols anciens recouverts par la lave.

Masse des racines

Le système racinaire est très difficile à mesurer. La production annuelle de racines peut être importante : elle est de l'ordre de 6 t de matière sèche par hectare en milieu cultivé, jusqu'à 10 t/ha en forêt. La croissance des racines dépend de l'humidité du sol : elle est permanente dans certaines zones humides, alors qu'elle dépend des périodes de pluie en zone sèche. Pour la canne à sucre, la masse de racines atteint 7 t/ha de matière sèche produite chaque année (10 % de la biomasse totale de la plante). Cette masse de racines se renouvelle tous les ans et enrichit le sol en matière organique après la coupe.



Racines de canne à sucre en culture hydroponique.
© P.-F. Chabalier

Biomasse animale

Egalement nommée faune du sol, la biomasse animale peut être divisée en quatre catégories selon la taille des organismes : micro-, méso-, macro- et mégafaune (**tableau 1**). Les effets de la faune du sol sont mécaniques : macro-brassage, micro-brassage, formation de galeries, fragmentation de la matière organique fraîche, mélange intime entre la matière organique et les minéraux du sol, formation d'agrégats. Ces activités sont indispensables au développement des qualités agronomiques d'un sol.

**Pratique****Vers de terre et cultures**

Les populations de vers de terre augmentent sous les cultures pérennes à fort enracinement, notamment les prairies et les plantes de couverture. Le nombre de vers de terre peut en revanche diminuer sous culture :

- si les façons culturales sont intensives (travail du sol répété, fertilisation minérale forte, emploi massif de pesticides) ;
- si le sol cultivé s'acidifie ;
- si les sols ont subi une forte érosion avec perte de matière organique.



Tableau 1.

Les quatre catégories de faune du sol.

Catégorie de faune	Espèces	Abondance
Microfaune (longueur < 0,2 mm)	Protozoaires (amibes, flagellés, ciliés) Petits nématodes	10 milliards à cent mille milliards d'individus par m ² de sol !
Mésafaune (0,2 mm ≤ longueur < 4 mm)	Nématodes Acariens Collemboles Micro-arthropodes	En masse : 1 à 40 g/m ² de sol
Macrofaune (4 mm ≤ longueur < 8 cm)	Annélides ou vers de terre (enchytrées et lombrics) Escargots, limaces Crustacés (cloportes et autres, proches des crevettes) Myriapodes ou mille-pattes (iules et scolopendres) Araignées Insectes (termites, fourmis, diptères...)	100 à 1 000 vers de terre par m ² de sol type andosol 200 à 400 coléoptères par m ² de sol 100 à 300 fourmis par m ² de sol 500 diplodopodes par m ² de sol 40 chilopodes par m ² de sol
Mégafaune (longueur ≥ 8 cm)	Mammifères fouisseurs (taupes, campagnols, tangues...) Amphibiens (crapauds, reptiles...)	Variable

L'activité essentielle des vers de terre

Plus de la moitié de la masse de la faune est constituée de vers de terre, qui appartiennent à la famille des lombriciens (lombrics). La densité des lombrics est de l'ordre de 100 à 1 000 individus/m² de sol cultivé. Dans les sol tropicaux, les vers de terre appartiennent surtout à la catégorie des endogés (les vers endogés construisent des galeries horizontales et ingèrent de grandes quantités de terre). Le lombric le plus courant à La Réunion est *Pontoscolex corethrurus*. Il est commun dans les sols tropicaux et il s'adapte à de nombreuses conditions écologiques.

Dans les sols des hauts de La Réunion, le ver de terre le plus souvent rencontrée est un ver épi-endogé de petite taille (*Amyntas corticis*, originaire d'Asie de l'Est) : les vers épi-endogés se nourrissent des litières superficielles et construisent des galeries horizontales et verticales.

Parmi toutes les activités de la faune, l'action des vers de terre est la plus visible. C'est celle qui a le plus de conséquences sur la capacité

d'un sol à être cultivé durablement. Les vers de terre agissent sur la structure, la densité apparente et les caractéristiques chimiques du sol.

Les vers ingèrent plusieurs centaines de tonnes de sol par hectare et par an. Un ver ingère 2 à 4 fois son propre poids de terre par jour. Dans les sols des hauts, cela correspond à 2 à 4 g de sol par jour. Ils améliorent ainsi les propriétés physiques des sols, créent un réseau de galeries qui facilitent l'enracinement, l'infiltration de l'eau et la circulation des gaz, et favorisent la formation d'une structure grumeleuse fine.

L'effet des vers de terre se manifeste aussi sur les caractéristiques chimiques du sol : les nutriments contenus dans les déjections des vers (les turricules) sont davantage disponibles pour les plantes, en particulier l'azote et le phosphore. L'activité microbienne est accrue dans le tube digestif des vers : la fragmentation, la transformation et la minéralisation de la matière organique sont augmentées. Cette activité se poursuit plusieurs jours dans les turricules frais.

En savoir plus

Vers de terre et nématodes

La présence de lombrics peut faire diminuer les populations de nématodes parasites des plantes. Cela a été observé à La Réunion : par exemple, dans une culture de maïs associée à une couverture végétale de lotier qui favorise la multiplication des vers de terre, les populations de nématodes endoparasites (*Pratylenchus vulnus*) ont chuté de moitié dans des racines de maïs.

Le lombric peut parfois être un vecteur de propagation de nématodes parasites des animaux, comme les cestodes (vers segmentés), dont font partie les « ténias ».



Ver épi-endogé dans les andosols des hauts.
© P.-F. Chaballier

Ver plat (Platelminta : *Bipalium* sp.).
Prédateur de vers de terre. © J. Rochat

L'activité des autres animaux de la macrofaune

Dans les litières, les insectes, les arthropodes, les myriapodes et les crustacés ont un rôle significatif dans la première phase de fragmentation et de digestion de la matière organique fraîche. A La Réunion, c'est le cas du paillis de canne à sucre et de la litière forestière des sols acides des hauts de l'île.

Certaines larves vivant dans le sol occasionnent des dégâts sur les cultures. La plus connue est le ver blanc, larve du coléoptère *Hoplochelus marginalis*, qui se nourrit de racines vivantes. D'autres insectes, comme les cétoines et les cafards, se nourrissent de matière organique morte (racines mortes, litières...).



Larve de rhinocéros (Insecte, Coleoptera, Scarabaeidae : *Oryctes borbonicus*).
Larves dans le terreau. Ne pas confondre avec les vers blancs de hannetons qui, eux, mangent les racines. © J. Rochat



Carabique (Coleoptera, Carabidae). Au sol, sous les pierres. Prédateur de divers invertébrés (vers de terre, mollusques, insectes...). © J. Rochat

En savoir plus

Fourmis et termites à La Réunion

En zone tropicale, les termites ont un rôle identique à celui des fourmis en zone tempérée. A La Réunion, les deux insectes coexistent. Termites et fourmis édifient des nids et creusent des galeries dans le sol. Le rôle de ces galeries est aussi important que celles des lombrics. Les fourmis les plus répandues et les plus actives sont *Solenopsis geninata*, connues pour leur agressivité et leur piqûre. Sur les onze espèces de termites présentes à La Réunion, *Coptothermes havilandi* est celle qui a une action importante dans les sols cultivés. Les termites se nourrissent de végétaux morts, alors que les fourmis ont un régime plus varié : elles élèvent par exemple des parasites des végétaux (cochenilles, pucerons).



Transformation de la matière organique dans le sol

La décomposition des organismes vivants dans les sols conduit à l'apparition d'une matière organique fraîche qui est le point de départ de deux grands processus de transformation :

- la minéralisation, qui transforme les matières organiques du sol en éléments simples (gaz et éléments minéraux nutritifs pour les plantes) ;
 - l'humification des diverses formes de matière organique fraîche, qui aboutit à l'humus du sol.
- L'équilibre entre les processus de minéralisation et d'humification de la matière organique est à la base de la plupart des propriétés agronomiques des sols. Connaître les conditions de réalisation de ces processus permet de choisir et de calculer au mieux les apports organiques à la parcelle.



Cloporte (Crustacea, Isopoda). Au sol, dans la litière. Participe activement au recyclage des débris végétaux.
© J. Rochat

Minéralisation

Le processus de minéralisation conduit à la destruction d'une partie de la matière organique. Les molécules organiques sont transformées en éléments simples : gaz carbonique (CO_2), azote minéral et éléments minéraux. Ce sont surtout les microorganismes qui effectuent ces transformations. Beaucoup de facteurs interviennent dans ce processus : la nature de la matière organique, les facteurs physico-chimiques et biologiques du sol, les cultures et les pratiques agricoles.

La minéralisation potentielle du stock de matière organique du sol peut être mesurée en conditions de laboratoire (➔ [chapitre 4 - Analyses agronomiques](#)). Deux coefficients sont déterminés : le coefficient K_2 , ou coefficient de destruction annuelle de la matière organique, basé sur la mesure de la minéralisation du carbone, et le coefficient de minéralisation annuelle de l'azote. À titre indicatif, ces mesures ont été faites sur plusieurs sols de La Réunion ([tableau 2](#)). À partir

de ces coefficients, on peut calculer la quantité de matière organique du sol détruite annuellement (ce calcul aboutit au bilan humique, ➔ [chapitre 5 - Les matières organiques produites à La Réunion](#)) et la quantité d'azote minéral fournie par sol ([tableau 3](#)).



En savoir plus

Une minéralisation moins élevée qu'en zone tempérée

L'activité de minéralisation des sols de La Réunion est moins élevée que celle des sols tempérés, sans doute à cause de leur acidité, de leur origine volcanique, de la présence de complexes organo-minéraux stables et d'une concentration assez faible en microorganismes. La vitesse de minéralisation de N varie de 0,35 kg/ha/jour (pour la couche superficielle 0-25 cm) dans un sol brun ferrallitique à 1,42 kg/ha/jour dans un andosol perhydraté. Ces valeurs sont très faibles par rapport à celles des sols bruns de milieux tempérés.

3 - La fraction biologique du sol

Tableau 2.

Minéralisation potentielle annuelle de la matière organique mesurée dans les sols de La Réunion, pour l'horizon superficiel 0-25 cm : coefficient de destruction annuelle de la matière organique K_2 , coefficient de minéralisation annuelle de l'azote, vitesse de minéralisation journalière de l'azote (d'après les travaux CIRAD-INRA, 2003).

Type de sol	K_2 (%) par an	Minéralisation annuelle de l'azote (%)	Vitesse de minéralisation de l'azote (kg/ha/jour)
Andosol perhydraté (Plaine des Cafres)	1,20	2,68	1,42
Andosol perhydraté (Saint-Rose)	0,76	1,91	1,52
Andosol des hauts de l'Ouest	1,29	2,00	0,64
Sol ferrallitique andique des hauts de l'Est	1,17	1,90	1,12
Sol brun ferrallitique (La Bretagne)	1,91	0,65	0,35
Sol ferrallitique (Sainte-Suzanne)	1,28	0,76	0,42
Sol brun de l'Ouest	1,50	1,10	0,80
Sol brun vertique de l'Ouest	1,60	1,32	0,96

Tableau 3.

Calcul des quantités potentielles d'azote et de matière organique minéralisés annuellement. Cas d'un andosol des hauts de l'Ouest, à 1 000 m d'altitude.

Caractéristiques du sol	Calcul de l'azote minéralisé (kg/ha/an)	Calcul de la matière organique minéralisée (t/ha/an)
Taux de matière organique : 5,3 % N total : 0,3 % Densité apparente : 1 t/m ³ Epaisseur de sol travaillée : 0,30 m Surface : 10 000 m ² (1 ha) Coefficient de minéralisation annuelle de l'azote : 2,0 % K_2 : 1,29 %	a – Quantité de sol $1 \text{ t/m}^3 \times 0,30 \text{ m} \times 10\,000 \text{ m}^2$ $= 3\,000 \text{ t/ha}$ b – Quantité N total $3\,000 \text{ t/ha} \times 0,3 \% = 9 \text{ t/ha}$ c – N minéralisé (kg/ha/an) $9 \text{ t/ha} \times 2,0 \% = 0,180 \text{ t/ha}$ soit 180 kg N/ha/an	a – Quantité de sol $1 \text{ t/m}^3 \times 0,30 \text{ m} \times 10\,000 \text{ m}^2$ $= 3\,000 \text{ t/ha}$ b – Stock organique total $3\,000 \text{ t/ha} \times 5,3 \% = 159 \text{ t/ha}$ c – Matière organique minéralisée (t/ha/an) $159 \text{ t} \times 1,29 \% = 2 \text{ t/ha/an}$



Pratique

Absorption de l'azote par la plante

L'ion nitrate NO_3^- est prélevé préférentiellement par les racines des plantes. L'ion ammonium NH_4^+ peut être prélevé par les champignons et les mycorhizes et parfois par les racines des plantes à un stade jeune. Le flux d'absorption de NO_3^- par une culture intensive peut atteindre plusieurs kilos par hectare et par jour pour satisfaire sa pleine croissance. La production naturelle du sol en N par minéralisation ne permet pas de tels flux. C'est pourquoi la fertilisation azotée complémentaire est nécessaire pour obtenir des rendements élevés et rentables.

Dégradation de la matière organique

Plus les molécules organiques sont complexes et grosses, plus la dégradation est difficile. Plus les molécules organiques sont petites et simples, plus elles sont facilement dégradées par l'ensemble de la biomasse vivante.

Les composés organiques solubles sont les plus rapidement utilisés par les microorganismes. Les résidus aériens (feuilles, tiges...), riches en cellulose et en azote, servent de substrat à la biomasse vivante du sol qui les transforment en compost de surface. Cette transformation induit des pertes élevées en carbone par respiration (CO_2) et aboutit à des résidus organiques variés.

Les hémicelluloses et la cellulose sont de grosses molécules organiques pauvres en azote. Pour les dégrader, les microorganismes ont besoin de beaucoup d'azote, qu'ils prélèvent dans le milieu (azote du sol, ou azote apporté par un complément d'engrais minéral).

Facteurs physico-chimiques du sol

Température du sol. Les microorganismes ont une activité optimale entre 25 et 35 °C : c'est la température de la plupart des sols cultivés de La Réunion. La minéralisation est encore possible à des températures plus élevées par des enzymes produites par ces microorganismes. En dessous de 10 °C, la minéralisation est très réduite : c'est ce qui se passe dans les sols des hauts pendant la saison froide, de juin à septembre. Des symptômes de carence en N apparaissent sur les cultures pendant cette période.

Etat hydrique. L'humidité du sol est optimale aux valeurs proches de la capacité au champ, c'est-à-dire lorsque la réserve utile en eau du sol est complètement alimentée. Trop d'humidité empêche la circulation de l'oxygène nécessaire à la respiration des organismes vivants. A l'inverse, la sécheresse provoque l'inactivité des populations microbiennes.

Teneur en oxygène (O_2). La plupart des transformations de la matière organique réalisées par les microorganismes demande de l'oxygène. Les racines en ont besoin aussi. Gaz et eau utilisent le même mode de circulation dans le sol, c'est-à-dire la porosité, matérialisée par une multitude de pores et de galeries entre les agrégats du sol. La bonne circulation des gaz dépend donc du taux d'humidité du sol et du volume de la porosité, lié à l'état de la structure du sol. Sur le plan pratique, l'agriculteur doit donc favoriser l'aération du sol.

pH du sol. L'activité microbienne est optimale à la neutralité (pH = 7). Il est probable qu'une adaptation de la microflore bactérienne existe dans les conditions des sols acides de La Réunion (pH inférieur à 5). Pour des sols très acides (pH = 4), la microflore est surtout formée de champignons et la matière organique a tendance à s'accumuler (c'est *l'avoune* des andosols perhydratés acides des hauts).

Composition du sol. La teneur en matière organique, la teneur en argile et le type d'argile du sol conditionnent la qualité du complexe argilo-humique qui stocke les éléments minéraux assimilables par les plantes. La composition chimique du sol a également une action directe sur

3 - La fraction biologique du sol

le pH et sur les sources nutritionnelles minérales autres que C et N (P, oligo-éléments, etc.).

Cultures et pratiques culturales

Le type de culture intervient par son système d'enracinement (plus ou moins ramifié et dense) et par la nature des exsudats de ses racines. La rhizosphère joue un rôle fondamental dans la vie du sol : elle favorise le développement des microorganismes, grâce aux exsudats qui contiennent des sucres et d'autres substrats nutritifs.

Les pratiques culturales agissent sur l'ensemble des facteurs physiques, chimiques et biologiques du sol (**tableau 4**).



Prélèvement de sol pour suivre le devenir des apports de matières organiques dans le sol (essai MVAD). © V. van de Kerchove

Tableau 4.

Effets des pratiques culturales sur la minéralisation de la matière organique.

Pratiques culturales	Facteurs du sol modifiés <i>Conséquences sur la minéralisation de la matière organique</i>
Travaux mécaniques (labours)	Structure et porosité du sol modifiées <i>Mode d'incorporation des résidus dans le sol Minéralisation accélérée</i>
Irrigation	Humidité du sol maintenue <i>Durées de minéralisation plus longues</i>
Fertilisation et chaulage	Fertilité chimique augmentée, pH relevé Restitutions de la culture (racines et organes aériens) plus élevées <i>Minéralisation augmentée</i>
Pesticides	Biomasse du sol moins importante <i>Minéralisation réduite</i>

Humification

La formation de l'humus, ou humification, consiste en des recombinaisons de molécules organiques de nature diverses :

- molécules complexes déjà présentes dans le sol ;
- molécules simples venant directement de substrats organiques récemment dégradés par la flore et la faune du sol ;

– très peu de molécules directement issues des débris végétaux ou animaux.

Ces recombinaisons sont issues de processus chimiques complexes qu'on appelle condensation et polymérisation. Lors des recombinaisons, des molécules contenant N sont incorporées dans les macromolécules humiques.



Les racines sont la source essentielle de l'humus du sol. Leur croissance est continue. Leurs tissus sont pauvres en N et riches en lignine, et leur décomposition aboutit surtout à des formes stables de l'humus. La transformation de la lignine aboutit à de grosses molécules très stables : les acides humiques.

La formation de l'humus dépend des micro-organismes présents et surtout des enzymes qu'ils libèrent. Comme pour le processus de minéralisation de la matière organique, beaucoup de facteurs interviennent : les facteurs physico-chimiques et biologiques du sol, les cultures et les pratiques agricoles. La formation de l'humus est ralentie en sol très acide, en sol très humide et hydromorphe et lorsque la température du sol diminue.

Classifications des matières organiques du sol et des composés de l'humus

Les composés de l'humus sont classés en fonction de leur masse moléculaire, obtenues grâce à des procédés chimiques d'extraction. Le terme d'humus du sol regroupe un ensemble de molécules, classées ci-après, des plus petites aux plus complexes :

- acides créniques ;
- acides hymatomélaniques ;
- acides fulviques et acides humiques (gris et bruns) ;
- humines (microbienne, résiduelle ou héritée des matières organiques d'origine).

Sans tenir compte de la taille des molécules, une autre façon de classer les constituants de l'humus est de mesurer leur comportement face à la minéralisation. On distingue alors deux types d'humus :

- les molécules d'humus jeune, sujettes à la minéralisation ;
- les molécules d'humus stable, qui peuvent avoir plusieurs milliers d'années. Elles sont très liées à la matière minérale qui les protège des dégradations microbiennes.

Ces deux classifications, fondées sur les analyses de laboratoire, ont cependant une utilité réduite pour l'agriculture. Il est difficile de faire le lien

entre le comportement du sol, notamment ses propriétés physiques, et les types de matière organique.

Une autre manière de classer la matière organique du sol est fondée sur le rapport C/N (➔ chapitre 4 - *Analyses agronomiques*) et sur l'activité biologique dont elles sont le lieu. Cette classification donne trois catégories de matière organique du sol :

- le mull, C/N : 8 à 15. C'est la forme la plus répandue dans les sols de La Réunion. C'est une matière organique fortement transformée par les lombrics. Elle donne au sol une structure micro-grumeleuse ;
- le moder, C/N : 15 à 25. On le trouve surtout dans des sols non cultivés, peu épais, comme les lithosols et les régosols des hauts de La Réunion. Le moder apparaît lorsque les contraintes physico-chimiques et climatiques limitent l'activité des bactéries et des vers. Les champignons sont plus actifs, ainsi que certains insectes et arthropodes. La décomposition de la matière organique fraîche est incomplète. La structure du sol est plus massive ou particulaire ;
- le mor, C/N > 25. Appelé *avoune* dans les hauts de La Réunion. Le mor ressemble à une tourbe, sous forêt de tamarins. La minéralisation est très faible, car l'activité biologique est limitée.



En savoir plus

L'humus des sols de La Réunion

A La Réunion, la nature des composés organiques est différente selon les sols : les acides fulviques prédominent dans les andosols alors que, dans les autres sols, ce sont les acides humiques qui prédominent.

La liaison de la matière organique avec les argiles est également différente suivant les sols. Par exemple, dans les andosols, la liaison des acides fulviques avec les allophanes est très forte.

Ces deux aspects confèrent à chaque type de sol des particularités physiques (couleur, structure, perméabilité...) et chimiques (capacité d'échange anionique et cationique, pH...).

! Pratique

Que peut faire l'agriculteur ?

Il est difficile pour l'agriculteur de modifier la nature de la matière organique du sol. Cependant, plusieurs techniques culturales sont favorables à une bonne évolution. Chaulage et travail du sol adapté favorisent l'activité microbienne en améliorant les facteurs chimiques et physiques du sol. La pratique régulière des restitutions organiques et des apports de matières organiques exogènes augmentent en général la minéralisation et l'humification, et améliorent les propriétés physiques des sols. L'évolution à long terme aboutit à l'augmentation du stock d'humus stable du sol.

Rôles de la matière organique du sol

La matière organique du sol joue trois rôles essentiels :

- énergétique, comme source de carbone ;
- physique, comme élément majeur de la structure du sol ;
- nutritionnel, pour l'alimentation des plantes.

Ces trois rôles dépendent des types de composés organiques, de leur quantité et de leur transformation.

Source de carbone

Le carbone de la matière organique du sol est la source énergétique des microorganismes hétérotrophes, c'est-à-dire ceux qui ne tirent pas leur énergie de la lumière du soleil (c'est le cas de la majorité des microorganismes).

Alimentation des plantes

La minéralisation de la matière organique libère les éléments nutritifs (N, P, K, S...) contenus dans les molécules organiques. Ces éléments contribuent à l'alimentation des plantes. La totalité de l'azote mobilisé par une végétation naturelle vient de la minéralisation naturelle de la matière organique du sol (sauf les légumineuses



Comptage précis des racines.
© H. Saint Macary

qui fixent l'azote atmosphérique). Pour une culture fertilisée, une moitié de l'azote prélevé proviendrait de la minéralisation naturelle de la matière organique du sol et l'autre moitié serait apportée par les fertilisants, que ce soient des engrais minéraux ou des apports organiques.



Structure des sols

L'association entre la matière organique et les éléments fins du sol aboutit à la formation d'agrégats dont la taille peut varier de quelques micromètres à plusieurs centimètres. L'assemblage de ces agrégats constitue la structure du sol. Ils ont une certaine résistance physique aux agressions mécaniques naturelles ou artificielles (érosion, piétinement, émiettement, passage d'engins lourds...). Cette capacité à résister se mesure et s'appelle la stabilité structurale du sol.

Une « bonne » structure du sol se traduit par une porosité élevée et des agrégats grumeleux, qui améliorent la réserve en eau, la perméabilité et l'aération, l'enracinement et la résistance physique aux agressions.

Une bonne structure, souvent observée sous forêt naturelle avant la mise en culture, peut être rapidement détériorée par des pratiques culturales inadaptées. La diminution du stock de matière organique entraîne la baisse de la stabilité structurale. D'autres symptômes de dégradation de la parcelle sont ensuite observés : baisse de fertilité, érosion, baisse de rendements, etc. Le retour à un meilleur taux de matière organique et à une bonne stabilité peut être obtenu par de nouvelles pratiques, permettant à terme la restructuration du sol cultivé : réduction du travail du sol, apport de matières organiques humifiées, couverture végétale permanente du sol.



Pratique

Rotavator et rotobèche

Les herses rotatives (rotavator) sont souvent employées pour le maraîchage. Leur avantage est d'enfouir les résidus de culture et d'effectuer un travail du sol fin, sur une largeur de bande compatible avec la plasticulture. Mais elles ont aussi des effets négatifs. Le sol est réduit en poussière et la structure est détruite. Elles provoquent l'accélération de la minéralisation et la baisse du taux de matière organique. Elles créent aussi une semelle de labour vers 15 cm de profondeur; c'est-à-dire une couche de sol imperméable que les racines traversent difficilement. Les phénomènes d'érosion apparaissent rapidement sur ces sols.

Le remplacement des rotavators par des rotobèches, qui ont une action plus douce, est recommandé lorsque c'est possible.



Utilisation de la rotobèche pour enfouir de la matière organique dans une culture de canne à sucre. © V. van de Kerchove



En savoir plus

D'autres propriétés de la matière organique

L'assimilation de certains éléments par les plantes est améliorée grâce à d'autres propriétés de la matière organique :

- les propriétés chélatantes, qui rendent disponibles des oligo-éléments indispensables (Fe, Cu...) parce qu'ils sont sous des formes non assimilables dans le sol ;
- des molécules plus complexes (vitamines, acides aminés...) issues directement des matières organiques apportées peuvent également être absorbées par les plantes, leur conférant des résistances et une amélioration végétative. Ces phénomènes sont particulièrement observés chez des plantes cultivées sur sols enrichis en composts en agriculture biologique.

Matière organique du sol et cycle de l'azote

Le rôle nutritionnel de la matière organique peut être montré pour de nombreux éléments chimiques. Parmi ceux-ci, l'azote joue un rôle essentiel dans la nutrition des plantes et aussi dans les risques de pollution. Il mérite par conséquent un complément d'explications, qui est décrite ci-après et dans la **figure 1** (page 50).

Désamination

L'azote inclus dans les molécules organiques plus ou moins complexes est minéralisé par réactions enzymatiques (enzymes provenant des microorganismes) : c'est la désamination et l'ammonification des acides aminés produisant des ions ammonium (NH_4^+). L'ion NH_4^+ est assez fugace et peu mobile dans le sol. Il est facilement retenu par le complexe argilo-humique.

Nitrification

Le processus de nitrification a lieu dans le sol. Les bactéries du genre *Nitrosomonas* oxydent l'ammonium (NH_4^+) en nitrite (NO_2^-). Les bactéries du genre *Nitrobacter* oxydent les nitrites en nitrates (NO_3^-) : c'est la nitrification. L'ion NO_3^- n'est pas retenu dans le sol :

- soit il est prélevé avec la solution du sol par les racines ou par les microorganismes ;

- soit il est emporté avec l'eau de drainage dans les couches inférieures du sol.

Pertes par volatilisation de l'ammoniac

Il existe un cas où l'ammoniac contenu dans une matière organique peut se volatiliser en quantités importantes. C'est celui de l'épandage des lisiers, lors de périodes chaudes et sèches.



Épandage de lisier avec une cuve à déflecteur entraînant une forte volatilisation de l'ammoniac du lisier. © V. van de Kerchove



Pertes en nitrates

Les nitrates en excès par rapport aux besoins de la culture sont entraînés par les eaux de drainage (lessivage) ou par les eaux de surface (ruissellement et érosion). Ils peuvent ensuite contaminer les nappes et les zones côtières (lagon).

D'autres pertes sont possibles, comme la dénitrification, qui se produit en conditions d'anaérobiose (sols hydromorphes, excès d'eau). Elle est réalisée par des bactéries. Il se forme un gaz à effet de serre, l'oxyde d'azote N_2O . Dans certains sols très hydromorphes et perhydratés de La Réunion, ces réactions pourraient être importantes, mais c'est un flux gazeux difficile à mesurer.

Immobilisation par les microorganismes (ou « réorganisation »)

L'azote minéral est prélevé par les microorganismes pour la formation de leurs tissus : c'est la réorganisation de l'azote ou immobilisation. L'intensité de ce prélèvement dépend du rapport C/N du substrat organique à décomposer (résidus de végétaux ou déchets organiques apportés) :

– $C/N < 15-20$. L'azote libéré par la minéralisation est suffisant pour alimenter la culture et les microorganismes du sol. C'est le cas de matières organiques comme les boues et les lisiers ;

– $C/N \geq 20$. Il y a compétition entre l'absorption par les plantes et la réorganisation par les microorganismes du sol. L'enfouissement de paille ou de fumier peut provoquer une « faim d'azote » temporaire pour la culture. Un complément minéral azoté peut être fait à ce moment pour éviter un retard de croissance des jeunes plantes.

Azote des engrais minéraux

Une partie de l'azote apporté par l'engrais minéral est également rapidement réorganisée par les microorganismes pour la formation de leurs tissus. Les corps microbiens se minéralisant

partiellement par la suite, libèrent cet azote ainsi stocké. Une petite partie des excès d'azote apporté participe donc à l'enrichissement du stock de matière organique du sol mais le reste risque d'être perdu par drainage si la culture ne l'a pas utilisé.

Fixation symbiotique de l'azote

Certains microorganismes convertissent l'azote atmosphérique gazeux en azote minéral. Les bactéries du genre *Rhizobium*, symbiotiques des plantes légumineuses, fixent activement N, jusqu'à 100 kg/ha. Ce gain d'azote « gratuit » est très intéressant lorsqu'on cultive des légumineuses (trèfles et *Desmodium* en élevage, haricot et autres grains en maraîchage).

Les autres formes de fixation non symbiotique (bactéries et algues), qui se développent plus ou moins selon les cultures, ne représentent que quelques kilos par hectare.

Autres entrées d'azote atmosphérique

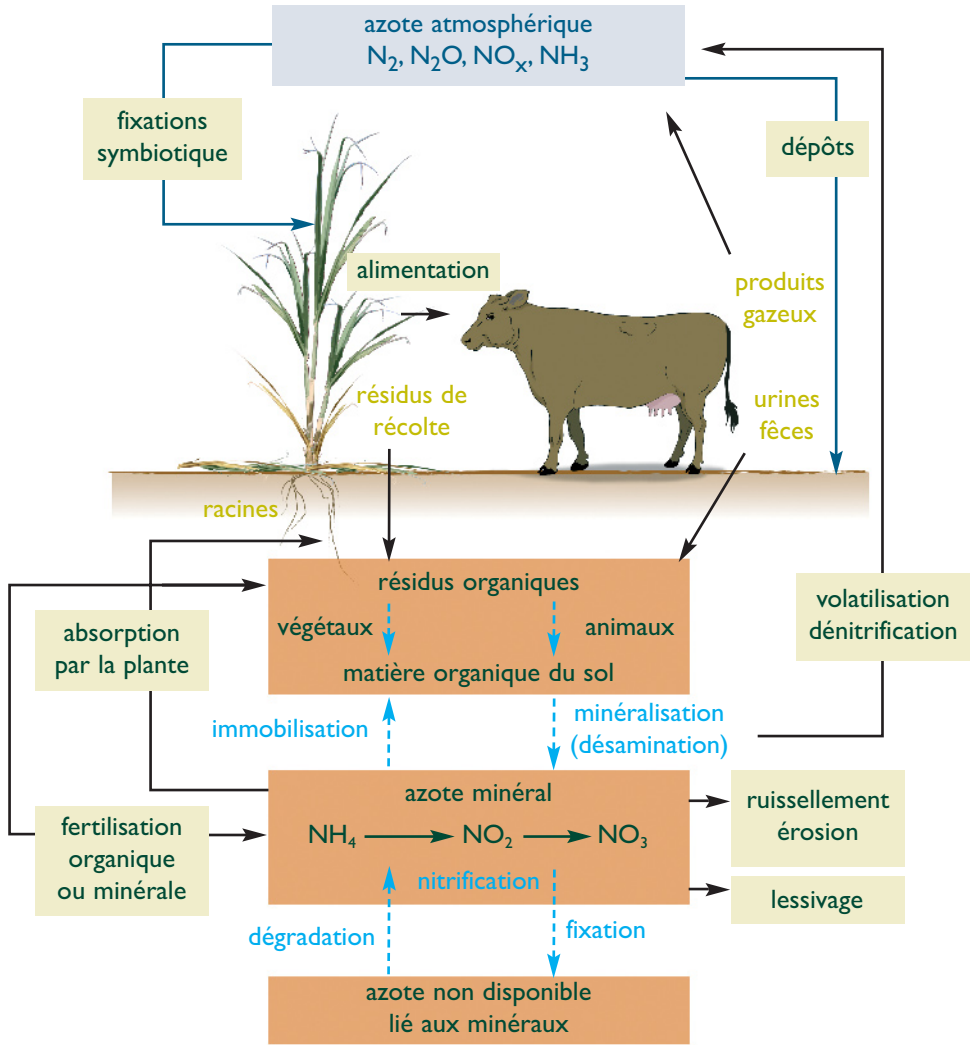
Les dépôts aériens apportés avec les pluies représentent des quantités très faibles, par exemple à la suite de la volatilisation d'ammoniac après une application de lisier dans un champ voisin.



Fumier de vaches allaitantes, Trois-Bassins.
© V. van de Kerchove

3 - La fraction biologique du sol

Figure 1.
Le cycle de l'azote.



! Pratique

Éviter les pertes gazeuses par volatilisation de l'ammoniac

Lorsque des lisiers sont épandus au champ, plusieurs techniques permettent de réduire les pertes d'ammoniac. La plus facile (mais chère !) est l'emploi de cuves d'épandage adaptées pour réduire le temps de contact lisier-air : cuves équipées de pendillards ou de disques enfouisseurs. L'application au champ les jours frais et humides et sur un sol humide permet également de limiter la volatilisation.



Transformation et utilisation de divers types de matière organique pour améliorer les propriétés du sol



Tas de fumier de poule prêt à l'emploi sur maraîchage à Dos d'Ane.
©A. Nougadère



Lit de séchage des boues de station d'épuration à Saint-Leu.
© V. van de Kerchove



Fumier avec de la paille de canne sous des génisses,
Trois-Bassins. © V. van de Kerchove



Tas de compost en sortie d'élevage de porcs.
© V. van de Kerchove



Compostage en andains de lisier de porc et différents effluents d'élevage (Saint-Pierre).
© V. van de Kerchove



Deux types de fumier de bovin.
© J.-M. Médoc



Ce qu'il faut retenir du chapitre 3



✓ **Le sol comprend deux grands compartiments biologiques :**

- la biomasse, c'est-à-dire les organismes vivants, d'origine microbienne (bactéries, algues, champignons microscopiques), végétale (racines) et animale (insectes, vers de terre...);
- la matière organique du sol, c'est-à-dire la matière organique fraîche, végétale ou animale, et l'humus du sol, qui regroupe diverses molécules organiques le plus souvent liées aux argiles.

✓ **Les microorganismes transforment les matières organiques.**

Les microorganismes transforment les matières organiques fraîches en humus (humification), en source énergétique pour leur propre développement (réorganisation) et en éléments minéraux (minéralisation). Ils minéralisent aussi l'humus du sol. Le processus de minéralisation met à la disposition des plantes les éléments minéraux dont elles ont besoin. Leur nutrition en N est totalement dépendante de ce processus, ainsi qu'une partie de celle en P, en K, et en oligo-éléments. Le sol, le climat et les pratiques agricoles ont une influence importante sur l'intensité et la régularité de ces transformations.

✓ **Parmi les champignons du sol, certains fabriquent de l'humus.**

Certains champignons fabriquent de l'humus à partir de la lignine des végétaux. D'autres s'associent avec les racines pour collecter les minéraux qu'ils transfèrent à la plante : ce sont les mycorhizes.

✓ **La faune du sol brasse les constituants du sol et fragmente la matière organique fraîche.**

Les vers de terre ingèrent et restituent des centaines de tonnes de sol par hectare. Cela favorise la création d'une structure du sol grumeleuse et d'un réseau de galeries qui facilitent l'enracinement, l'infiltration de l'eau et l'aération. La terre digérée par les vers est riche en éléments disponibles pour les plantes et favorise l'activité microbienne.

✓ **Les radicelles assurent la nutrition des plantes en eau et en minéraux.**

La rhizosphère, espace de sol proche de la radicelle, est le lieu d'échanges de composés organiques et minéraux entre la plante, les microorganismes et les champignons. Les racines vivantes servent de nourriture à la faune du sol et les racines mortes sont transformées en humus par les microorganismes.

✓ **La teneur en humus est un facteur essentiel de la stabilité structurale et de la capacité de stockage des éléments minéraux d'un sol cultivé.**

La diminution du stock de matière organique, qui peut être la conséquence de pratiques agricoles trop agressives, entraîne une dégradation de la structure du sol et une baisse de la fertilité. L'apport de résidus de culture et de matières organique transformées (fumiers, composts) permet le maintien d'un stock de matières organique ainsi qu'une bonne activité biologique dans le sol.