Notice
pour le praticien

ISSN 2296-4436

**Institut fédéral de recherches WSL**
**CH-8903 Birmensdorf**

© WSL Birmensdorf, 2018

WSL, Zürcherstrasse 111
CH-8903 Birmensdorf
www.wsl.ch/publications

**60**
Mars
**2018**

# Le sol forestier vit – diversité et fonctions des organismes vivants du sol

Marco Walser, Doris Schneider Mathis, Roger Köchli, Beat Stierli, Marcus Maeder et Ivano Brunner



Fig. 1. Les organismes vivants du sol sous la loupe. Dessin d'Hanspeter Läser.

Les sols sont l'habitat d'innombrables organismes vivants qui jouent un rôle important dans la décomposition et la transformation de la matière organique. Des sols sains sont une condition essentielle de la durabilité en forêt. Cette Notice donne un aperçu de la diversité des organismes vivants dans les sols forestiers. Elle contribue à la formation et à l'information des apprentis forestiers-bûcherons ou laborantins en biologie, des étudiants et d'autres personnes intéressées issues des domaines forestier et environnemental.

**Le sol forestier – qu'est-ce qui le caractérise?**

Le sol est la couche supérieure vivante de la croûte terrestre; son épaisseur est comprise entre la surface du sol et la roche-mère. Les sols forestiers naissent de l'altération chimique et physique de la roche-mère et de la transformation des composés organiques par les organismes vivants du sol. Les feuilles, aiguilles et branches qui tombent des arbres et d'autres plantes s'accumuleraient pour former au fil du temps d'immenses montagnes, si d'infimes organismes vivants du sol n'étaient pas là pour broyer et décomposer ce matériau en humus. Une partie de cet humus est complètement décomposée et convertie sous forme minérale. Des éléments nutritifs sont alors libérés, qui peuvent ensuite être réabsorbés par les racines des plantes. La boucle est ainsi bouclée.

La formation d'un centimètre de sol demande jusqu'à 100 ans. La vitesse de cette pédogenèse dépend de différents facteurs intrinsèques ou ayant un impact sur celle-ci – organismes vivants, climat prévalant ou nature géologique de la roche-mère notamment. Sans organisme vivant du sol, il n'y aurait pas de sol forestier intact, riche en nutriments. Contrairement à de nombreux sols agricoles, le sol forestier n'est en Suisse ni fertilisé ni labouré. Sa structure est de ce fait largement naturelle. Le matériau organique qui tombe au sol est décomposé et biodégradé différemment selon la station, puis mélangé à la matière minérale. Diverses formes d'humus telles que le mull, le moder ou le mor ou humus brut apparaissent. La décomposition de l'humus et la libération des éléments nutritifs sont des processus naturels.

Le sol forestier n'est pas une masse compacte, mais un système ouvert et poreux composé de particules organiques et minérales, d'organismes vivants, de racines, d'air et d'eau (fig. 1). Il s'agit d'un chantier permanent où, 24 heures sur 24, du matériau est décomposé, transformé, donnant naissance à un nouveau matériau. Avec son réservoir d'éléments nutritifs et d'eau, le sol forestier est de surcroît un habitat pour les plantes et les animaux. Il exerce également une fonction de filtre et de tampon pour de nombreuses substances.

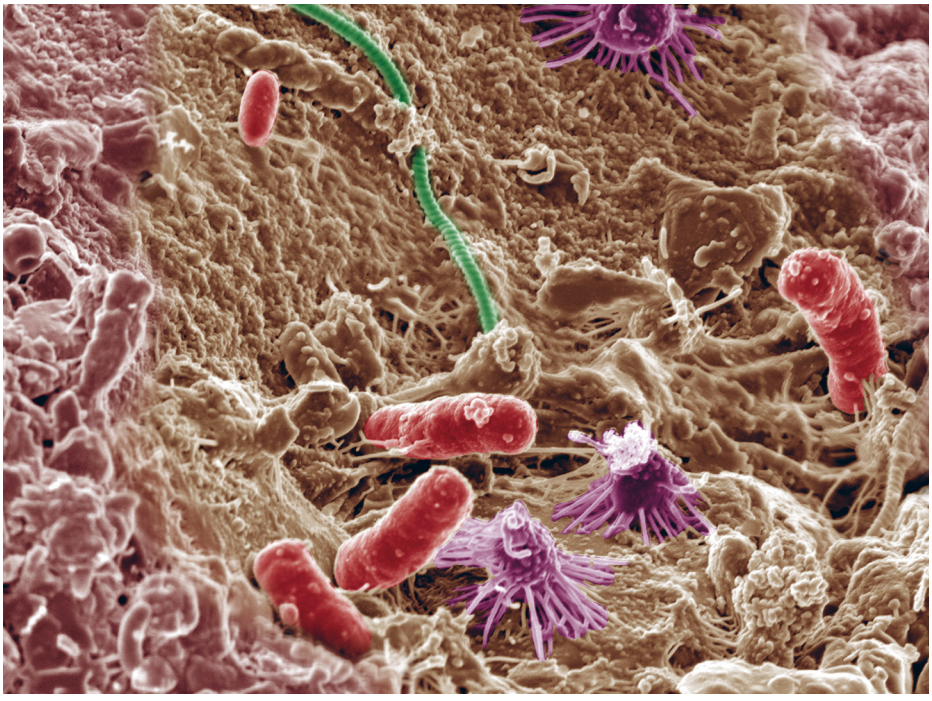


Fig. 2. Des bactéries dans le sol.

Beaucoup de sols forestiers en Suisse ont seulement 10 000 à 15 000 ans d'existence. La formation de ces sols n'a pu débuter qu'après la dernière période glaciaire, une fois que les glaciers s'étaient retirés et qu'ils avaient laissé derrière eux ici des roches polies, là d'épaisses moraines.

**Les organismes vivants du sol forestier**

Le sol forestier est l'habitat d'une multitude d'organismes du sol qui présentent une grande diversité d'espèces (fig. 2, tabl. 1). Il s'agit de champignons, de bactéries, d'insectes et de vers pour n'en citer que quelques-uns. Ils utilisent comme nourriture la litière tombée au sol qu'ils broient, décomposent, digèrent et constituent ainsi entre eux un système d'entraide. De nombreux organismes vivants prédateurs comme les acariens prédateurs et les chilopodes habitent également le sol forestier. Les décomposeurs primaires mentionnés ci-dessus leur servent de nourriture. Ainsi se crée une chaîne alimentaire.

## Les organismes du sol en forêt et leurs fonctions

Les **bactéries** (Bacteria et Archaea) sont des organismes unicellulaires sans véritable noyau (procaryotes), de forme sphérique, tubulaire ou hélicoïdale. Elles présentent une riche biodiversité et une forte densité quand elles colonisent le sol (fig. 2). Elles peuvent se multiplier en quelques heures, formant souvent de grandes chaînes et colonies de cellules. Plus de 100 millions de bactéries peuvent vivre dans un gramme de sol. Elles choisissent alors la mince pellicule d'eau qui entoure les particules du sol, les surfaces radiculaires ou l'espace racinaire, la rhizosphère. Elles se déplacent de façon active avec leurs flagelles, ou de façon passive avec l'eau du sol, et réagissent de manière sensible au dessèchement. La plupart des espèces de bactéries se nourrissent de substance organique morte et des déjections des organismes vivants, elles sont hétérotrophes. Ces bactéries hétérotrophes privilégient les composés carbonés et azotés facilement biodégradables, et décomposent le substrat en produisant des enzymes. Du fait de leur large éventail d'enzymes, les bactéries sont les principaux agents destructeurs. Les processus de décomposition ont généralement lieu dans un

Tabl. 1. Nombre moyen d'individus chez les organismes du sol les plus importants dans un mètre carré de sol (d'après Dunger 1983).

| Classe de grandeur | Groupe d'organismes | Nombre moyen d'individus par m² |
|---|---|---|
| Microflore (<0,2 mm) | bactéries (Bacteria et Archaea) | $10^{14}$ |
| | champignons (Fungi) | $10^{11}$ |
| | algues (Alga) | $10^{8}$ |
| Microfaune (<0,2 mm) | protozoaires (Protozoa) | 100 000 000 |
| | nématodes (Nematoda) | 1 000 000 |
| | rotifères (Rotifera) | 10 000 |
| | tardigrades (Tardigrada) | 1 000 |
| Mésofaune (0,2–2 mm) | acariens (Acari) | 70 000 |
| | collemboles (Collembola) | 50 000 |
| | enchytrées (Enchytraeidae) | 30 000 |
| Macrofaune (2–20 mm) | vers de terre (Lumbricidae) | 100 |
| | diplopodes (Diplopoda) | 100 |
| | chilopodes (Chilopoda) | 100 |
| | mille-pattes (Myriapoda) | 100 |
| | larves de coléoptères (Coleoptera) | 100 |
| | larves de diptères (Diptera) | 100 |
| | gastéropodes (Gastropoda) | 50 |
| | isopodes (Isopoda) | 30 |
| Mégafaune (>20 mm) | amphibiens, reptiles, mammifères | 0,01 |

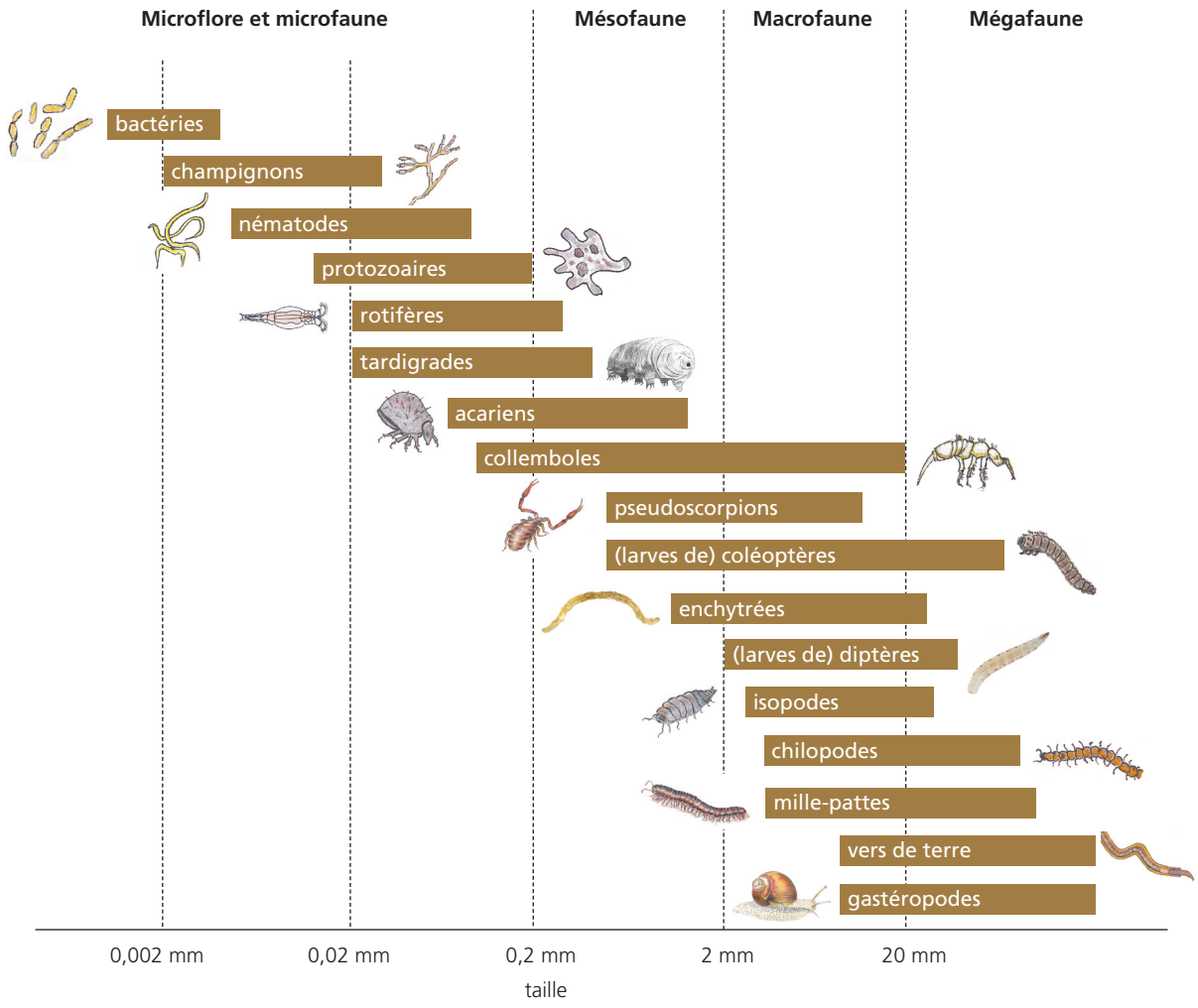



Fig. 3. Taille des organismes du sol, ou diamètre des hyphes des champignons; d'après Briones 2014.

milieu riche en oxygène, c'est-à-dire dans des conditions aérobies. Il existe toutefois aussi des espèces de bactéries anaérobies qui décomposent la substance organique dans des milieux pauvres en oxygène. Il s'agit généralement de processus de fermentation et de putréfaction. Sur la base du mode d'alimentation, il est possible de distinguer deux groupes:

– Les **bactéries autotrophes** vivent sans substance étrangère organique et tirent leur énergie de la lumière du soleil, les bactéries bleu-vert chlorophiliennes (cyanobactéries) notamment.
– Les **bactéries hétérotrophes** se nourrissent de substance organique.

D'après leur fonction et le type de production d'énergie, les bactéries importantes pour le sol peuvent se répartir de la façon suivante:

– Les **bactéries dégradatrices de glucides** décomposent les substances riches en glucides et les transforment en sucres (par exemple la cellulose, l'hémicellulose, les amidons).
– Les **bactéries décompositrices de protéines et ammonifiantes** dégradent les protéines en acides aminés, en ammoniac et en ammonium.
– Les **bactéries nitrifiantes** oxydent l'ammonium en nitrite puis en nitrate. On parle alors d'un processus de nitrification.
– Les **bactéries dénitrifiantes** réduisent les oxydes d'azote en azote élémentaire dans un milieu anaérobie. Il s'agit alors d'un processus de dénitrification (du nitrate au nitrite, puis à l'oxyde nitreux et enfin à l'azote atmosphérique élémentaire).

• Les **bactéries fixatrices d'azote** fixent l'azote atmosphérique et le transforment en composés N organiques.
• Les **bactéries formatrices de méthane** utilisent la formation de méthane comme source d'énergie. Seule les archaebactéries (archées) disposent de cette capacité. Ces bactéries sont strictement anaérobies (par exemple dans les sols très compactés).

À l'image des animaux et de la plupart des bactéries, les **champignons** (Fungi) sont hétérotrophes. Ils se nourrissent des substances organiques nutritives de leur environnement qu'ils décomposent le plus souvent en libérant des enzymes, et qu'ils mettent ainsi à leur disposition en les rendant solubles. Le corps végétal de la plupart des champignons est constitué de minces filaments microscopiques (les hyphes), qui forment un mycélium ramifié, et se propagent sur un substrat solide ou à l'intérieur de celui-ci, tels que le sol terrestre, le bois ou un autre tissu organique mort ou vivant (fig. 4). De nombreux champignons ont des fructifications qui ressortent du sol (par exemple les cèpes ou les amanites tue-mouches). Viennent s'y ajouter les champignons unicellulaires à l'image des levures.

– Les **champignons saprotrophes** poussent sur du matériau organique mort. Le substrat qu'ils colonisent est varié: bois mort ou en décomposition, écorce tombée, litière d'aiguilles, feuilles à terre, parties vertes de plantes en décomposition ou encore fumier. Les champignons saprotrophes décomposent le substrat en extrayant ses éléments nutritifs. La décomposition du matériau mort permet d'une part d'empêcher son accumulation, d'autre part, de mettre à nouveau à disposition d'autres organismes vivants les substances extraites par les champignons. Les champignons de la pourriture blanche sont des champignons lignivores, capables de décomposer de la lignine difficile à dégrader. À la fin, il ne reste plus que des fibres blanches de cellulose. Les champignons de la pourriture brune sont au contraire incapables de décomposer la lignine. Celle-ci perdure ainsi finalement sous la forme d'une structure brune en dés.
– Les **champignons parasites** infestent d'autres organismes vivants, des plantes principalement. Ils poussent sur des plantes-hôtes ou à l'intérieur de celles-ci, et en extraient les substances nécessaires à leur survie. L'hôte est alors endommagé ou dépérit. De nombreuses espèces de champignons parasites comme l'armillaire réussissent à passer au mode de vie saprotrophe quand leur hôte est mort.
– Les **champignons mychoriziens** vivent en symbiose avec les racines des arbres. Champignons et racines profitent alors de cette association symbiotique. Tandis que le champignon reçoit des composés carbonés de la plante, il fournit à celle-ci de l'eau et des éléments nutritifs tels que l'azote et le phosphore. Certaines espèces de champignons comme l'amanite tue-mouches peuvent s'associer à différentes essences. D'autres comme le bolet du mélèze sont tributaires d'une seule essence.

Les **algues** (Alga) sont des organismes vivants eucaryotes qui vivent dans l'eau ou sur certains terrains, et qui pratiquent la photosynthèse. Les algues ne représentent pas un groupe homogène et sont réparties dans deux groupes en fonction de leur taille. Les microalgues rassemblent les espèces de taille microscopique dont font notamment partie les formes unicellulaires. Les macroalgues sont à l'inverse reconnaissables à l'œil nu. Leur longueur varie de quelques millimètres à 60 mètres. La plupart des macroalgues vivent dans l'eau.

Les **animaux unicellulaires** (protozoaires) sont des organismes vivants qui colonisent l'eau et le sol avec une grande richesse en espèces. Ils sont hétérotrophes, ce qui signifie qu'ils sont pour leur métabolisme tributaires de substances venues d'autres organismes. De nombreuses formes ont un mode de vie parasitaire. Les protozoaires comprennent par exemple les ciliés, les dinoflagellés et Archella spp. Désuet aujourd'hui, le terme de «protozoaires» n'est plus utilisé dans la systématique. En raison de leur hétérogénéité, une classification systématique simple des animaux unicellulaires n'est même plus possible.

Les **nématodes** (Nematoda) constituent un embranchement très riche en espèces du règne animal. Le plus souvent, il s'agit de petits vers filamenteux blancs à translucides qui vivent dans des substrats humides (fig. 5). Chez les nématodes, il existe aussi beaucoup de groupes au mode de vie parasitaire. Leur éventail de nourriture est diversifié. Il va des bactéries et algues jusqu'aux animaux capturés de façon prédatrice, en passant par les champignons, les charognes et les déjections. La bouche est souvent entourée de petites lèvres charnues utilisées pour l'ingestion de nourriture ou à des fins tactiles. La nourriture y est aspirée et écrasée par des muscles forts.

Les **rotifères** (Rotifera) sont des organismes vivants pluricellulaires dotés d'un nombre de cellules génétiquement déterminé et de ce fait constant. La tête porte une structure ciliée mobile caractéristique appelée «appareil rotateur» parce que les battements rythmiques des cils qu'il porte le font ressembler à une roue qui tourne. Les rotifères sont présents dans de nombreux habitats – dans des arbres, des mousses humides ou entre des particules du sol. Ils vivent soit en permanence fixés sur les plantes, soit en suspension dans

l'eau, ou encore dans des substrats organiques.

Les **tardigrades** (Tardigrada) constituent un embranchement animal au sein des Ecdysozoaires. Ces animaux à huit pattes, qui mesurent le plus souvent moins d'un millimètre de long, ont un aspect et une démarche pataude qui rappellent quelque peu ceux des ours, d'où leur surnom d'oursons d'eau. Ils vivent aux quatre coins de la planète dans la mer, les eaux douces, ou à terre, dans les habitats humides, les coussinets de mousse par exemple. Ces animaux sont capables d'entrer en état de cryptobiose: ils arrêtent alors leur métabolisme et deviennent quasiment immortels. Ils peuvent ainsi survivre à de longues périodes aux conditions environnementales extrêmes. Les tardigrades peuvent se nourrir du contenu des cellules végétales, mais

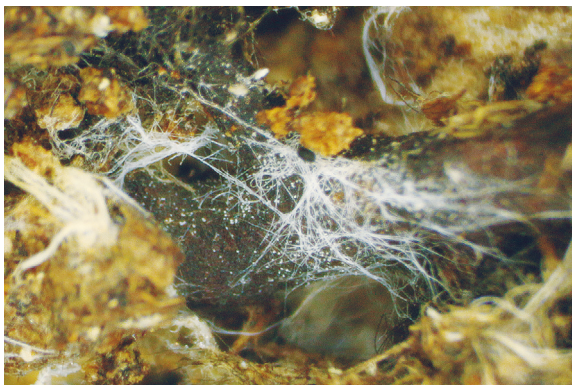




Fig. 4. Les filaments mycéliens colonisent et entrelacent les composants de la litière, ainsi que les composants minéraux du sol, en vue d'une meilleure absorption des éléments nutritifs.

Fig. 5. Les nématodes vivent en grand nombre dans le sol, et dévorent principalement des bactéries et des filaments mycéliens.





Fig. 6. Les oribates, qui vivent principalement dans l'humus et le sol, jouent un rôle important dans la décomposition de la litière.





Fig. 7. Les collemboles font partie des aptérygotes et dévorent principalement du matériau végétal pourrissant.





Fig. 8. Les vers de terre dévorent de petites particules de terre, des déchets d'origine animale et végétale, des substances humiques, des bactéries, des algues et des champignons.

Fig. 9. Avec les vers de terre, les enchytrées font partie des principaux décomposeurs de la litière.

aussi se comporter comme des prédateurs en perforant et suçant le contenu de petits animaux comme des nématodes et des rotifères.

Les **acariens** (Acari) font partie des arachnides, de l'embranchement des arthropodes. Aux acariens prédateurs viennent s'ajouter ceux qui se nourrissent de plantes ou de champignons, ceux qui dévorent des charognes ou qui vivent des tissus morts (fig. 6). Les acariens comptent aussi de nombreux parasites.

Les **collemboles** (Collembola) et les protoures (Protura) relèvent des entognathes, une classe d'hexapodes. On les retrouve surtout dans les couches d'humus des sols pas trop secs (fig. 7). La plupart des espèces sont des dévoreurs de détritus. Cela signifie qu'elles s'alimentent à partir de matériau végétal en décomposition, d'excréments ou de charognes. En plus de ces omnivores, les collemboles comprennent





Fig. 10. Les diplopodes se nourrissent principalement de débris végétaux.





Fig. 11. Les chilopodes sont généralement des animaux prédateurs nocturnes.

Fig. 12. Les pseudoscorpions sont des prédateurs qui peuvent tuer des proies animales mesurant jusqu'à quatre millimètres.





Fig. 13. Pendant le stade juvénile, beaucoup de larves d'insectes vivent dans le sol. À gauche: larve de coléoptère d'un staphylinidé (Staphylinidae). À droite: larve d'un élatéridé (Elateridae).





Fig. 14. Les isopodes dévorent de préférence les parties dépéries des plantes, le feuillage et le bois vermoulu.

aussi des spécialistes qui absorbent exclusivement des algues, des champignons et du pollen, ou ingèrent des microorganismes.

Les **vers de terre** (Lumbricidae) sont des vers issus de la classe des oligochètes qui vivent dans le sol terrestre. Ils se frayent continuellement un chemin à travers les couches du sol de leur milieu de vie en ingérant la terre (fig. 8). La terre ingérée comprend des composants de détritus, des bactéries, des spores fongiques et de nombreux organismes unicellulaires qui sont digérés et utilisés comme nourriture. Les vers de terre absorbent, mélangent et digèrent ces composants puis les éjectent sous forme d'excréments. Ces derniers sont riches en humus, ils comprennent des complexes argilo-humiques sous forme enrichie. Les vers de terre assainissent le sol en se nourrissant et y favorisent par là même les microorganismes utiles.

Les **enchytrées** (Enchytraeidae) sont une famille riche en espèces de la classe des oligochètes, auxquels appartiennent aussi les vers de terre. Avec les isopodes, les collemboles et les vers de terre, les enchytrées sont les principaux décomposeurs de la litière (fig. 9).

Les **mille-pattes** (Myriapoda) comprennent les symphyles, les pauropodes, les chilopodes et les diplopodes. Les symphyles vivent principalement dans la couche supérieure du sol, sous des tas de fumier et sous des pierres. Ils absorbent alors des parties végétales vivantes ou en décomposition. Les pauropodes privilégient les centimètres supérieurs des sols humifères meubles et se nourrissent des filaments mycéliens. On retrouve les diplopodes dans le sol ou le bois décomposé, où ils ingèrent des déchets végétaux (fig. 10).

Les **chilopodes** (Chilopoda) font partie des mille-pattes. Ce sont des prédateurs qui vivent en général dans le feuillage, sous des pierres, dans du bois pourri, ou cachés dans la terre (fig. 11).

Les **pseudoscorpions** (Pseudoscorpiones) font partie des arachnides et ne mesurent que quelques millimètres. On les retrouve surtout dans le sol, plus précisément sous les feuilles, dans les mousses et sur les filaments mycéliens, ainsi que sous l'écorce lâche des arbres (fig. 12). À l'aide de leurs pinces, certains pseudoscorpions peuvent s'agripper à une patte ou au poil d'un insecte volant, et parcourir ainsi de grandes distances.

Les **diploures** (Diplura) relèvent des hexapodes. Ils vivent dans le sol, ainsi que sous des pierres, du feuillage ou des morceaux d'écorce. On rencontre aussi certaines espèces dans la mousse, les autres sont des animaux cavernicoles. De façon générale, ils aiment l'humidité et sont photophobes. Certains diploures chassent les collemboles et sont ainsi prédateurs; d'autres espèces s'alimentent de matériau organique dans le sol ou de filaments mycéliens.

**Larves de diptères** (Diptera) **et de coléoptères** (Coleoptera): de nombreuses larves de diptères et de coléoptères vivent dans la litière et dans le sol jusqu'à leur nymphose, ce qui peut durer de une à plusieurs années. Elles se nourrissent de substances organiques très variées (fig. 13).

Les **isopodes** (Isopoda) sont des crustacés de la classe des malacostracés. La plupart des isopodes sont herbivores et figurent donc parmi les décomposeurs primaires sur le plan biologique (fig. 14). Les branchies, organes respiratoires, se situent au niveau des pattes arrière. Différentes espèces présentent toutefois divers niveaux d'adaptation à la vie sur terre ferme. À la respiration branchiale s'ajoutent ainsi, chez certaines espèces, d'autres organes respiratoires tels que les trachées ou les poumons. Comme les isopodes doivent en permanence maintenir humides leurs lames operculaires délicates, ils privilégient les habitats humides. Leurs mandibules leur permettent d'ingérer du feuillage et du bois mort.

### Sur les traces des animaux terricoles

Vous pouvez aussi observer vous-même les animaux terricoles: après l'étape de tamisage et de tri, il est possible de contempler les organismes vivants du sol à la loupe (fig. 15). La procédure est la suivante:
- épandre du sol forestier sur un linge blanc après l'avoir passé au tamis,
- déposer les animaux terricoles dans un gobelet-loupe à l'aide d'un pinceau,
- observer les animaux terricoles à l'aide du gobelet-loupe ou d'une loupe binoculaire (si disponible),
- identifier les espèces grâce à des tableaux ou à des livres de détermination.



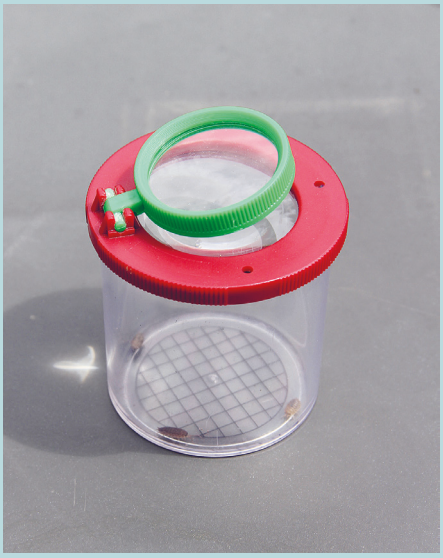


Fig. 15. Les animaux terricoles sont facilement observables au gobelet-loupe.

## Les racines dans les sols forestiers

Les racines constituent les parties souterraines des plantes et ancrent celles-ci dans le sol. Elles servent aussi à l'absorption de l'eau et des éléments nutritifs du sol, et à leur transport jusqu'aux parties aériennes de la plante. La libération de substances, tel le sucre, permet aux racines d'entrer en symbiose avec des bactéries ou des champignons. Les racines fines et épaisses pénètrent principalement dans les pores grossiers, tandis que les poils absorbants se limitent aux pores moyens grossiers. Après le dépérissement des racines, les rhizolithes ouverts sont des voies importantes pour l'acheminement de l'eau infiltrée et pour les petits animaux du sol. La masse racinaire dépérissante apporte une contribution essentielle à la formation de l'humus.

## L'humus – l'élixir du sol forestier

L'humus désigne l'ensemble de la matière organique morte du sol. À sa base se trouve la matière organique morte des plantes (litière), mais aussi des animaux, des champignons et des bactéries. La matière argilo-humique (mélange d'argile et d'humus) est la partie du sol la plus active biologiquement et la plus riche en éléments nutritifs. Beaucoup d'organismes vivants du sol participent à la formation de l'humus (fig. 17). La dégradation de la substance organique se déroule en différentes phases.

### Phase de broyage

La litière tombée au sol est broyée, dévorée puis excrétée par la macrofaune, après avoir été transformée. Par la suite, ces composés sont incorporés dans le sol par les vers de terre, les enchytrées ou les millepattes notamment. Les petits organismes du sol à l'image des collemboles, acariens et nématodes, ont ainsi plus facilement accès à l'humus.

### Phase de dégradation et de transformation

La capacité de dégradation de la litière dépend de la composition de celle-ci. Le rapport carbone (C) / azote (N) est alors déterminant. Pour le feuillage de l'aulne, du frêne, du robinier et de l'orme, ces valeurs C/N se situent à un faible niveau, entre 12 et 25, d'où la rapide décomposition de leur litière. En ce qui concerne le feuillage de l'érable sycomore, du bouleau, du tilleul, du charme, du peuplier et de l'érable plane, le rapport C/N se trouve à un niveau moyen (entre 25 et 40). La décomposition de leur litière est de ce fait déjà bien plus lente. C'est le feuillage du hêtre et du chêne, ainsi que les aiguilles des résineux, qui présentent la décomposition la plus lente. Leurs valeurs C/N peuvent atteindre 77. Un autre critère influant sur la rapidité de la dégradation de la litière est la teneur en lignine des feuilles et des aiguilles. Seules les espèces fongiques spécialisées sont capables de dégrader la lignine. Chez le hêtre, le chêne et le châtaignier, cette teneur en lignine est particulièrement élevée, d'où une dégradation nettement plus lente.

Les composants organiques sont scindés par les enzymes. Des composants simples inorganiques sont alors libérés (= minéralisation). S'y ajoute toutefois une accumulation relative de substances difficilement dégradables comme la lignine.

Les phases décrites ci-dessus se traduisent tout d'abord par la formation d'humus nutritif, puis d'humus durable. En fonction du climat, de la litière et de la roche-mère géologique apparaissent différentes formes d'humus. La forme d'humus est un indicateur de la capacité de transformation des éléments nutritifs dans le sol de surface et par là même du degré d'activité biologique dans le sol.

Dans la forêt suisse, les trois formes suivantes d'humus se constituent dans les sols normalement perméables: le mull, le moder et le mor ou humus brut (voir la fig. 18). Les formes d'humus sont définies sur la base de la succession et de l'épaisseur des horizons humifères, ainsi que de la profondeur d'incorporation de la matière organique dans la matière minérale.

### Le mull

La forme d'humus mull est déterminée par une intense activité biologique. Elle se caractérise le plus souvent par une couche de litière annuelle (horizon L) et une incorporation profonde (plus de 8 cm) de la matière organique dans la matière minérale. Ce mélange confère à la matière minérale une couleur sombre, noirâtre. Cette partie du sol est désignée sous le terme de sol de surface (horizon A). Les édaphons y dominent, en particulier les vers de terre, mais aussi les isopodes, les mille-pattes et autres arthropodes. Selon la saison, l'horizon de litière L peut être complètement absent en raison de l'intense activité biologique. Du fait du mélange intime des substances humiques et de la matière minérale se forment des complexes argilo-humiques, efficaces réservoirs d'éléments nutritifs. Les conditions de pH sont d'acides à alcalines. Lors de la décomposition, une valeur pH pas trop élevée et une litière facilement dégradable jouent un rôle décisif. De surcroît, une intense activité biologique nécessite des conditions climatiques équilibrées. De tels sols de surface sont en général bien alimentés en éléments nutritifs: rapport C/N compris entre 9 et 18.

### Le sol n'est pas silencieux

Des microphones très sensibles permettent de saisir les bruits émis par les organismes vivants du sol. Quels sont-ils et quels organismes les produisent? Le sol sert-il même de moyen de communication acoustique? Cette recherche n'en est encore qu'à ses débuts, mais avec un premier projet qui émane de Marcus Maeder (Sounding Soil: Acoustic Ecology of Soils), le coup d'envoi est lancé (fig. 16).

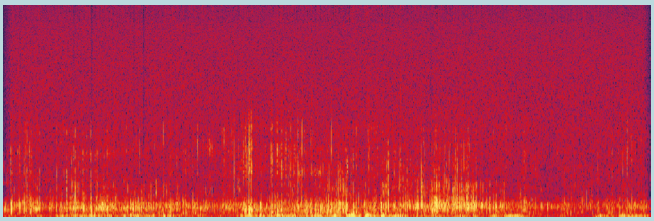


Fig. 16. Spectrogramme sonore («sonagramme») pour la forme d'humus mull d'une hêtraie près d'Othmarsingen (enregistrement original de Marcus Maeder, image de gauche), et code QR y afférent afin d'écouter les bruits.



Fig. 17. Humification – de la feuille à l'humus. Une multitude d'organismes du sol participent aux phases de l'humification.

### Le moder

Le moder typique est un humus acide qui présente une forte colonisation fongique. Son odeur caractéristique se révèle dans des conditions humides. L'activité des vers de terre et d'autres édaphons est fortement entravée par l'acidité, la sécheresse ou la litière difficilement dégradable. La décomposition de la litière est très lente, et sous la couche de litière encore non dégradée (horizon L) se forme un horizon de fermentation pluriannuel (horizon F). L'épaisseur du sol de surface (horizon A) est inférieure à 8 cm. La forme d'humus moder représente une forme intermédiaire entre le mull et l'humus brut. Le moder est moins actif biologiquement que le mull, mais plus que l'humus brut: rapport C/N compris entre 17 et 25.

### Le mor ou humus brut

L'humus brut apparaît en général sur les sols acides. La décomposition de la substance organique est entravée par la réaction du sol fortement acide. Les organismes vivants du sol responsables de la dégradation de la substance organique sont en effet largement absents en milieu très acide. Les champignons acido-résistants ne permettent pas à eux seuls de dégradation intensive. D'où la formation, par rapport au moder, d'un horizon supplémentaire, riche en substances humiques (horizon H). Les différents horizons humifères (horizons L+F+H) sont nettement marqués. Ils peuvent être très épais, et les zones de transition entre les horizons sont le plus souvent caractéristiques. En raison de l'absence de mélange (bioturbation), tous les horizons humifères sont bien typés. L'incorporation de la matière organique dans la matière minérale fine n'est le plus souvent causée que par l'eau de pluie. Le sol de surface (horizon A) est de ce fait généralement de très faible épaisseur et il est peu développé: rapport C/N compris entre 20 et 33.

## Le sol forestier est menacé

### Perte de qualité des sols en raison de la compaction

Nos sols, qui sont des complexes formés d'air, d'eau et de matières solides, sont très sensibles aux perturbations. Le système de cavités des sols (= porosité) est alors déterminant pour leur régime d'air et d'eau.

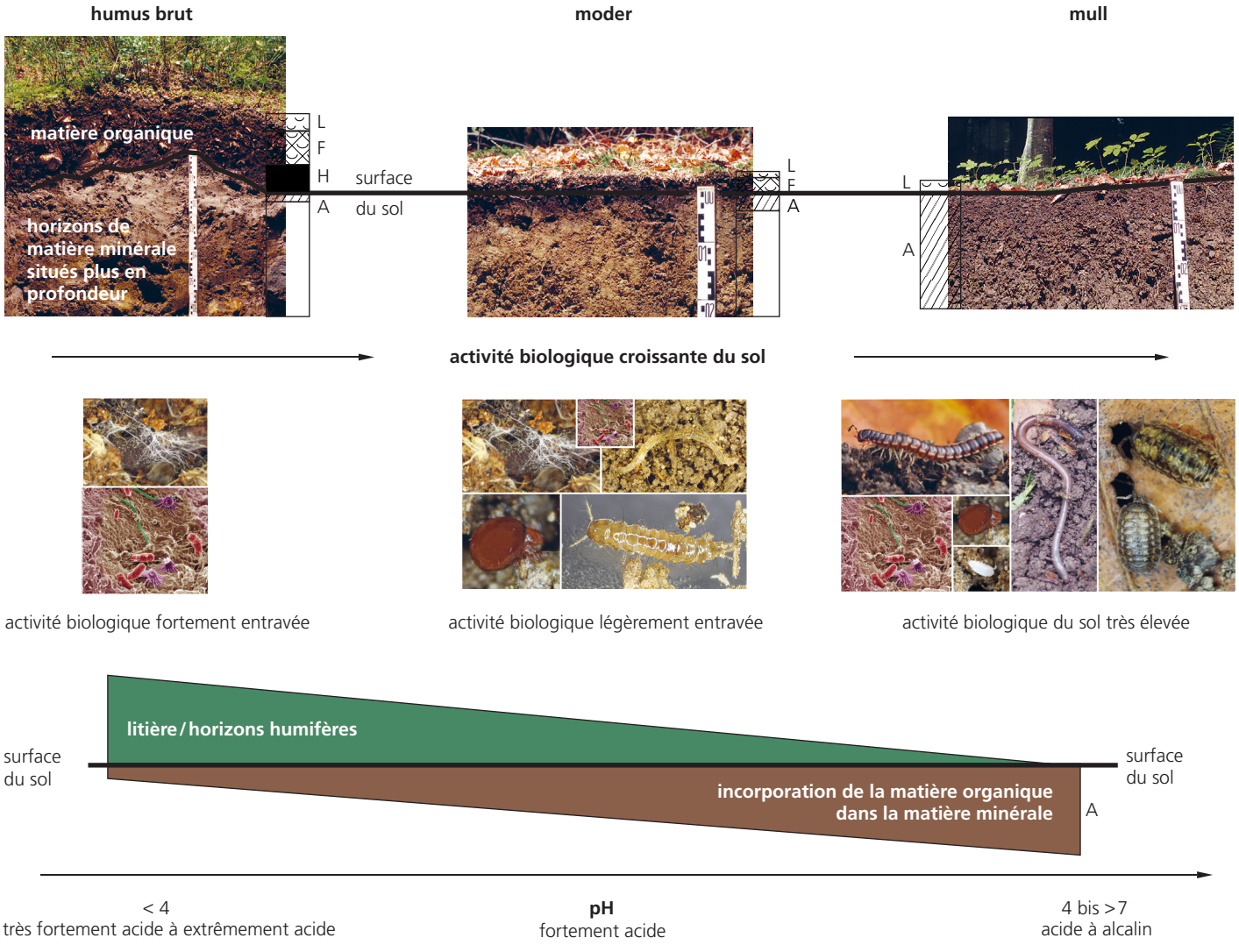



Fig. 18. Activité biologique des différentes formes d'humus. La forme d'humus est un indicateur de la capacité de transformation des éléments nutritifs dans le sol de surface et par là même du degré d'activité biologique dans le sol.

Le passage de lourds engins forestiers pour la récolte du bois peut causer des compactions des sols forestiers. Les pores grossiers qui acheminent l'air sont notamment détruits, ce qui nuit à la croissance racinaire et à la faune souterraine. Comme les premiers passages induisent les plus fortes compactions, les engins forestiers doivent uniquement rouler sur la desserte planifiée, c'est-à-dire sur les layons de débardage.

En foresterie, les formes d'humus peuvent être utilisées pour évaluer la phase de germination et de croissance des différentes essences. Dans le domaine de la protection physique des sols, elles nous donnent des indications sur la vulnérabilité des sols de surface à la compaction, mais aussi sur la capacité de régénération des sols altérés par le passage d'un engin. En comparaison avec les autres formes d'humus, un mull sera plus facilement comprimable car il est très meuble du fait de l'intense activité des vers. Mais comme le mull est caractérisé par une très intense activité biologique, il récupère aussi plus vite.

Sur un moder, le risque augmente qu'avec des conditions météorologiques humides, les pneus des engins forestiers s'enfoncent jusqu'aux horizons du sous-sol, car l'épaisseur du sol de surface est bien moindre que chez un mull. Du point de vue de l'écologie, les dommages se traduisent par des ornières dont la profondeur atteint les horizons du sous-sol et en présence desquelles les couches du sol subissent des pressions latérales au point de se mélanger. Des études scientifiques ont prouvé que sous de telles ornières (appelées type d'ornière 3) régnaient dans le sol des conditions anaérobies dont l'impact était très négatif sur les organismes vivants du sol et sur la croissance des racines (voir Frey et Hartmann 2013). En exploitation forestière, des mesures diversifiées au niveau de la planification et de la technique visent à tenter de limiter autant que possible le nombre d'ornières de type 3. Des éléments à titre de comparaison figurent notamment dans la Notice du WSL N° 45 «Protection physique des sols en forêt» (Lüscher *et al.* 2010).

**Les polluants atmosphériques, source de dangers**

Les acides déposés dans le sol par les précipitations – acide sulfurique et acide nitrique notamment – entraînent peu à peu une acidification des sols (diminution du pH). Dans le cas extrême, cela se traduit par une perte d'éléments nutritifs et par une mobilisation de métaux toxiques qui, à leur tour, affectent gravement la faune souterraine. De plus amples informations sur ces thématiques sont données par exemple dans le Rapport forestier 2015 – État et utilisation de la forêt suisse, chapitre «Sols» (Rigling et Schaffer 2015).

**Perte de matériaux du sol (érosion)**

En l'absence de végétation, le risque de disparition de particules libres du sol existe. Le vent et la pluie sont en particulier à l'origine de phénomènes érosifs et de dégradations des sols. Plus le terrain est escarpé, plus la menace augmente. Une sylviculture proche de la nature empêche largement la perte de matériaux du sol due à l'érosion.

## Sol et être humain – la protection des sols nous concerne tous!

Le sol forestier a de multiples fonctions et bienfaits, y compris pour l'être humain: il absorbe la pluie comme une éponge et favorise une lente infiltration de l'eau dans les couches profondes du sol. Cette eau filtrée par le sol est propre et constitue pour nous une eau potable d'excellente qualité. Grâce à sa capacité élevée de rétention d'eau, le sol forestier retarde l'écoulement des eaux, et nous protège ainsi de façon efficace contre les risques de crues. De surcroît, le sol alimente les racines des arbres et des arbustes en éléments nutritifs, en air et en eau, et leur donne une possibilité d'ancrage. Le sol forestier emmagasine une quantité élevée de carbone. La forêt est le plus grand puits de carbone de Suisse. Dans le sol forestier à lui seul sont stockées plus de 100 tonnes de carbone par hectare.

Étant donné que pour l'être humain, la forêt et le sol forestier en particulier remplissent de multiples fonctions, il importe de protéger celui-ci à l'aide de mesures spécifiques, et de prendre soin de lui. Cette Notice vise à faciliter la compréhension du sol forestier et de ses organismes vivants notamment. Elle peut être utilisée dans les écoles et les formations, son but étant de sensibiliser les lecteurs à cet écosystème fragile qu'est le sol forestier.

### Bibliographie complémentaire


Bardgett, R.D.; van der Putten, W.H., 2014: Belowground biodiversity and ecosystem functioning. Nature 515: 505–511.

Bährmann, R., 1995: Bestimmung wirbelloser Tiere. Gustav Fischer Verlag, Jena.

Briones, M.J.I., 2014: Soil fauna and soil functions: a jigsaw puzzle. Frontiers in Environmental Science 2: 1–22.

Bruckner, G., 1988: Lebensraum Boden. Kosmos Verlag, Stuttgart.

Brussaard, L., 1997: Biodiversity and Ecosystem Functioning in Soil. Ambio 26: 563–570.

Dunger, W., 1983: Tiere im Boden. Ziemsen Verlag, Wittenberg.

Frey, B.; Hartmann, M., 2013: Biodiversität von Waldböden. Auswirkungen des Einsatzes von Holzerntemaschinen auf mikrobielle Gemeinschaften. In: Eidg. Forschungsanstalt WSL (Hrsg.) Forum für Wissen 2013. Bodenschutz im Wald: Ziele – Konflikte – Umsetzung. WSL Ber. 6: 61–69.

Jedicke, E., 1989: Boden: Entstehung, Ökologie, Schutz. Otto Maier Verlag, Ravensburg.

Jeffery, S.; Gardi, C.; Jones, A.;, Montanarella, L.; Marmo, L.; Miko, L.; Ritz, K.; Peres, G.; Römbke, J.; van der Putten, W., 2010: European Atlas of Soil Biodiversity. European Commission, Publications Office of the European Union, Luxembourg.

Klausnitzer, B. (Hrsg.), 2011: Stresemann – Exkursionsfauna von Deutschland. Wirbellose: Insekten. Spektrum Akademischer Verlag. 11. Auflage. 2: 976 S.


**Notices pour le praticien sur des thématiques apparentées**

Notice n° 52: Bois mort en forêt. Formation, importance et conservation. T. Lachat *et al.* 2014. Notice n° 49: Protéger et favoriser les champignons. B. Senn-Irlet *et al.* 2012. Notice n° 45: Protection physique des sols en forêt. Protection des sols lors de l'utilisation d'engins forestiers. P. Lüscher *et al.* 2010. Notice n° 35: Les mycorhizes. Une fascinante biocénose en forêt. S. Egli *et al.* 2002.

Téléchargement ou commande à l'adresse
www.wsl.ch/fr/publicationsrecherche/notice-pour-le-praticien.html

LÜSCHER, P.; FRUTIG, F.; SCIACCA, S.; SPJEVAK, S.;THEES, O., 2010: Physikalischer Bodenschutz im Wald. 2. Auflage, WSL Merkblatt für die Praxis 45: 1–12.
RIGLING, A.; SCHAFFER, H.P. (Eds.), 2015: Waldbericht 2015. Zustand und Nutzung des Schweizer Waldes. Bundesamt für Umwelt, Bern, Eidg. Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf. 144 S.
WALTHERT, L.; ZIMMERMANN, S.; BLASER, P.; LUSTER, J.; LÜSCHER, P., 2004: Waldböden der Schweiz. Band 1. Gundlagen und Region Jura. Hep Verlag, Bern.
ZETTEL, J., 2003: Blick in die Unterwelt: Ein illustrierter Bestimmungsschlüssel zur Bodenfauna. Verlag Agrarökologie, Bern, Hannover.

### Pour de plus amples informations

www.wsl.ch/waldboden

### Personnes à contacter

Marco Walser, Doris Schneider Mathis

Institut fédéral de recherches WSL
Zürcherstrasse 111
8903 Birmensdorf

marco.walser@wsl.ch
doris.schneider@wsl.ch

### Photos

Hanspeter Läser et Marco Walser (fig. 1), Alice Dohnalkova/Pacific Northwest National Laboratory (fig. 2), Marcus Mäder (fig. 16), Marco Walser et Doris Schneider Mathis (tous les autres).

### Référence bibliographique

WALSER, M.; SCHNEIDER MATHIS, D.; KÖCHLI, R.; STIERLI, B.; MAEDER, M.; BRUNNER, I., 2018: Le sol forestier vit – diversité et fonctions des organismes vivants du sol. Not. prat. 60. 12 p.

**Notice pour le praticien** ISSN 1012-6554

### Concept

Les résultats de la recherche sont élaborés pour constituer des pôles de savoir et des guides d'action à l'intention des acteurs de la pratique. Cette série s'adresse aux milieux de la foresterie et de la protection de la nature, aux autorités, aux écoles ainsi qu'aux non-initiés.

Les versions allemandes de cette série sont intitulées
**Merkblatt für die Praxis** ISSN 1422-2876.
Les éditions italiennes paraissent occasionnellement dans le périodique
**Notizie per la pratica** (ISSN 1422-2914).

**Les dernières parutions** (consultez www.wsl.ch/notices)

- N° 59: La forêt suisse face aux changements climatiques: quelles évolutions attendre? B. ALLGAIER LEUCH *et al.* 2017. 12 p.
- N° 58: Chalcographe et micrographe. B. FORSTER 2017. 8 p.
- N° 57: Le dépérissement des pousses du frêne. Biologie, symptômes et recommandations pour la gestion. D. RIGLING *et al.* 2016. 8 p.
- N° 56: Développement urbain et paysager dans les zones proches des agglomérations. Exigences spatiales de l'être humain et de la nature. S. TOBIAS *et al.* 2016. 16 p.
- N° 55: Le chêne face aux changements climatiques. Perspectives d'avenir d'une essence. P. BONFILS *et al.* 2015. 12 p.
- N° 54: Le chancre de l'écorce du châtaignier. Symptômes, biologie et mesures pour le combattre. D. RIGLING *et al.* 2014. 8 p.
- N° 53: Mise en réseau des habitats dans le paysage agricole. Chances et risques. D. CSENCSICS *et al.* 2014. 8 p.
- N° 52: Bois mort en forêt. Formation, importance et conservation. T. LACHAT *et al.* 2013. 12 p.

### Managing Editor

Martin Moritzi
Institut fédéral de recherches WSL
Zürcherstrasse 111
CH-8903 Birmensdorf
martin.moritzi@wsl.ch
www.wsl.ch/notices

Le WSL est un institut de recherche du Domaine des EPF.

Traduction: Jenny Sigot Müller, WSL
Mise en page: Jacqueline Annen, WSL
Impression: Rüegg Media AG

climatiquement neutre
powered by ClimatePartner°
Impression | ID 11726-1503-1001

Sources mixtes
Groupe de produits provenant de forêts bien gérées et d'autres sources contrôlées
www.fsc.org Cert no. SQS-COC-100271
©1996 Forest Stewardship Council