Notice
pour le praticien

ISSN 2296-4436

Institut fédéral de recherches WSL
CH-8903 Birmensdorf

© WSL Birmensdorf, 2021

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

68
Mai
2021

Comprendre la diversité et les fonctions des sols forestiers en Suisse

Marco Walser, Roger Köchli, Lorenz Walthert, Stephan Zimmermann et Ivano Brunner



Fig. 1. La formation forestière initiale et continue donne des clés pour comprendre comment les sols se forment, comment on les caractérise et quelles fonctions ils exercent.

Les sols forestiers, contrairement à beaucoup de sols agricoles cultivés, ont une structure pratiquement intacte et naturelle, car ils ne sont ni labourés ni fertilisés. Leurs caractéristiques permettent d'une part de reconstituer les processus passés de formation du sol, et livrent d'autre part d'importantes indications sur les propriétés et les fonctions de ces sols. Cela permet de caractériser et d'interpréter le sol sur lequel se déroulent les travaux forestiers (fig. 1).

Le sol forestier – un miracle de la nature

Le sol forestier constitue la couche extérieure de la croûte terrestre. Il se forme au cours du temps sous l'influence du climat, de la géologie, du relief et des êtres vivants. Le sol est l'élément qui relie l'atmosphère (air), la biosphère (milieu de vie des organismes), l'hydrosphère (eau) et la lithosphère (roche-mère).

Il contient des éléments solides et des pores. La charpente du sol est formée par des composants minéraux et des matières organiques mortes (humus), qui forment souvent de nouveaux agrégats, donnant ainsi une structure au sol. Dans ces agrégats, et surtout entre eux, s'étend un système de pores ramifiés qui se remplit plus ou moins d'eau ou d'air en fonction de la teneur en eau du sol. C'est dans ce système poreux que les plantes puisent leurs ressources – l'eau, les substances nutritives et l'oxygène. Il s'agit aussi d'un milieu où vivent d'innombrables organismes appartenant par exemple à la faune du sol ou au monde des champignons et des bactéries (voir Notice pour le praticien «Le sol forestier vit – diversité et fonctions des organismes vivants du sol»).

Formation des sols forestiers

Le processus menant à un sol forestier est très long (fig. 2). La plupart des sols forestiers du Plateau suisse se développent depuis quelque 10 à 12 000 ans, c'est-à-dire depuis la fin de la dernière glaciation. Après le retrait des glaciers, des processus physiques, chimiques et biologiques ont agi sur les rochers, les moraines et les alluvions fluviaux. Ils ont morcelé les roches et partiellement dissous et transformé les particules minérales. Les premières plantes ont alors pu s'établir. Ces processus sont toujours en cours aujourd'hui. Sous l'effet de l'eau de pluie légèrement acide par nature et des acides sécrétés par les racines, la roche-mère continue de s'altérer et les minéraux de se dissoudre. À partir des produits dissous se forment de nouveaux minéraux tels que les argiles ainsi que les oxydes de fer et d'aluminium. Selon la disponibilité en eau et la perméabilité du substrat, ces substances sont entraînées en profondeur dans le sol. Dès que la végétation se développe sur un sol encore très jeune, du matériel végétal mort s'y dépose et se décompose sous l'effet de processus biologiques. La décomposition reste incomplète pour une partie de ce matériel, qui devient de l'humus et se développe principalement dans la partie supérieure du sol (humification; voir Notice pour le praticien «Le sol forestier vit – diversité et fonctions des organismes vivants du sol»). En outre, la substance organique se lie aux particules minérales du sol et forme des agrégats. Ceux-ci donnent au sol sa structure, consistant en une charpente de particules solides et en un système fortement ramifié de pores de divers diamètres. Une partie de l'humus est partiellement décomposée, libérant ainsi ses éléments minéraux (minéralisation). Ces nutriments sont assimilables par les plantes. L'intensité des processus de formation du sol (altération, formation de nouveaux minéraux, structuration, migration et formation d'humus) diminue avec la profondeur, ce qui fait apparaître des couches différenciables par leur morphologie. Ce sont les horizons du sol. La formation du sol est très lente et se déroule sur des siècles ou des millénaires. De toute évidence, le sol doit être utilisé avec précaution, puisque les dégâts ne peuvent pas se réparer en quelques années.

Facteurs de formation des sols

Pendant leur formation (pédogenèse), les sols évoluent de façons très diverses, en fonction de l'influence des divers facteurs en jeu. On distingue généralement cinq facteurs déterminant cette évolution (tab. 1).

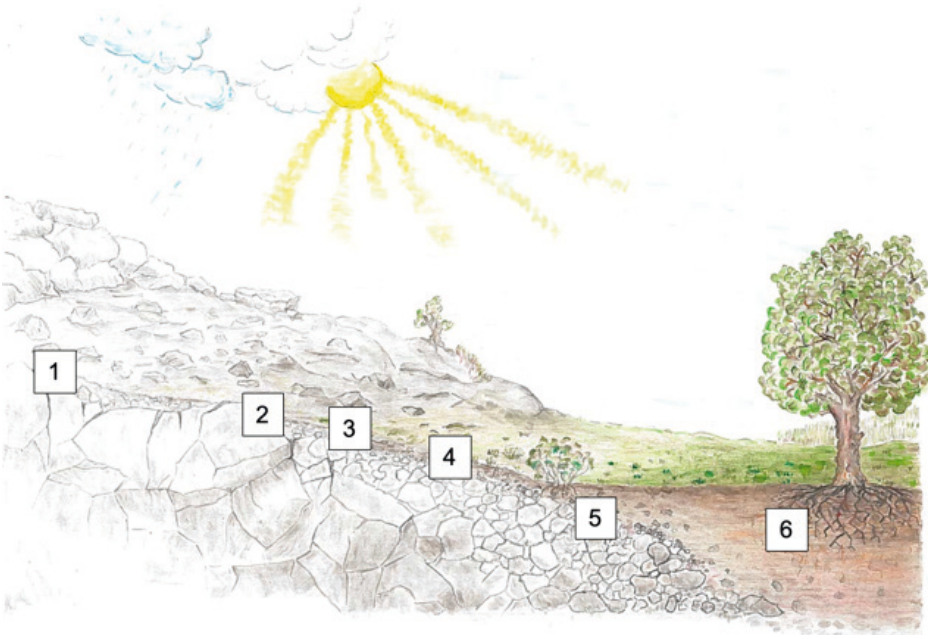


Fig. 2. Genèse d'un sol forestier. 1) La formation d'un sol commence en surface et se poursuit en profondeur au cours du temps. 2) La roche se désagrège, des interstices et des fissures apparaissent. 3) Des mousses et des lichens s'installent. 4) Peu à peu, une couche d'humus se forme et permet progressivement à des plantes plus exigeantes de s'établir. 5) Les processus pédogénétique transforment de plus en plus la roche en terre meuble et, finalement, des arbustes et des arbres s'y enracinent et survivent. 6) La couverture végétale protège le sol de l'érosion par le vent et la pluie. Les plantes produisent dès lors une grande quantité de matériel végétal, qui se transforme en humus et améliore le sol.

Processus de formation du sol

Les sols se forment la plupart du temps très lentement et sur plusieurs millénaires. Leur formation n'est jamais vraiment terminée, car elle est constamment soumise à divers processus (tab. 2).

Les facteurs et processus de formation du sol agissant sur une station forestière donnée résultent en un sol typique pour la station, présentant diverses couches superposées (horizons) et possédant des caractéristiques et propriétés spécifiques.

Caractéristiques et propriétés du sol

Le sol fait penser à un livre où l'on peut puiser quantité d'informations. Lorsqu'on «lit» ce livre, en procédant à l'appréciation du sol, on détermine ses caractéristiques en observant le profil pédologique vertical, que l'on obtient en creusant une fosse pédologique. Ces caractéristiques permettent de connaître les processus de la formation du sol et donnent des indications sur ses propriétés (tab. 3), p. ex. le régime hydrique ou la circulation de l'air et des éléments nutritifs.

De nombreux sols présentent des couches successives. Les caractéristiques pédologiques de ces strates varient plus ou moins fortement de l'une à l'autre. Dans la classification des sols, sur la base d'une combinaison de caractéristiques spécifiques, de telles zones sont classifiées en horizons pédogénétiques. La succession de ces horizons permet à son tour de définir les types de sols.

Tab. 1. Facteurs de formation du sol.

Géologie:	Roche-mère (p. ex. calcaires, granits, gneiss, roches mixtes)
Climat:	Précipitations (humide, sec), température (froid, chaud)
Relief:	Exposition (nord, sud), pente, configuration du terrain (plaine, versant, butte, cuvette)
Organismes:	Plantes, animaux, activités humaines
Temps:	Durée de la formation du sol (p. ex. de la fin de la dernière glaciation à nos jours, ou à partir d'un phénomène d'érosion ou de dépôts d'alluvions)

Tab. 2. Principaux processus de formation des sols.

Formation d'humus:	Décomposition de matériel organique mort et transformation en humus avec le concours de la pédofaune
Altération:	Désintégration physique de la roche-mère en particules plus petites (particules minérales, sable, limon, argile et minéraux) et dissolution chimique des parties solides
Néoformation de minéraux:	Reconstitution de minéraux à partir des produits de l'altération des minéraux
Formation de structures:	Regroupement de particules du sol par agrégation (p. ex. formation d'agrégats dans le système digestif des vers de terre) et par gonflements et retraits du matériel argileux; cela fait apparaître des systèmes interconnectés de pores de différentes dimensions
Migration:	Migration de minéraux argileux, d'humus ou de fer de la partie supérieure du sol vers les couches plus profondes

Tab. 3. Propriétés du sol pertinentes pour l'analyse de la station.

Couleur du sol:	Caractérisation des couleurs de la terre fine à l'aide d'un nuancier; permet d'identifier et de délimiter les horizons, d'estimer la teneur en humus et de repérer l'hydromorphie (signes de saturation en eau)
Texture du sol:	Appréciation de la texture de la terre fine minérale (< 2 mm) par le toucher (sable 2,0-0,05 mm, limon (silt) 0,05–0,002 mm, argile < 0,002 mm)
Structure:	Appréciation visuelle: structure particulaire (non cohérente, particules du sol juxtaposée, sans liens, p. ex. grains de sable), structure cohérente (masse liée, compacte), structure grumeleuse, agrégée (structuré, agrégation lâche ou stable de particules du sol, p. ex. grumeaux)
Pierrosité:	Appréciation visuelle: part de volume et répartition des classes de grosseur des pierres (particules > 2 mm)
Densité du sol:	Détermination de la résistance à la pénétration d'un couteau dans la paroi du profil; plus le sol est dense, plus la résistance est forte
Signes d'hydromorphie:	Appréciation visuelle des caractéristiques d'engorgement du sol: concrétions (nodules) de manganèse (points noirs), taches de rouille, marbrures (coloration rouge pâle), couleurs de réduction (gris ou bleu; fig. 3)
Porosité:	Appréciation visuelle de la porosité (aération du sol): nombre de pores et de cavités
Acidité:	Détermination du pH à l'aide d'un réactif et d'une échelle de référence (pH-Hellige); détermination de la teneur en calcaire de la terre fine et de la roche en testant la réaction effervescente avec de l'acide chlorhydrique dilué (10 %)
Enracinement:	Appréciation visuelle du nombre de racines séparément pour trois classes de diamètres: racines fines < 2 mm, racines moyennes 2–5 mm, racines grossières > 5 mm

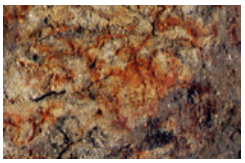
	Caractéristiques de l'hydromorphie	Degré d'hydromorphie	Disponibilité en oxygène	
Eau stagnante	Concrétions de manganèse – Points noirs dans une matrice brune	faible	rarement limitée et seulement localement	
	Taches de rouille diffuses – Tacheté de rouille (fer oxydé)	moyen	parfois limitée	
	Marbrures Colorations rouge pâle – Zones pâles aux contours rouille rougeâtres	fort	souvent limitée	
	Décoloration hydromorphe – Horizon gris clair sous une couche organique	fort	souvent limitée	
Eaux de fond ou de pente	Taches de rouille contrastées – Rouille due au fer oxydé le long de fissures et d'anciens canaux radiculaires	fort	souvent limitée	
	Coloration de réduction – Coloration gris bleu	très fort	toujours limitée	

Fig. 3. Signes d'hydromorphie dans les sols forestiers.

L'ABC du sol – classement en horizons

Le classement des horizons du sol se fait séparément pour la couche organique d'accumulation et pour la terre minérale. (Fig. 4). Les horizons de ces deux entités sont déterminés par une combinaison de caractéristiques et désignés par une lettre: L, F, H sont des horizons organiques alors que A, B, C sont des horizons de terre minérale.

L – Litière: constituée principalement de débris végétaux d'une année, non décomposés (feuilles, aiguilles, etc.)

F – horizon de fermentation (ou de décomposition): constitué principalement de matériaux organiques fins de plusieurs années, incomplètement décomposés. Les débris végétaux sont encore partiellement reconnaissables.

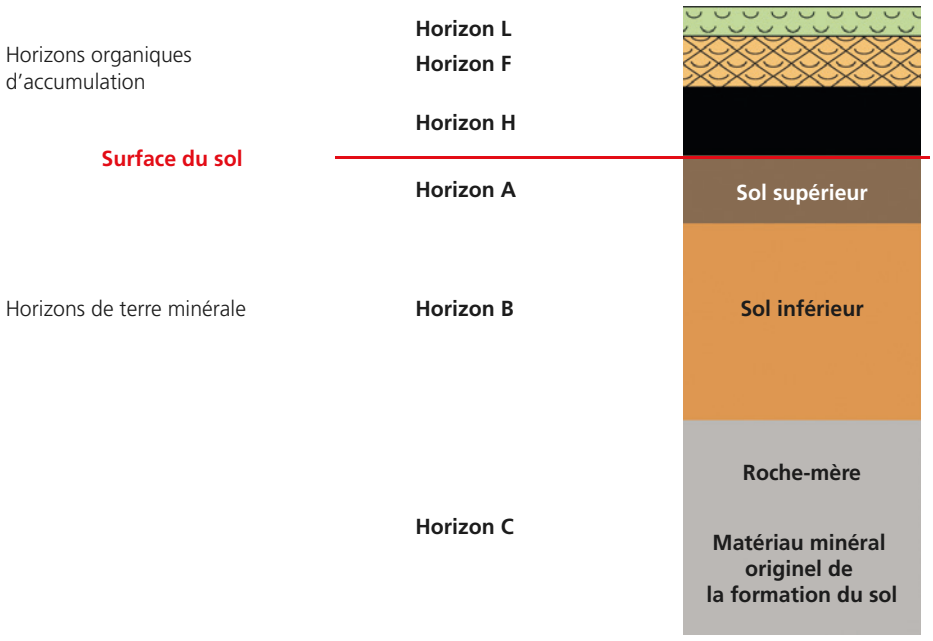


Fig. 4. Structure schématique d'un sol comportant des horizons organiques et des horizons de terre minérale.

H – horizon humique: constitué de matériaux organiques fins fortement décomposés, de couleur foncée à noire. Les débris végétaux ne sont plus reconnaissables.

A – horizon supérieur (sol supérieur): partie supérieure du sol minéral contenant de l'humus et éventuellement située sous une couche de matériaux organiques. Cette partie du sol est de couleur foncée. Plus elle est foncée, plus la teneur en humus est élevée. Il s'agit de la partie du sol biologiquement la plus active et la plus riche en éléments nutritifs.

B – horizon inférieur (sol inférieur): terre minérale située sous l'horizon A, souvent de couleur brune à brun rougeâtre. Cet horizon B est la principale zone d'altération. Des éléments chimiques y sont libérés et de nouveaux composés apparaissent. Dans les sols bien aérés, le fer se transforme en oxydes ou hydroxydes, qui donnent sa coloration brune caractéristique à la terre fine. Avec l'horizon A, l'horizon B forme la zone principale d'enracinement et ainsi la zone la plus riche en éléments nutritifs de nombreux profils pédologiques.

C – roche-mère (sous-sol): partie la plus profonde du sol, souvent colorée par la couleur propre de la roche, qui n'est pas encore fortement influencée par la formation du sol. La plante trouve ici moins d'éléments nutritifs. L'enracinement est moins dense et sert en principe surtout à l'ancrage et à l'alimentation en eau de l'arbre.

D'autres horizons minéraux peuvent être présents en fonction des conditions stationnelles (géologie, climat, relief, organismes, état d'avancement de la pédogénèse) (tab. 4).

Tab. 4. Bref descriptif des principaux horizons minéraux du sol (d'après WALTHERT *et al.* 2004).

A	Horizon supérieur du sol minéral, mélangé avec de l'humus, riche en éléments nutritifs. Ah: Sol supérieur à forte teneur en humus et à structure grumeleuse Aa: Formé sous l'influence de l'eau en surface, généralement sans structure reconnaissable, parfois avec signes de saturation, de type anmoor
E	Horizon éluvial (horizon d'éluviation): horizon clair, pâle sous l'effet du lessivage, migration du fer et de substances organiques (podzolisation). El: Horizon de lessivage résultant de la migration de l'argile (lessivage), appauvri en argile, au-dessus d'un horizon enrichi en argile (Bt). Généralement plus clair que l'horizon Bt
B	Horizon minéral d'altération (sol inférieur), brun à brun rougeâtre. Modification de la coloration et de la teneur en éléments comparativement à la roche-mère, par altération et/ou néoformation des argiles. Bt: Sol inférieur enrichi en argile par accumulation: cette argile provient de l'horizon El (au-dessus) et contient 3-5% d'argile de plus que El. Bh: Sol inférieur enrichi en matière humique par migration: ces éléments humiques proviennent de l'horizon E (au-dessus). Bs: Sol inférieur enrichi en oxydes de fer ou sesquioxydes par migration: ces oxydes proviennent de l'horizon E (au-dessus).
S	Horizon d'eau stagnante: horizon à perméabilité réduite, influencé périodiquement par de l'eau rémanente. Sw: Zone de stagnation temporaire, perméabilité meilleure que l'horizon Sd au-dessous Sd: Horizon imperméable provoquant l'accumulation d'eau
G	Horizon influencé par les eaux de fond ou de pente. Go: Formé en présence d'oxygène (conditions oxydantes). Taches de rouille dans la zone d'oscillation de la nappe phréatique ou de pente. Gr: Formé en l'absence d'oxygène (conditions réductrices). Horizon presque constamment saturé en eau (coloration gris bleu).
C	Roche-mère (roche meuble), souvent début d'altération, encore peu influencée par la formation du sol
R	Roche, substrat rocheux: roche-mère non altérée

Utilisation de l'ABC du sol

La succession des horizons du sol (A, B, C, etc.) permet de déterminer le type de sol (d'après WALTHERT *et al.* 2004).

Sols bruts: A-C
Les sols bruts sont des sols jeunes, encore peu évolués, comportant les horizons A-C. Sous une éventuelle couche organique, on trouve généralement un horizon A foncé et pierreux, suivi de l'horizon C de la roche-mère.

Ranker: issu d'une roche sans calcaire, souvent superficiel à moyennement profond, 15-70 cm (aucune réaction à l'acide chlorhydrique).

Régosol: issu de roches mixtes meubles (fig. 5a). Contient principalement des silicates et de faibles proportions de roches calcaires. Peu de carbonates.

Pararendzine: issu de roches mixtes carbonatées, dures ou meubles, p. ex. lœss, marne, sédiments graveleux, grès calcaire (légère réaction effervescente à l'acide chlorhydrique, moyennement carbonaté).

Rendzine: issu de roches carbonatées (fig. 5b). L'horizon A peut être légèrement acide, mais sinon la terre fine est neutre à alcaline. Haute teneur en carbonate.

Sol brun: A-B-C
Le sol brun (fig. 5c) est généralement d'un brun intense, légèrement à fortement acide, les horizons A-B-C n'étant pas toujours très faciles à distinguer. Les sols bruns présentent un bon équilibre pour ce qui est de l'aération et des éléments nutritifs. Les arbres peuvent souvent s'enraciner profondément, ces sols sont profonds.

Sols bruns lessivés: A-ElB-Bt-C
Les sols bruns lessivés (fig. 5d) sont caractérisés par la migration des argiles du sol supérieur vers les couches inférieures. Cela confère une coloration pâle à la partie supérieure du sol, l'horizon (El)B, et la partie inférieure du sol est d'un brun intense (horizon Bt). Dans la partie inférieure du profil, les argiles accumulés augmentent la capacité nutritive et de stockage de l'eau, ce qui renforce cependant le danger d'engorgement dans l'espace racinaire.

Podzol: A-E-Bh-Bs-B-C
Les podzols (fig. 5e) comprennent un horizon de lessivage (E, horizon éluvial)

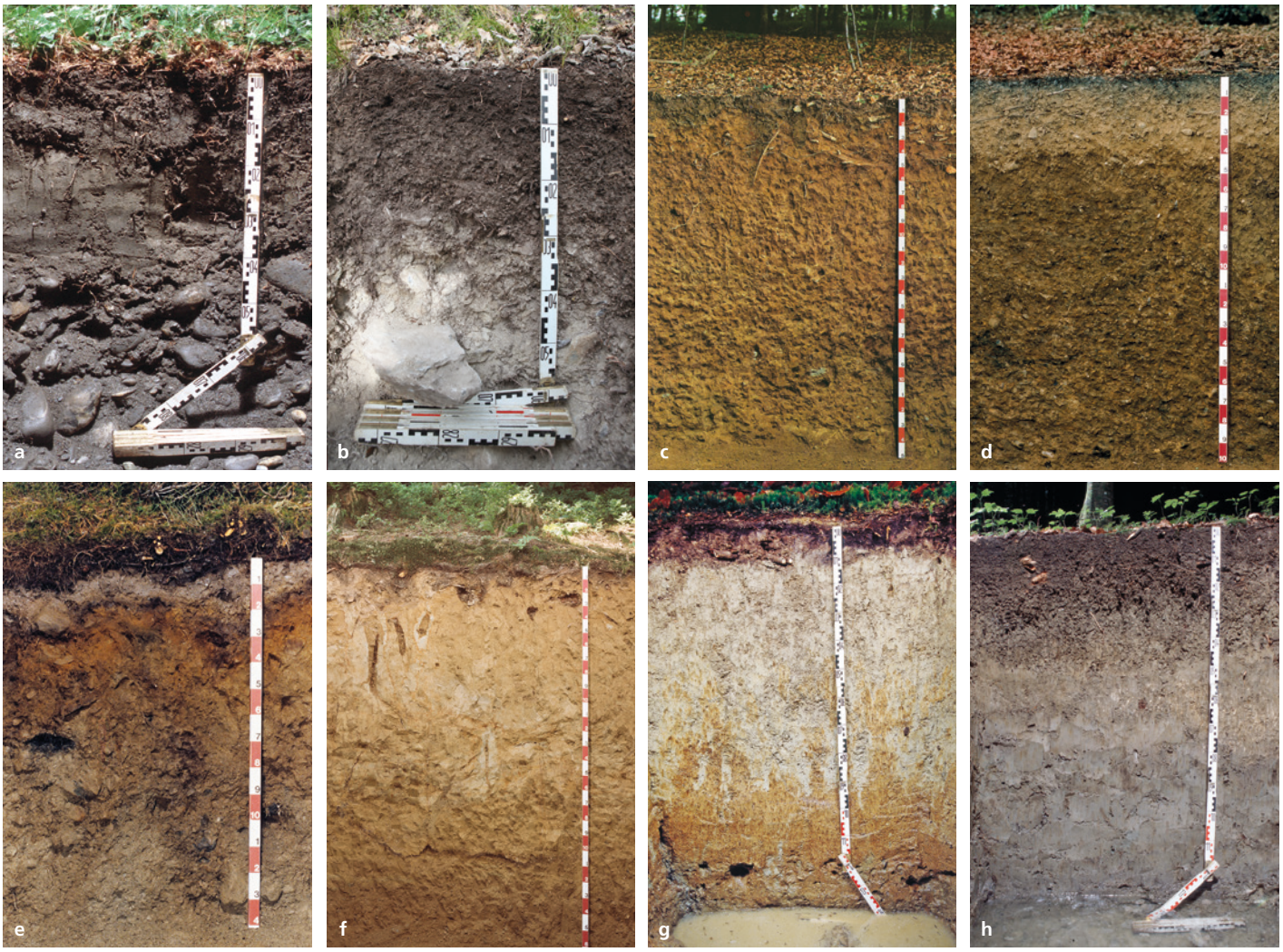


Fig. 5. a) Régosol, b) rendzine, c) sol brun, d) sol brun lessivé, e) podzol, f) pseudogley, g) stagnogley, h) gley.

gris clair appauvri en substances organiques et en fer. Étymologiquement, podzol signifie en russe «sous les cendres». Sous l'horizon de lessivage se succèdent les horizons d'accumulation, d'abord l'horizon enrichi en humus (horizon Bh, de couleur foncée), puis l'horizon enrichi en oxydes de fer et d'aluminium (horizon Bs, brun rouille). Les podzols se forment sur des sols riches en quartz et fortement perméables (généralement sur de la molasse, du granit ou du gneiss), leur forme d'humus étant un humus brut.

Pseudogley: A-Sw-Sd

Les pseudogleys (fig. 5f) sont des sols caractérisés par de l'eau stagnante et souvent issus de sols bruns lessivés. On parle de sols pseudogleyifiés lorsque l'eau d'infiltration cause un engorgement des couches tassées du sol inférieur et qu'elle influence les horizons du dessus. Ces sols sont souvent marqués par l'alternance de phases humides en hiver et sèches en été. Dans la zone de stagnation temporaire (horizon Sw) apparaissent principalement des points noirs, appelés concrétions de manganèse, alors qu'on observe une marmorisation gris rouille dans la zone plancher de stagnation (horizon Sd). Une zone d'eau stagnante se forme lorsque des particules fines du sol (argiles) migrent à partir des couches supérieures, réduisant ainsi la perméabilité du sol inférieur. De ce fait, les pores sont saturés par l'eau d'infiltration et mal aérés. Les racines des arbres ne peuvent guère coloniser cette partie du sol en raison du manque d'oxygène. En outre, la densification du sol par la migration des argiles entrave la croissance racinaire.

Stagnogley: A-ES

Un stagnogley (fig. 5g) est un pseudogley comportant un fort horizon décoloré (horizon ES). Cette décoloration est due à une saturation en eau de longue durée qui atteint la couche organique. L'eau du sol s'enrichit ainsi en acides humiques, qui lient les oxydes et hydroxydes, responsables de la coloration de la terre minérale. Lorsque le niveau d'eau redescend, ces oxydes sont entraînés latéralement ou vers le bas. Ce processus est appelé décoloration hydromorphe et ne doit pas être confondu avec la podzolisation, malgré la ressemblance.

Gley: A-Go-Gr

Les gleys (fig. 5h) sont des sols influencés par les eaux de pente ou de fond. Ils se développent à proximité de dépôts alluviaux, mais aussi dans des cuvettes ou sur des pentes où le niveau de la nappe est

élevé. La partie supérieure des gleys est foncée et suivie par une zone d'oxydation d'humidité variable avec des taches de rouille (horizon Go). Au-dessous, l'horizon de réduction (Gr) est bleu gris et constamment sous influence de la nappe phréatique. Le manque d'oxygène y empêche toute croissance des racines.

Sols tourbeux, sols alluviaux
Les sols alluviaux et les sols tourbeux (marécageux) sont, comme les gleys, souvent saturés en eau. Situés à proximité des cours d'eau, les sols alluviaux sont périodiquement inondés et couverts de sédiments. Les sols marécageux se forment souvent dans des cuvettes ou sur des plateaux où l'eau ne peut pas s'écouler.

Formes d'humus

Contrairement aux sols agricoles, qui ne présentent pas de couche organique distincte, les sols forestiers sont décrits non seulement par un type de sol (succession des horizons de la terre minérale), mais aussi par les formes d'humus. Comme le type de sol, la forme d'humus est le miroir des facteurs pédogénétiques agissant sur une station forestière, et dépend donc aussi du peuplement et de sa gestion. La forme d'humus renseigne sur l'activité biologique du sol supérieur, influencée par la température, l'humidité, la composition de la litière ainsi que par les conditions chimiques prévalant dans le sol. Lors du rajeunissement, les formes d'humus jouent le rôle de lit de germination pour la prochaine génération d'arbres.

Dans les forêts suisses, sur des sols à perméabilité normale, les formes d'humus typiques sont le mull, le moder ou l'humus brut (mor). Elles se développent principalement dans des conditions aérobiques, c'est-à-dire avec une bonne aération et un approvisionnement suffisant en oxygène. Sur les stations qui présentent de longues périodes de saturation par l'eau et des conditions souvent anaérobiques jusqu'en surface, on trouve les formes d'humus fortement hydromorphes que sont l'anmoor et la tourbe (anaérobique: approvisionnement insuffisant en oxygène). Les formes d'humus sont classées en fonction de l'épaisseur et de la succession des horizons organiques ainsi que des horizons A sous-jacents (voir Notice «Le sol forestier vit – diversité et fonctions des organismes vivants du sol»). Les formes d'humus comprennent le sol supérieur et la couche d'accumulation organique (litière) (fig. 6).

Mull: L-A
Un mull est une forme d'humus biologiquement active. Il se caractérise par une couche de litière généralement âgée d'une année au plus (horizon L) et par le sol supérieur fortement développé (horizon A >8 cm), dans lequel le matériel organique est intimement lié à la terre minérale. Ce mélange confère sa couleur foncée à l'horizon A. Les animaux fouisseurs y dominent, notamment les vers de terre, mais aussi les cloportes, les millepattes et d'autres arthropodes. L'horizon L peut manquer en fonction de la saison, lorsque l'activité biologique est forte. Le mélange de substances humiques avec la terre minérale fait apparaître des complexes argilo-humiques, qui assurent un bon stockage des matières nutritives. Dans l'horizon A, le pH peut varier d'acide à basique, en fonction de la station. Des conditions météorologiques équilibrées et une litière facilement dégradable sont favorables au mull et à l'activité biologique élevée qui s'y déroule. La litière est d'autant plus dégradable qu'elle est riche en matières nutritives, ce qu'exprime notamment le rapport C/N. Par exemple, plus le contenu en azote (N) est élevé par rapport au contenu en carbone (C), plus le rapport C/N est bas. La forme d'humus «mull» indique typiquement un rapport C/N entre 9 et 18. Ce sont notamment les essences feuillues nobles et pionnières qui produisent une telle litière riche en nutriments. C'est pourquoi les sols supérieurs avec mull sont généralement bien pourvus en matières nutritives.

Moder: L-F-A
Un moder est une forme d'humus acide fortement colonisée par des champignons, ce qui donne lui donne son odeur typique de décomposition. L'activité des vers de terre et d'autres animaux fouisseurs est entravée, surtout par l'acidité du milieu. La décomposition de la litière étant lente, un horizon de fermentation se forme pendant plusieurs années sous cet horizon L. L'épaisseur de l'horizon A est en principe inférieur à 8 cm. Le moder, moins actif biologiquement que le mull, représente une forme intermédiaire entre le mull et l'humus brut. Typiquement, le moder indique un rapport C/N de 17 à 25, soit plus élevé que le mull.

Humus brut (mor): L-F-H-A
L'humus brut est composé de débris végétaux (litière) qui se décomposent lentement (horizon L) et se développe en règle générale sur des sols acides. La décomposition de la substance organique est entravée par la réaction fortement acide du sol et par la chimie défavorable dans la litière. C'est alors que se forme un horizon de fermentation (horizon F). Avec des conditions aussi acides, la pédofaune est absente, qui assurerait sinon une large part de la décomposition organique. Même les champignons résistant à l'acidité, souvent très nombreux, ne peuvent décomposer qu'une partie de ces débris organiques. C'est pourquoi l'humus brut, à la différence du moder, contient en plus un horizon humique

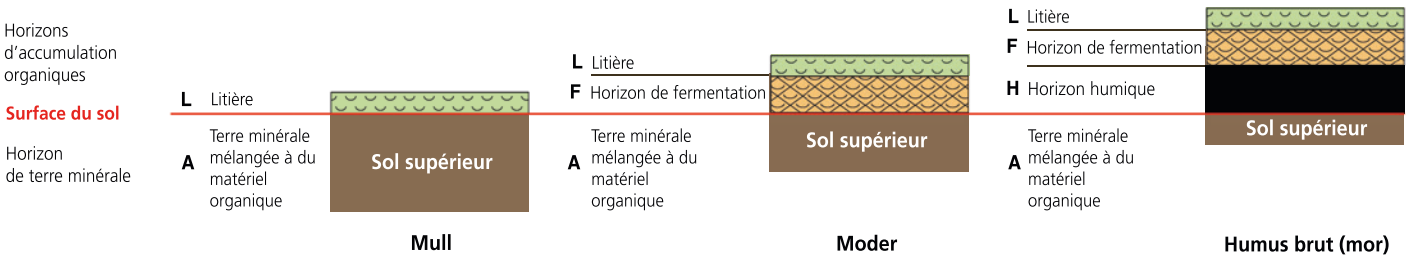


Fig. 6. Structure schématique des mull, moder et humus brut (mor), les trois formes d'humus les plus fréquentes en forêt: sol supérieur avec les horizons d'accumulation organiques.

(horizon H), et constitue donc une couche organique plus épaisse. Le mélange du matériel organique avec la terre fine minérale ne se fait guère que par l'eau de pluie. L'horizon A est par conséquent très mince. Avec la litière pauvre en éléments nutritifs et les conditions défavorables de décomposition, le rapport C/N est de 20 à 33.

Anmoor: Aa-G

Un horizon anmoor se forme avec les dépôts de litière facilement dégradable, mais dont la minéralisation complète est empêchée par le haut niveau de l'eau stagnante. Cela donne naissance à des horizons A hydromorphes qui sont mouillés, de coloration très noire et qui contiennent une grande part de substances organiques très fines et non structurées (horizon Aa, horizon anmoorique). La couleur noire est due aux substances organiques résultant d'une dégradation incomplète sous l'action de microorganismes anaérobiques.

Tourbe: T

La tourbe est constituée d'une accumulation de débris végétaux incomplètement décomposés, principalement de sphaignes (*Sphagnum* sp.). Ces débris ne se décomposent que très lentement dans un milieu saturé en eau. La tourbe présente souvent une structure spongieuse, fibreuse, sans parties minérales, et peut constituer une couche très épaisse. À la différence de l'anmoor, la tourbe est toujours très acide.

La clé des formes d'humus (fig. 7) permet de déterminer schématiquement et rapidement la forme d'humus des sols forestiers.

Lors du rajeunissement, les graines en germination et les plantules des diverses espèces d'arbres posent des exigences très variées au lit de germination. Le mélèze et le pin sylvestre germent typiquement sur des sols minéraux (horizons A, B et C) et évitent les couches organiques (horizons F et H). Ce sont des «colonisateurs de sols minéraux». Des essences nobles comme l'érable sycomore, le frêne, l'orme ou le tilleul se rajeunissent le mieux dans des conditions qui correspondent au mull. Le chêne et le hêtre se rajeunissent sur les mulls et les moders, mais échouent sur des humus bruts prononcés. L'arolle en revanche germe bien sur l'humus brut, un lit de germination très humique et acide lui convient bien. Le pin de montagne et l'épicéa peuvent s'établir sur un mull, un moder ou un humus brut.

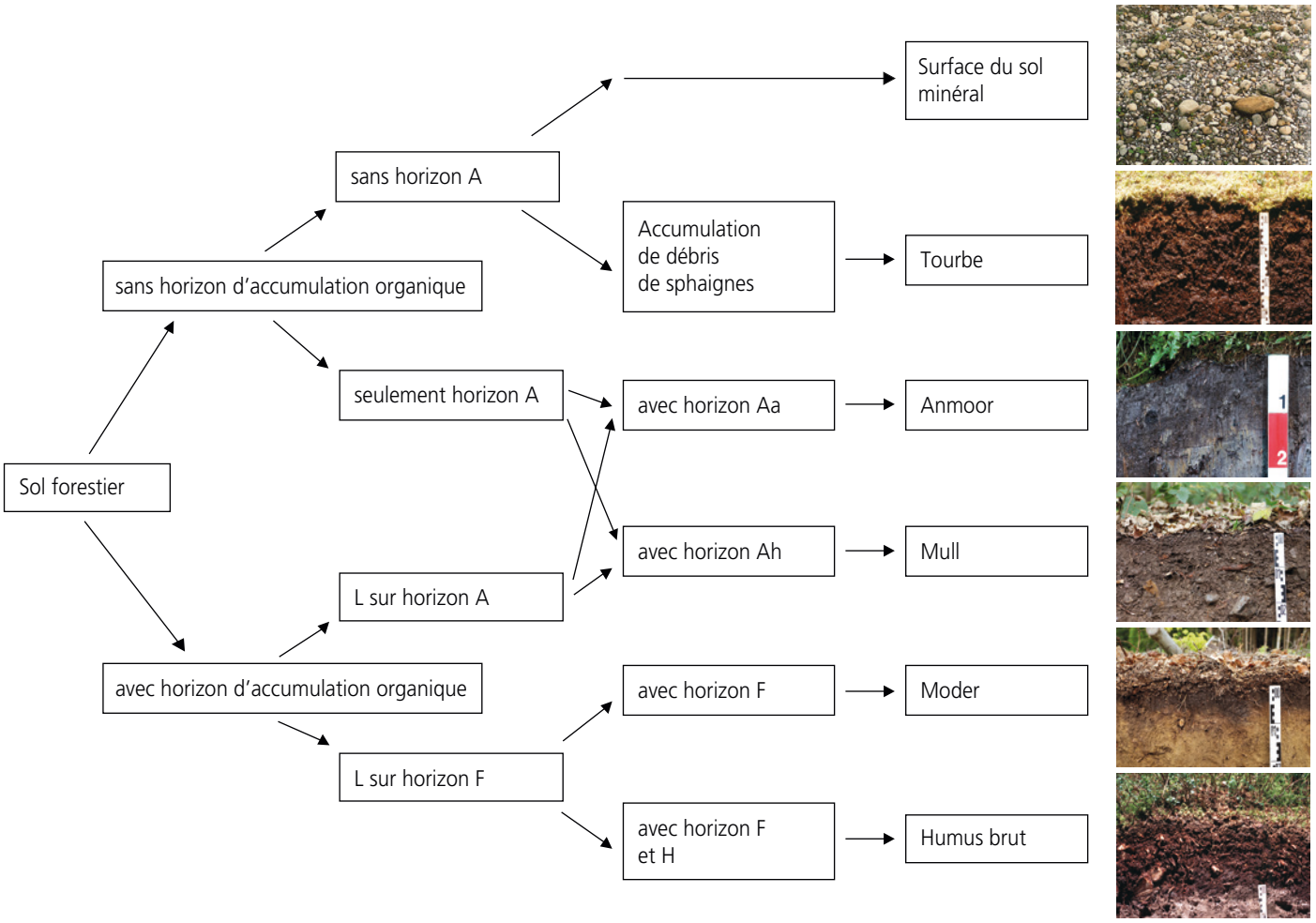


Fig. 7. Clé des formes d'humus – détermination simplifiée de la forme d'humus des sols forestiers. L: litière (débris végétaux nettement reconnaissables), F: horizon de fermentation (pluriannuel, litière en fermentation partiellement décomposée, débris végétaux en partie encore reconnaissables), H: horizon humique (matériel uniquement organique, humifié, origine des débris végétaux non reconnaissable), A: sol supérieur minéral humique, Aa: sol supérieur minéral très humique (anmoorique, habituellement hydromorphe, non structuré), Ah: sol supérieur minéral humique (en général grumeleux).

Développement et répartition des sols forestiers

En raison des nombreuses formes de reliefs et de formations géologiques en Suisse, des types de sols forestiers très divers s'y sont développés sur des espaces restreints. En fonction des combinaisons des facteurs en jeu, la formation des sols débouche soit sur un sol brut (A-C), un sol développé (A-B-C) ou un sol influencé par l'eau (A-G, A-S) (fig. 8).

Les sols bruts se sont à peine développés et sont nommés différemment en fonction de la roche-mère. Le sol brut est appelé ranker lorsque la roche ne contient pas de calcaire, régosol sur des roches mixtes et rendzine sur des roches calcaires. En Suisse, les sols bruts se trouvent principalement dans les Alpes et le Jura (fig. 9).

Après le stade du sol brut, la formation ultérieure du sol sur roche-mère carbonatée est marquée par la décarbonatation de la terre fine. Le calcaire est la première substance qui s'oppose à l'acidification naturelle croissante au cours de la formation du sol. Tant qu'il est présent, il neutralise les acides, et le pH du sol reste neutre. Lorsque le calcaire a été entièrement dissous, les acides réagissent avec les silicates, et le pH indique une légère acidité.

Si la roche-mère ne contient pas de calcaire, la réaction des acides avec les silicates intervient directement après le stade du sol brut. Cette altération des silicates libère du fer, qui s'oxyde dans les sols aérobiques et colore la terre minérale (brunification). Une telle brunification correspond toujours aussi à la néoformation de minéraux (minéraux argileux et

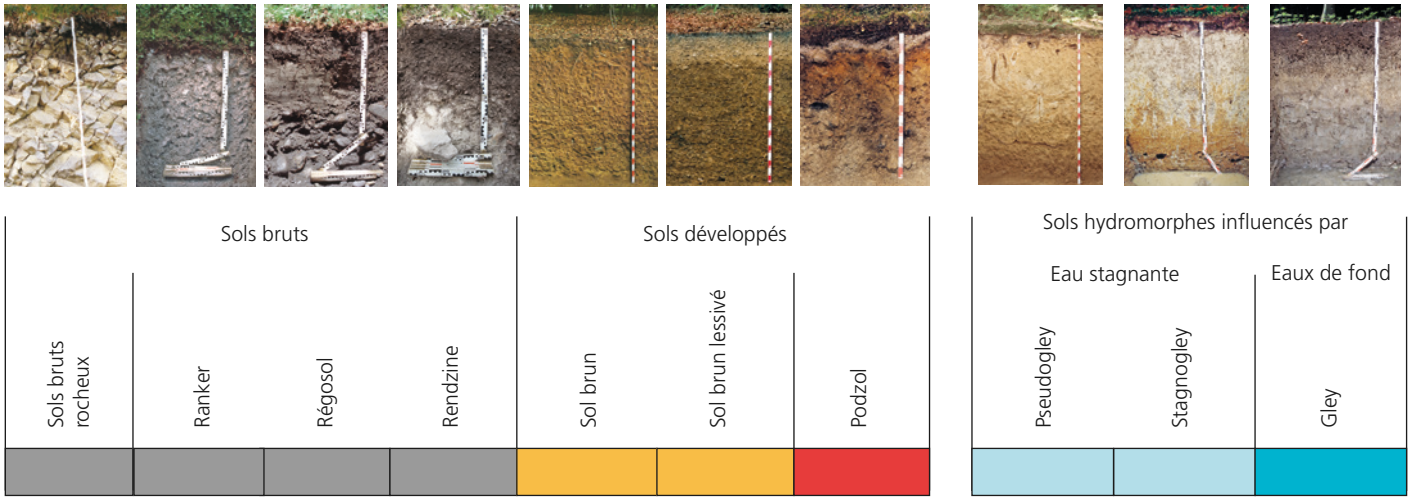


Fig. 8. Aperçu des types de sols forestiers en Suisse.

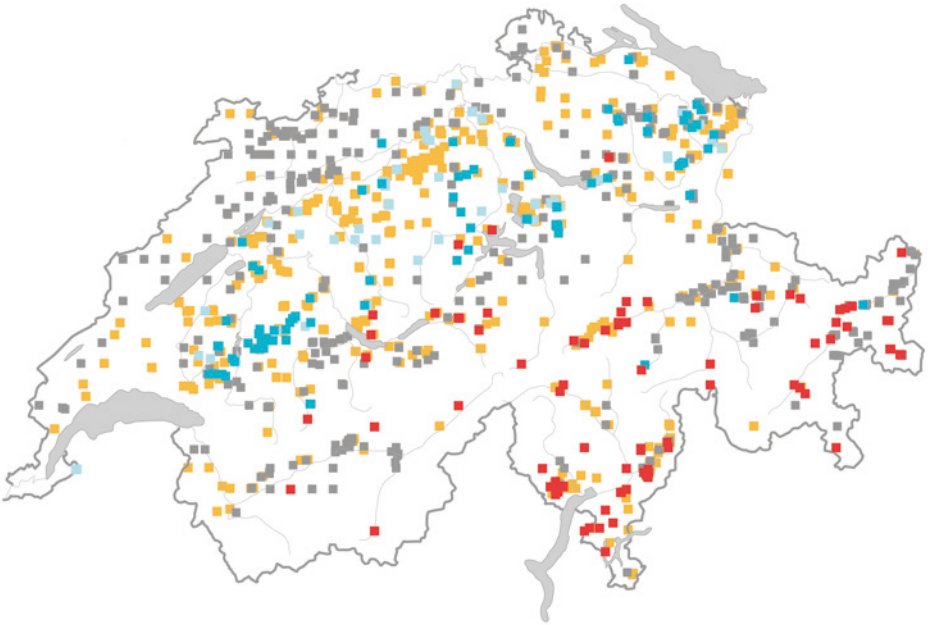


Fig. 9. Répartition de types de sols forestiers fréquents en Suisse (selon la pédothèque du WSL). Gris: sols bruts, brun: sols bruns et sols bruns lessivés, rouge: podzols; bleu claire pseudogleys, bleu foncé: gleys.

oxydes/hydroxydes) ainsi qu'à une structuration. C'est ainsi que se forment les sols bruns. Le processus de formation du sol est ensuite marqué dans le sol supérieur par le dépassement d'une limite de pH qui désagrège les argiles en feuillets argileux. Ces feuillets migrent avec l'eau d'infiltration vers des horizons plus profonds. Ce type de sol est appelé sol brun lessivé. Les sols bruns et les sols bruns lessivés sont les types de sol les plus fréquents dans les forêts du Plateau suisse (fig. 9). L'accumulation d'argiles dans les horizons plus profonds bouche les pores et réduit ainsi la conductivité hydraulique. Cela provoque l'apparition d'eau stagnante et un appauvrissement périodique en air (anaérobie), qui génère des caractéristiques hydromorphes (hydromorphe: influencé par l'eau). Ces sols sont appelés pseudogleys. Les caractéristiques hydromorphes de ces sols sont

dues à la dissolution anaérobique du manganèse et du fer ainsi qu'à leur transport vers des zones aérobiques, où ils s'oxydent et précipitent. Ceci produit les concrétions de manganèse foncées (structures minérales d'oxydes de fer et de manganèse, points noirs), des taches de rouille et des colorations pâles rougeâtres, où les parois des pores et la surfaces des agrégats sont de coloration pâle et où les oxydes de fer sont transportés à l'intérieur des agrégats. Il existe cependant des sols hydromorphes où la stagnation de l'eau n'est pas causée par un engorgement mais par un niveau élevé de l'eau de fond ou de pente. Ces sols sont appelés gleys. Ils se caractérisent souvent par la coloration gris bleu de la partie inférieure du sol, là où le fer, réduit par la saturation constante en eau, n'apparaît plus sous sa forme oxydée de couleur rouille, mais dans des tonalités gris bleu de sa forme réduite. Les horizons sus-jacents contiennent souvent des taches de rouille. À la différence des pseudogleys, ces taches sont localisées à la surface des agrégats. Lorsque le niveau de l'eau est élevé en permanence, sous un climat frais et humide et selon la composition de la végétation, apparaissent des sols organiques, où la dégradation des débris végétaux pauvres en nutriments est tellement retardée par le manque d'oxygène qu'il se forme une épaisse couche de tourbe. En Suisse, les sols hydromorphes (pseudogleys, gleys, tourbe) se rencontrent principalement sur les versants nord des Alpes et dans des cuvettes sur le Plateau, souvent aussi sur des formations géologiques denses et riches en argiles telles que les moraines de fond et les sédiments de flysch (fig. 9).

Les podzols se développent principalement dans les Alpes sur des substrats acides et perméables, sous un climat frais et humide, en présence de litière de conifères et de sous-arbrisseaux pauvre en nutriments (fig. 9). On y trouve des couches d'humus brut très épaisses, dans lesquelles l'eau d'infiltration s'enrichit en acides organiques et produit dans la terre minérale un lessivage de substances colorées telles que le fer, le manganèse et l'humus. C'est pourquoi ces sols révèlent un horizon éluvial pâle sur des horizons d'accumulation en humus ainsi qu'en oxydes de fer et d'aluminium.

Fonctions des sols forestiers

Les principaux critères utilisés pour apprécier un sol forestier sont le bilan hydrique et minéral, la fonction de filtre et de tampon, ainsi que la fonction d'espace vital pour les organismes vivants (voir aussi Greiner *et al.* 2017).

Régulation du cycle des éléments nutritifs

Le sol forestier stocke des éléments nutritifs sous une forme assimilable par les plantes et remplit ainsi une fonction essentielle dans le cycle biogéochimique des arbres. Dans le sol forestier, les feuilles, les aiguilles, les branchages et les racines mortes sont tout d'abord morcelés par les organismes du sol puis dégradés. Des nutriments tels que l'azote et le phosphore des matériaux organiques sont libérés (minéralisés) et remis à disposition des racines. Le phosphore, comme d'autres éléments nutritifs, proviennent aussi de la roche-mère, après leur dissolution sous l'effet des acides organiques produits par les racines et les microorganismes.

Régulation du cycle de l'eau

La forêt, et notamment le sol forestier, sont un important réservoir intermédiaire du cycle de l'eau. Le sol forestier rend l'eau retenue peu à peu à la végétation et aux eaux de fond. La population peut ensuite consommer cette eau à partir des nappes phréatiques.

Stockage du carbone

Le sol forestier séquestre du carbone dans l'humus, à raison de 140 tonnes par hectare en moyenne. Cela représente 20 % de la quantité de carbone stockée par les arbres dans les troncs, branches, feuillage et racines (Hagedorn *et al. 2018*). Par ce stockage du carbone, le sol empêche la libération de gaz à effet de serre (p. ex. le dioxyde de carbone).

Fonction de filtrage

Le sol forestier est un filtre qui purifie non seulement l'eau de pluie, mais aussi

La pédothèque du WSL

La pédothèque du WSL comprend quelque 12 000 échantillons prélevés dans la partie supérieure du sol lors du premier Inventaire forestier national (1982 à 1986, réseau à mailles carrées de 1 km) et des échantillons prélevés sur plus de 1600 profils de 1,2 m de profondeur en moyenne, avec environ six prélèvements par profil (fig. 10).

Les caractéristiques morphologiques, physiques et chimiques de ces profils de sol sont sauvegardées dans la banque de données pédologique du WSL. Avec ses données complémentaires sur la géologie, le climat et la végétation, cette banque de données est devenue un instrument précieux, par exemple pour estimer le stock de carbone dans les sols forestiers (Nussbaum *et al.* 2014) ou pour prévoir les futurs mélanges des essences dans les forêts suisses (Walthert et Meier 2017).



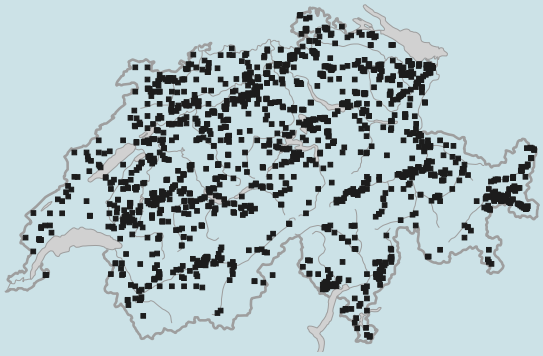


Fig. 10. Pédothèque du WSL et répartition sur la Suisse des quelque 1600 profils de sol dont les échantillons sont conservés dans la pédothèque.

d'autres dépôts (poussières): les substances dissoutes ou en suspension sont fixées dans la matrice du sol (humus, terre minérale). Quant aux métaux lourds nocifs, il est possible qu'ils s'y accumulent, car ils sont difficilement libérés par la matrice du sol forestier.

Habitats pour des organismes
Le sol forestier est habité par d'innombrables microorganismes, animaux du sol et végétaux forestiers (voir Notice pour le praticien «Le sol forestier vit – diversité et fonctions des organismes vivants du sol».). Nombre d'entre eux ne vivent qu'en forêt et ne pourraient exister sans la forêt et son sol.

Régulation du climat par les gaz à effet de serre
La dégradation de matériel organique dans le sol forestier libère des gaz à effet de serre tels que le dioxyde de carbone, le protoxyde d'azote et le méthane. Ces deux derniers gaz, qui produisent un puissant effet de serre, ne sont générés que si le sol est pauvre en oxygène, autrement dit saturé en eau, par exemple en bordure de tourbières hautes.

Source de nourriture?
Les racines et les champignons ne sont pas seulement consommés par les organismes du sol, mais aussi par l'homme. C'est le cas notamment des bolets, des chanterelles et des truffes, qui ne poussent qu'auprès de certaines espèces d'arbres et vivent en symbiose avec leurs racines en formant des mycorhizes (voir la Notice «Les mycorhizes. Une fascinante biocénose en forêt»).

Tous les sols forestiers ne remplissent pas ces fonctions au même niveau de qualité: ce sont les propriétés de chaque sol qui sont déterminantes.

Le sol forestier – miroir de notre société

Le sol est une ressource existentielle pour la vie sur Terre et non-renouvelable à l'échelle humaine (OFEV 2017). Nos sols forestiers sont pourtant soumis à des nuisances très diverses qui mettent leur fonctionnement naturel en danger – du compactage aux charges en métaux lourds, en passant par l'acidification par des apports trop élevés en azote.

Compactage
Un compactage se produit lorsque de lourds engins forestiers sont engagés sur des sols sensibles dans des conditions défavorables, par exemple pendant une longue période de pluie. Il faut alors s'attendre, au moins localement, à ce que le compactage entrave les fonctions et la fertilité du sol (voir Notice pour le praticien «Protection physique des sols en forêt. Protection des sols lors de l'utilisation d'engins forestiers»). Grâce aux formations ciblées s'adressant au personnel forestier, les chefs d'entreprise et les conducteurs d'engins forestiers sont aujourd'hui sensibilisés à la problématique et sont en mesure de prendre des mesures adéquates en vue de mieux ménager le sol.

Acidification
L'acidification due aux apports excessifs d'azote affecte non seulement les arbres mais aussi les sols forestiers, notamment leur biodiversité et leurs fonctions. Selon l'Office fédéral de l'environnement (OFEV), l'acidification anthropogène des sols forestiers, à l'heure actuelle, a pu être freinée, mais non stoppée (OFEV 2017).

Métaux lourds
Les métaux lourds sont principalement émis par l'industrie dans l'atmosphère, avant de se déposer sur les sols forestiers. Par conséquent, il n'existe pratiquement plus de sols forestiers totalement préservés en Suisse (OFEV 2017). Aujourd'hui encore, des métaux lourds tels que le mercure s'y déposent – mais grâce aux prescriptions rigoureuses en matière de protection de l'air, les quantités sont nettement inférieures que dans le passé.

Protection des sols: protéger le sol forestier

La protection des sols en Suisse est réglementée par la législation, depuis l'entrée en vigueur de la loi sur l'environnement en 1985. La loi a principalement pour but de protéger la diversité biologique et la fertilité des sols à long terme, ainsi que de réduire les charges et les dangers. Les fonctions du sol ne sont pas explicitement mentionnées, mais elles sont inséparables de la notion de «fertilité du sol» (OFEV 2017).

La protection des sols contre les atteintes physiques (p. ex. compactage, érosion) et chimiques (p. ex. dépôts excessifs d'azote, de soufre ou de métaux lourds) est mentionnée explicitement. Ces années passées, les immissions de polluants dans les forêts ont pu être fortement réduites par des mesures ciblées (p. ex. introduction des catalyseurs sur les véhicules ou de filtres dans les usines d'incinération) (OFEV 2017). Cependent, les apports d'azote, encore trop élevés, restent problematiques (Guntern *et al.* 2020).

Bibliographie

Blaser, P.; Zimmermann, S.; Luster, J.; Walthert, L.; Lüscher, P., 2005: Waldböden der Schweiz. Band 2. Regionen Alpen und Alpensüdseite. Hep Verlag, Bern.

Egli, S.; Brunner, I., 2002: Les mycorhizes. Une fascinante biocénose en forêt. Not. prat. 35. 8 p.

Frey, H.U.; Doutaz, J.; Lüscher, P.; Sciacca, S., 2010: Überblick über typische Waldstandorte der Schweiz – Exkursionsführer. 4. Auflage, Zürich und Birmensdorf.

Greiner, L.; Keller, A.; Grêt-Regamey, A.; Papritz, A., 2017: Soil function assessment: review of methods for quantifying the contributions of soils to ecosystem services. Land Use Policy 69: 224–237.

Guntern, J.; Eichler, A.; Hagedorn, F.; Pellissier, L.; Schwikowski, M.; Seehausen , O.; Stamm, C.; van der Heijden , M.; Waldner, P.; Widmer, I.; Altermatt, F., 2020: Übermässige Stickstoff- und Phosphoreinträge schädigen Biodiversität, Wald und Gewässer. Swiss Academies Factsheet 15: 8 p.

Hagedorn, F.; Krause, H.-M.; Studer, M.; Schellenberger, A.; Gattinger, A., 2018: Sol et environnement. Matière organique du sol, émissions de gaz à effet de serre et atteintes physiques aux sols suisses. Synthèse thématique ST2 du Programme national de recherche «Utilisation durable de la ressource sol» (PNR 68), Berne.

Lüscher, P.; Frutig, F.; Sciacca, S.; Spjevak, S.; Thees, O., 2019: Protection physique des sols en forêt. Protection des sols lors de l'utilisation d'engins forestiers. 3e édition révisée. Not. prat. 45. 12 p.

Lüscher, P.; Frutig, F.; Thees, O., 2016: La protection des sols en forêt contre les atteintes physiques. Office fédéral de l›environnement, Berne. Connaissance de l›environnement: Vol. 1607. 159 p.

Nussbaum, M.; Papritz, A.; Baltensweiler, A.; Walthert, L., 2014: Estimating soil organic carbon stocks of Swiss forest soils by robust external-drift kriging, Geosci. Model Dev. 7:1197–1210.

BLUME, H.-P.; BRÜMMER, G.W.; HORN, R.; KANDELER, E.; KÖGEL-KNABNER, I.; KRETZSCHMAR, R.; STAHR, K.; WILKE, B.-M., 2010: Scheffer/Schachtschabel: Lehrbuch der Bodenkunde. Springer Verlag, Berlin.

OFEV (Éd.) 2017: Sols suisses. État et évolution – 2017. Office fédéral de l'environnement, Berne. État de l'environnement n° 1721: 86 p.

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.

WALSER, M., 2003: Bodenkunde – Kursunterlagen für Standortskunde (Vers. 3.4). Einführung in die Bodenkunde. Bodenverdichtung durch Maschineneinsatz. Boden-Wissenschaften, WSL. Internes Dokument.

WALTHERT, L.; ZIMMERMANN, S.; BLASER, P.; LUSTER, J.; LÜSCHER, P., 2004: Waldböden der Schweiz. Band 1. Gundlagen und Region Jura. Hep Verlag, Bern.

WALTHERT, L.; MEIER, E.S., 2017. Tree species distribution in temperate forests is more influenced by soil than by climate. Ecol. Evol. 7:9473–9484.

ZIMMERMANN, S.; LUSTER, J.; BLASER, P.; WALTHERT, L.; LÜSCHER, P., 2006: Waldböden der Schweiz. Band 3. Regionen Mittelland und Voralpen. Hep Verlag, Bern.

En savoir plus

www.wsl.ch/sols-forestiers

Contact

Marco Walser
Institut fédéral de recherches WSL
Zürcherstrasse 111
8903 Birmensdorf
marco.walser@wsl.ch

Illustrations et photos

Hanspeter Läser (fig. 2), Marco Walser (fig. 1, 3–8), Lorenz Walthert (fig. 9, 10)

Citation

WALSER, M.; KÖCHLI, R.; WALTHERT, L.; ZIMMERMANN, S.; BRUNNER, I., 2021: Comprendre la diversité et les fonctions des sols forestiers en Suisse. Not. prat. 68.12 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° 67: Les ennemis naturels des scolytes. B. WERMELINGER *et al.* 2021. 12 p.
N° 66: L'ailante en Suisse – Écologie et options de gestion. S. KNÜSEL *et al.* 2020. 12 p.
N° 65: Écologie du feu des hêtraies montagnardes. Services écosystémiques et mesures sylvicoles après un incendie de forêt. J. MARINGER *et al.* 2020. 12 p.
N° 64: Connaître, conserver et promouvoir les arbres-habitats. R. BÜTLER *et al.* 2019. 12 p.
N° 63: Les fourmis des bois – biologie et répartition en Suisse. B. WERMELINGER 2019. 12 p.
N° 62: Le pourcentage d'abroutissement – valeur de référence pour la gestion du gibier. O. Odermatt. 2018. 62: 8 p.
N° 61: Cycles et importance de la tordeuse du mélèze. B. Wermelinger *et al.* 2018. 12 p.
N° 60: Le sol forestier vit – diversité et fonctions des organismes vivants du sol. M. Walser *et al.* 2018. 12 p.
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.

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: Philippe Domont, Zurich
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