

Résumé analytique à l'intention des groupes cibles

Numéro de projet

406840_143122

Titre

Stabilité des sols et risques naturels : de la connaissance à l'action

Responsable du projet

Frank Graf, WSL Institut pour l'étude de la neige et des avalanches SLF

Autres responsables
du projet

Peter Bebi, WSL Institut pour l'étude de la neige et des avalanches SLF
Martin Frei, Amt für Wald und Naturgefahren, Canton des grisons ; MFrei Infra Sàrl
Christian Rickli, Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage WSL
Christian Rixen, WSL Institut pour l'étude de la neige et des avalanches SLF
Sarah Springman, ETH Zurich

Contribution à la synthèse thématique :

<input type="checkbox"/> Sol et production alimentaire	<input checked="" type="checkbox"/> Sol et environnement	<input type="checkbox"/> Ressource sol et développement territorial	<input checked="" type="checkbox"/> Informations du sol, méthodes et instruments	<input type="checkbox"/> Vers une politique durable des sols
--------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------

Lieu et date : Davos, le 29 janvier 2017

Contexte

L'érosion et les glissements de terrain superficiels représentent un danger permanent pour l'être humain, les bâtiments et les voies de communications. Au cours de ces dernières années, ce genre d'événements naturels a provoqué à plusieurs reprises des dégâts considérables - se chiffrant jusqu'à plus de 100 millions de francs pour une seule intempérie - et ont également coûté des vies humaines. Les tempêtes violentes devraient devenir plus courantes et plus intenses encore du fait du changement climatique, aggravant ainsi le risque posé par ces dangers naturels. S'en protéger et améliorer l'efficacité des prévisions sont donc des enjeux essentiels. A cet égard, la prévention des glissements superficiels est d'une importance particulière.

L'efficacité de la végétation, et notamment de la forêt, en tant que protection contre les glissements de terrain n'est plus à démontrer depuis longtemps. En Suisse, les mesures de revégétalisation et de stabilisation des zones concernées sont fixées dans la loi de 1991 sur les forêts. Les méthodes de génie biologique visant à stabiliser les pentes ainsi que la plantation et la reforestation sont dès lors favorisées par rapport aux solutions purement techniques. Il reste toutefois nécessaire d'étudier davantage les effets et l'efficacité de la végétation, étant donné le besoin croissant de sécurité et l'aspect financier de cette question.

La difficulté de prouver les effets stabilisateurs des plantes sur les versants réside d'abord dans la dynamique du développement de la végétation. Les conditions sine qua non pour que les plantes aient un effet durable sur la stabilité des pentes sont indiscutables : croissance, développement et diversité. Mais si ces conditions paraissent évidentes, leur réalisation ne va pas de soi. Les conditions sur les pentes sujettes aux glissements et à l'érosion sont rudes. Pour les plantes, c'est un défi considérable de prendre racine assez rapidement et de se maintenir. Par ailleurs, elles disposent de très peu de temps pour coloniser un versant et pour gagner la course contre les processus d'érosion et de glissement. Grâce aux champignons mycorhiziens, de nombreuses plantes se développent mieux et plus rapidement, avec un taux de survie supérieur. On peut donc s'attendre à quelque chose de semblable dans les conditions extrêmes qui règnent sur les versants dépourvus de végétation.

But

Le but du projet « Stabilité du sol » était de **quantifier de façon plus fiable l'influence des plantes sur la stabilité des versants**. Pour ce faire, des facteurs stabilisateurs biologiques ont été reliés à des paramètres mécaniques, qui sont déterminants pour le calcul du facteur de sécurité contre les dommages causés au sol par des glissements superficiels. L'accent a été mis sur une **mise en pratique réalisable**, tenant compte d'éléments de mécanique des sols, de végétation, de sylviculture et d'utilisation des sols. Une attention particulière a été accordée à **l'étude de l'influence des champignons mycorhiziens (symbiotes) sur leurs plantes partenaires**.

L'étude s'est appuyée sur une base de données documentant dans le détail plus de 700 glissements. Par ailleurs, des expériences sur le terrain et en laboratoire ont été menées afin de déterminer l'influence de la structure forestière sur la stabilité des versants, de même que les forces de cisaillement et la stabilité des agrégats du sol. Un appareil de mesure de cisaillement développé à cet effet, inclinable et pouvant traiter des échantillons de grande taille, a permis d'effectuer des **essais dans des conditions proches de la réalité**. L'équipe s'est efforcée **d'intégrer de manière adéquate les facteurs stabilisateurs biologiques dans un concept de mécanique des sols** qui satisfasse aux dernières évolutions des connaissances. **Savoir dans quelle mesure la stabilité des pentes est influencée par les caractéristiques des sols, par la végétation et par l'utilisation des sols** devrait permettre d'élaborer des indicateurs à même d'anticiper un risque accru de

glissement de terrain. On pourra alors poser des **critères définissant la végétation à haut potentiel de protection contre les glissements de terrain superficiels**. Les résultats seront intégrés à la planification des mesures de génie biologique et des actions d'entretien, permettant ainsi de faire des prévisions ou d'en améliorer la qualité.

Résultats

Plantes et champignons mycorhiziens

Les champignons mycorhiziens apportent des avantages à leur plante hôte, en particulier dans des conditions extrêmes. Ce phénomène a été confirmé une nouvelle fois par un projet partenaire, dans le bassin versant raide d'un torrent de la zone subalpine. Il a été montré dans ce contexte que, lors de glissements sur les versants du torrent atteignant 50° d'inclinaison, le taux de survie des plantes mycorhizées était nettement supérieur à celui des plantes de contrôle non inoculées. L'effet des mycorhizes était déjà clairement identifiable et significatif après un cycle de végétation.

Le taux de survie des plantes est étroitement lié à leur croissance. Dans l'étude du torrent, les plantes mycorhizées – aulnes et saules – ont produit nettement plus de biomasse aérienne. La différence avec les plantes de contrôle non mycorhizées était claire depuis le début, et particulièrement marquée chez les aulnes. Cet effet renforcé des mycorhizes chez les aulnes, en comparaison avec les saules, s'explique en partie par l'éventail des espèces de l'inoculum de champignon utilisé.

Leur influence bénéfique sur la croissance des plantes en surface est l'un des effets les plus évidents des mycorhizes, et a aussi été démontrée lors des expériences de laboratoire avec l'aulne blanc (*Alnus incana*) et le bouleau verruqueux (*Betula pendula*). On a toutefois constaté des différences notables en rapport avec les deux types d'inoculum utilisés. Un inoculum commercial composé de différentes espèces issus de deux groupes de mycorhizes (ectomycorhizes et endomycorhizes arbusculaires) a eu pour effet, tant pour l'aulne que pour le bouleau, d'augmenter nettement la biomasse aérienne. En revanche, l'addition d'une seule espèce d'ectomycorhize, spécifique pour chaque plante hôte (aulne et bouleau), n'a entraîné qu'une hausse insignifiante par rapport au contrôle non inoculé, et de plus uniquement chez l'aulne.

Les champignons mycorhiziens sont capables non seulement de stimuler la biomasse aérienne de leurs plantes hôtes, mais ils peuvent également influencer considérablement la croissance de leurs racines. Les expériences avec l'aulne et le bouleau ont confirmé que l'effet positif des champignons mycorhiziens sur la croissance des racines pouvait différer selon l'espèce de plante hôte. Là aussi, l'inoculation du produit commercial chez le bouleau a entraîné une croissance notablement plus élevée qu'avec le champignon spécifique au bouleau. Quant à l'aulne, comparé aux plantes de contrôle non inoculées, l'augmentation de la croissance des racines n'a pas du tout été aussi nette, et n'a été significative avec aucun des deux types d'inoculum. Ces résultats contredisent ceux d'une de nos expériences précédentes, lors de laquelle nous avons utilisé le même champignon ectomycorhize, et qui avait montré que les racines des aulnes inoculés croissaient nettement mieux que celles des plantes de contrôle non inoculées.

Stabilité des agrégats et mécanique des sols

La stabilité des agrégats du sol est une condition essentielle à sa capacité de stockage de l'eau et des nutriments, et donc à une croissance durable des plantes et des associations végétales. Une bonne structure des agrégats stimule également l'enracinement – surtout en profondeur – et contribue ainsi, du moins indirectement, à la stabilité des versants. Inversement, un bon enracinement favorise la stabilité des agrégats. Les champignons mycorhiziens jouent ici aussi un rôle

essentiel. Les corrélations positives entre stabilité des agrégats et enracinement ainsi que mycorhization se vérifient donc de plusieurs manières.

Ce phénomène s'est manifesté de façon particulièrement flagrante lors des expériences effectuées avec les aulnes et les bouleaux. Pour les deux espèces, la plus grande stabilité des agrégats a chaque fois été atteinte par la manipulation qui permettait également les plus hauts taux d'enracinement (longueur des racines par volume de sol). Dans le cas de l'aulne, il s'agissait de l'inoculation du champignon mycorhizien spécifique à l'espèce, et pour le bouleau de l'inoculation du produit commercial. Le champignon mycorhizien a aussi induit une augmentation significative de la stabilité des agrégats dans le cas du bouleau.

La stabilité de la matrice et de la structure poreuse du sol a une influence décisive sur ses caractéristiques hydrologiques. Ces caractéristiques, à leur tour, jouent un rôle essentiel pour la stabilité des versants. Le déclenchement de glissements superficiels est étroitement lié au processus de saturation en eau et, partant, de la pression interstitielle accrue dans le massif de sol. On a ainsi constaté qu'un enracinement plus conséquent pouvait repousser le moment de l'effondrement du massif de sol. Cette résistance à la pression interstitielle croissante présente une corrélation positive avec la stabilité des agrégats. Des expériences effectuées avec l'aulne blanc, avec le pâturin des prés (*Poa pratensis*) et avec une combinaison des deux l'ont clairement démontré. Comparés aux contrôles sans végétation, les échantillons comprenant uniquement des aulnes blancs n'ont montré qu'une amélioration minimale. Dans les échantillons avec le pâturin des prés, en revanche, le délai jusqu'à l'effondrement de la structure du sol a été clairement plus long. Les échantillons de pâturin des prés « pur » ont résisté deux fois plus longtemps à la pression interstitielle croissante que ceux de la formule combinée avec l'aune. S'agissant de la stabilité des agrégats, en revanche, aucune différence n'a été constatée entre ces deux variantes. C'est la raison pour laquelle on peut supposer que l'enracinement plus dense constaté dans les échantillons de pur pâturin des prés, de même que les différences de structure et d'architecture racinaire entre le pâturin et l'aulne, ont été des éléments déterminants de la résistance accrue à la pression interstitielle croissante. Le système racinaire du pâturin des prés n'est pas ligneux, très enchevêtré et caractérisé par une grande proportion de racines fines (0.5–1 mm). L'aulne blanc, en revanche, présente une majorité de racines ligneuses, avec une plus grande proportion de racines moyennes à épaisses. Son architecture racinaire fait partie de la catégorie de type « parabole » (pivotant), alors que celle du pâturin des prés est de type « triangle » (fasciculé) qui, comparativement, exerce nettement moins de pression interstitielle. Par conséquent, la saturation en eau met plus de temps à atteindre une surpression critique. On a pu démontrer, par ailleurs, que les taux d'évapotranspiration dans les échantillons de pâturin des prés « purs » sont nettement plus élevés que dans les autres, de sorte que dès le début, un réservoir plus grand est à disposition pour le stockage de l'eau.

Nous avons déjà pu démontrer les effets positifs de la végétation sur la stabilité des sols et des versants, grâce à des essais triaxiaux de cisaillement sur du matériel morainique sans cohésion provenant d'une région sujette aux glissements. Avec un échantillon planté d'aulnes blancs, on a obtenu en comparaison avec des contrôles non plantés une augmentation moyenne de l'angle de cisaillement Φ' de 5°. Un versant végétalisé serait donc, même avec une inclinaison plus raide de 5°, toujours plus stable que ce que la matière du sol en lui-même permet d'un point de vue géotechnique.

Cette augmentation « biologique » de la stabilité mécanique des sols a pu être confirmée dans différentes régions étudiées. Des versants d'un escarpement similaire, dotés d'une couverture végétale bien développée, ont supporté sans dommages des intempéries violentes comme la tempête de

2005. La bonne pénétration du massif de sol par les racines a sans nul doute contribué à l'effet stabilisateur des plantes.

Grâce au nouvel appareil de mesure de cisaillement inclinable développé à cet effet, il nous a été possible, pour la première fois, d'associer les avantages des méthodes traditionnelles de terrain et de laboratoire de manière optimale : des essais bien contrôlables et renouvelables autant que nécessaire, de même que des échantillons de grande taille (50x50x40 cm), qui reflètent fidèlement les conditions du terrain. Les essais ont notamment montré qu'il n'est pas suffisant de prendre uniquement en compte l'angle de friction (Φ') et la cohésion (c'), comme on le faisait jusqu'à présent. Pour pouvoir quantifier de façon adéquate le renforcement de la stabilité du sol par la présence des racines, la dilatance (Ψ) s'est révélée un autre facteur essentiel. La capacité d'une matière du sol à augmenter de volume en s'ameublissant sous l'effet des forces de cisaillement influence considérablement le comportement de cisaillement d'un sol fortifié par les racines.

Cette nouvelle approche permet de confirmer l'effet positif de la végétalisation sur la stabilité des sols, et donc des versants, dans les nombreux essais effectués. Plus la matière du sol est densément colonisée par les racines, plus le sol est stable. Au cours des essais de cisaillement directs, le sol d'une zone de glissement végétalisée et inoculée avec des champignons mycorhiziens présentait après 6 mois une stabilité fortement accrue, en moyenne env. 6,5 kPa. Les expériences sur le terrain, ainsi que d'autres travaux de quantification du renforcement racinaire en forêt protectrice, ont montré que des valeurs de 5-10 kPa sont réalistes pour des forêts bien structurées.

En prenant en compte ces effets de renforcement par les racines (cohésion), des calculs ont été effectués pour la sécurité contre le glissement (méthode d'équilibrage d'un talus de longueur infinie avec percolation parallèle à la pente). De même que pour les essais triaxiaux, on a constaté que l'angle d'inclinaison pouvait être augmenté de 5° par rapport à l'angle de cisaillement, et que le versant restait stable – avec 6,5 kPa jusqu'à une profondeur de 1,2 m. Cette profondeur de 1,2 m correspond à peu près à la valeur moyenne dans plus de 200 glissements de terrain forestiers, référencés après les tempêtes de 1997 (Sachseln), 2002 (Napf, Appenzell) et de 2005 (Entlebuch, Napf, Prättigau) et enregistrés dans la base de données établie par le WSL pour les glissements superficiels et les coulées de boue.

Structure forestière et utilisation du sol

Toutes les forêts ne se défendent pas dans la même mesure contre les glissements superficiels. Le renforcement par les racines et les effets hydrologiques sont d'autant supérieurs que la zone racinaire et la couronne des arbres sont abondamment pourvues, et complètes et variées. La diversité est absolument fondamentale pour la stabilité des sols, et particulièrement pertinente si l'on considère la forêt comme un écosystème dynamique, c'est-à-dire un habitat naturel en évolution constante et toujours susceptible d'être modifié par des perturbations naturelles ou anthropiques. A un moment donné, les forêts présentant un taux élevé de tiges et une grande diversité d'espèces, de structures verticales et de types de racines ont un effet particulièrement stabilisateur. Dans les forêts de protection situées à une altitude plus élevée, les arbres ne doivent toutefois pas être trop serrés sur de grandes surfaces, pour permettre aux jeunes arbres de recevoir assez de lumière. Quelle est alors la taille idéale des espaces non boisés, qui puisse permettre le renouvellement de la forêt tout en empêchant les glissements superficiels ? Nous avons étudié la question à St. Antönien, sur les lieux d'anciens glissements en forêt, et récolté toutes sortes d'informations sur la structure forestière et d'autres facteurs déterminants. Il s'est avéré que les glissements se sont surtout produits dans les espaces non boisés d'une longueur de plus de 20 mètres dans la ligne de pente. Dans les cas où les espaces étaient plus longs, c'est avant tout l'inclinaison du terrain qui est la cause des glissements, alors que la largeur des clairières ne joue qu'un rôle secondaire.

Ce résultat est plausible dans la mesure où la diminution du renforcement par les racines est plus marquée quand on s'éloigne des arbres dans le sens de la pente que parallèlement à elle, et que l'écoulement de l'eau dans le sol se fait principalement dans le sens de la pente. L'analyse de profils de sol à différentes distances des arbres, dans un même peuplement, a confirmé que la résistance aux glissements s'explique au moins en partie par le degré de renforcement offert par les racines. Les valeurs calculées de renforcement racinaire ont diminué à mesure qu'on s'éloignait des arbres, et étaient plus basses dans les zones de glissement que dans les zones de contrôle sans glissement. Les résultats de l'étude du cas de St. Antönien fournissent des indications importantes sur l'impact de la forêt. On ne peut toutefois pas les généraliser à l'envi. Des études semblables menées dans la zone des glissements de 1997 à Sachseln montrent que dans ce cas, ce sont des modifications de la structure forestière causées par des perturbations antérieures qui ont eu une influence déterminante sur la stabilité du sol. Les glissements de Sachseln se sont produits surtout dans des peuplements déjà abîmés précédemment lors de tempêtes (1970 et 1990) et/ou par des attaques de bostryches. Après des perturbations de ce type, sachant que les systèmes racinaires sont détruits, il faut clairement s'attendre à un risque accru de glissement pendant un certain temps – c'est-à-dire jusqu'à ce que la génération d'arbres suivante puisse assumer son rôle protecteur. Il est par conséquent extrêmement important d'encourager sans relâche le rajeunissement, déjà sous le couvert des vieux arbres, c'est-à-dire, à l'étage subalpin, d'éclaircir le peuplement de manière ciblée.

Les interventions sylvicoles peuvent considérablement influencer la diversité et la structure d'une forêt, et par conséquent sa vulnérabilité aux glissements superficiels. Dans ce contexte, l'encouragement de la diversité ne doit pas concerner que les peuplements de grande surface, uniformes et donc moins résistants aux perturbations. Par ailleurs, ce genre d'interventions ne doit pas laisser, dans les forêts de protection à risque de glissements, d'espaces vides plus longs que 20-30 mètres dans la ligne de pente. C'est ce que préconisent les directives actuelles de NaiS pour les glissements de terrain, les avalanches et les chutes de pierres (NaiS: Nachhaltigkeit im Schutzwald - Gestion durable des forêts de protection, OFEV).

Dans les forêts denses, la diversité structurale peut éventuellement être améliorée par le pâturage extensif. En revanche, pâturage intensif et fumure ont des effets délétères sur la stabilité du sol, puisque le piétinement entrave la croissance des racines et les possibilités d'infiltration, et que l'apport supplémentaire de nutriments perturbe la diversité des espèces végétales et de champignons mycorhiziens.

Filtre tripartite

Une analyse rétrospective de 218 glissements de terrain superficiels survenus en zones de forêt pendant les tempêtes de 1997 (Sachseln), de 2002 (Napf, Appenzell) et de 2005 (Entlebuch, Napf, Prättigau) a montré que plus de 95% d'entre eux étaient explicables par une sélection de critères issus de nos recherches.

Appliqué en série, le « filtre tripartite » tient compte des aspects de mécanique des sols (paramètre de cisaillement, déclivité), de végétation (critères de protection optimale contre les glissements superficiels selon NaiS, complété par nos découvertes) et de topographie. Le critère de la mécanique des sols permet d'expliquer près de 50% des glissements, celui de la végétation 40% et celui de la topographie 7%.

Dans les forêts bien structurées, les pentes jusqu'à 5° plus raide parviennent à rester stables. Les forêts de ce type bénéficient d'une densité maximale d'espèces et de structures racinaires, sont couvertes à plus de 60% (couverture arborée \geq 40%) et sont bien équilibrées sur le plan de la hauteur des arbres et de la structure des âges. Dans près de 40% des glissements étudiés, ces

critères de végétation n'étaient pas remplis. Dans environ 50% des cas, la déclivité dépassait de plus de 5° l'angle de cisaillement Φ' correspondant. Par ailleurs, l'analyse a montré que d'autres recherches étaient nécessaires pour les jeunes peuplements.

Pour pouvoir passer du stade de l'analyse rétrospective à celui de la prévision avec les critères utilisés, différentes lacunes dans nos connaissances doivent encore être comblées. Il s'agit principalement des paramètres de cisaillement (angle de cisaillement Φ' et cohésion c'), dont la détermination demande un gros investissement. Une caractérisation géotechnique à grande échelle des régions à risque n'est donc pas réaliste pour des raisons de ressources. C'est la raison pour laquelle les méthodes conventionnelles attribuent souvent aux formations géologiques des valeurs fixes, ce qui peut cependant donner des résultats truffés d'erreurs et insatisfaisants. Dans le cas des couches du Drusberg à Sachseln, l'angle de cisaillement attribué est de $\Phi' = 36^\circ$. L'évaluation géotechnique de la matière du sol dans les zones de rupture a toutefois donné, pour 95% des 67 glissements de 1997 dans les couches du Drusberg, des valeurs Φ' de 27° à 33° .

De même, les informations concernant la végétation sont rarement suffisantes pour une quantification valable des effets biologiques. Nous pouvons heureusement y remédier, puisque nous disposons des instruments (NaiS, OFEV) et des protocoles (WSL) nécessaires. Le savoir-faire et l'expérience des personnes responsables sont également accessibles, le plus souvent.

Quant à la topographie, il semble qu'on puisse difficilement l'influencer dans les limites d'un investissement raisonnable. Les forêts bien structurées sont en mesure d'accroître sensiblement la stabilité des versants. Il faut donc, pour éviter les glissements de terrain superficiels, s'attaquer à la stabilisation des versants en passant par la question de l'utilisation des sols et surtout par l'entretien constant des forêts. Dans quelle mesure et avec quel degré d'investissement tout cela est possible - ces questions ont été analysées par nos soins dans le cadre d'une étude des intempéries de 1997 à Sachseln.

Etude de cas Sachseln

Dans l'étude de cas Sachseln, nous avons analysé un total de 107 glissements de terrain en forêt survenus en 1997. Seuls 7 des glissements étudiés se sont déclenchés alors que tous les critères du filtre tripartite décrit ci-dessus, sans exception, étaient remplis. Ils se sont tous produits sur des pentes de 40° ou plus, avec une différence entre déclivité et angle de cisaillement variant entre 7° et 17° . Le critère de 5° fixé dans le filtre tripartite est donc, dans certains cas, clairement dépassé. Sur la base de l'hypothèse d'une distribution normale pour la déclivité et l'angle de cisaillement de ces glissements, et d'un seuil de probabilité de déclenchement de 1%, on obtient une valeur limite pour la déclivité d'environ 38° . On peut ainsi supposer que les versants dont les forêts remplissent tous les critères devraient, jusqu'à une pente de 38° , supporter une tempête comme celle qui a frappé Sachseln en 1997, indépendamment de la matière du sol concernée et donc de l'angle de cisaillement. Dans le cas précis de Sachseln, les premiers résultats laissent penser que des forêts de ce type auraient empêché 80% des glissements, et qu'à peine 80 des 400 ha de la surface forestière étudiée auraient été atteints.

Qu'en est-il alors du principe de proportionnalité entre investissement et bénéfices, dans le cas de Sachseln ? Cet exemple suppose un investissement de longue haleine, consistant à assurer un entretien optimal des forêts en pente et des versants des cours d'eau pour lutter contre les glissements de terrain superficiels. Une estimation des coûts (prix 2016) pour amener les forêts à un état optimal, ou pour maintenir cet état selon le cas, donne pour Sachseln environ 35 000 francs par hectare pour une génération d'arbres (120 ans) ou 300 francs par hectare et par année. En prenant un cadre temporel de 100 ans, les dépenses pour les 400 hectares concernés se monteraient à environ 12 millions de francs, somme qu'il faut comparer aux 120 millions de francs qu'a

coûté la gestion des dégâts causés par la tempête exceptionnelle de 1997. Ces dommages ne sont toutefois pas tous imputables aux glissements superficiels, ou ne peuvent pas toujours leur être directement et clairement imputés. Néanmoins, investir dans la gestion des forêts vaut clairement la peine, si l'on veut fournir la meilleure protection possible contre les glissements superficiels sur le long terme. Même si l'on applique la base généralisée de 800 francs maximum par hectare et par année du «Manuel RPT dans le domaine de l'environnement» de l'OFEV, on obtient un bilan positif (25% au maximum de la totalité des dépenses). Dans le cas qui nous occupe, les dépenses pour la gestion des forêts de protection inférieures à ce plancher s'expliquent principalement par les conditions relativement simples du terrain et la desserte plutôt favorable à Sachseln. Il faudra d'autres études pour savoir dans quelle mesure les chiffres obtenus dans le cas de Sachseln sont extrapolables à d'autres régions.

Implication pour la recherche

Nos recherches ont permis d'acquérir de nouvelles connaissances concernant les effets de la végétation sur la stabilité des versants – qu'il s'agisse de mécanique des sols, des prestations fournies par les plantes et de l'influence des champignons mycorhiziens, mais aussi de gestion des forêts et d'utilisation des sols.

Afin de pouvoir s'appuyer sur une base solide et faire avancer la pratique de façon cohérente, il est indispensable d'approfondir ces connaissances dans différents domaines :

- Mécanique des sols d'autres types de sols, en tenant compte de la dilatance
- Architectures racinaires, en considérant la dynamique de la pression interstitielle et l'évapotranspiration
- Spécificité des relations plantes-champignons (mycorhiziens) en ce qui concerne la croissance racinaire, la stabilité des agrégats, et la protection contre les parasites et les polluants
- Influence du changement climatique sur la diversité et la succession des associations végétales et de la rhizosphère – températures plus élevées, sécheresse en hausse, intempéries plus violentes

Pour cela, il faut considérer les effets des diverses utilisations du sol et mesures de gestion en tenant compte de la structure de la végétation, des racines et du sol. Les futures études doivent davantage intégrer la télédétection (satellites, drones, balayage laser) pour les structures aériennes et les méthodes de biologie moléculaire (ADN, ARN, métagénomique, séquençage haut débit) pour la rhizosphère.

Implication pour la pratique

Si l'on veut favoriser durablement la fonction protectrice des forêts, particulièrement contre les glissements superficiels, l'entretien doit non seulement se faire selon les directives fixées dans NaiS, mais doivent aussi intégrer les connaissances acquises dans le cadre de ce projet. La diversité et les paramètres structurels sont fondamentaux pour diminuer la vulnérabilité aux glissements :

- Les espaces non boisés ne doivent pas dépasser, dans la ligne de pente, une longueur de 20 (- 30) mètres. Leur largeur est de moindre importance. Pour les espaces plus longs, c'est avant tout la déclivité - et non la surface de l'espace - qui est cruciale pour la stabilité.

- Un large spectre d'espèces, de stades de succession, d'âges des plantes, de strates, de profondeurs d'enracinement et d'architectures racinaires apporte aux versants une stabilité plus élevée et plus durable.
- Les forêts diversifiées, avec rajeunissement constant, sont menacées par les dangers naturels à plus petite échelle (p. ex. vents tempétueux ou attaque d'insectes). Leur fonction protectrice est par conséquent moins altérée, et elles retrouvent plus rapidement la totalité de leur potentiel.
- L'intégration de champignons mycorhiziens dans les concepts de (re-)boisement et de plantation (p. ex. après des dégâts naturels, des coupes de régénération ou l'implantation de nouveaux peuplements) encourage le développement et les fonctions stabilisatrices des plantes.

Dans les régions vulnérables aux glissements, l'exploitation agricole et alpestre doit suivre une politique de fumure et de pâturage mesurée, afin d'éviter un ajout excessif de nutriments et le compactage du sol.

La renaturation des versants après un glissement par des méthodes de génie biologique doit tenir compte pour le choix des plantes non seulement de la diversité des espèces, mais aussi des différentes architectures racinaires ainsi que des champignons mycorhiziens. Par ailleurs, au moment de prendre des mesures en conséquence (p. ex. transposition directe), il convient de veiller à ce que la morphologie du terrain soit la plus hétérogène possible, avec un microrelief varié y compris dans la zone proche de la surface.

Recommandation

Les forêts de protection vulnérables aux glissements superficiels doivent remplir les exigences suivantes : **Directives selon NaiS, et connaissances acquises dans le cadre de nos recherches sur la structure forestière et la mécanique des sols (filtre tripartite)**. Ces forêts protectrices présentent la **diversité nécessaire, tant souterraine qu'à l'air libre** (espèces, âges, structures horizontale et verticale, mélange des essences, enracinement, architecture racinaire). Autant que possible, il faut encourager la cohabitation de différentes étapes de succession et de développement, **réparties de façon équilibrée à petite échelle**. Cette « **diversité tridimensionnelle** » – **aérienne, souterraine et en matière de succession** (diversité temporelle) – permet d'augmenter la capacité d'adaptation et la résistance de l'ensemble du peuplement, mais également d'améliorer considérablement son autorégulation. Outre les plantes, il faut prendre en compte leurs organismes partenaires, notamment les champignons mycorhiziens (ill. 1). Une myco-rhizosphère diversifiée stimule la succession des associations végétales, et est un accélérateur important du développement durable d'une couverture végétale protectrice. C'est la raison pour laquelle il ne faut pas négliger la **diversité des espèces et des structures souterraines** (architecture racinaire).

Interventions sylvicoles

Des interventions sylvicoles appropriées peuvent accroître la diversité structurale, et donc la stabilité du sol, et par là même limiter sa vulnérabilité face aux dangers majeurs (vents tempétueux, bostryches, incendies, avalanches,...). Sur les versants raides, où la forêt a tendance à être plutôt uniforme, les coupes de régénération sont particulièrement importantes pour garantir la diversité des stades de développement des plantes et des peuplements. Comme le préconise NaiS, les soins à la forêt doivent être apportés, dans la mesure du possible, selon les processus naturels de succession forestière. A cet effet, les conditions spécifiques du milieu et l'historique du peuplement

doivent être pris en considération. Dans certaines régions, le maintien actif d'un stade de succession particulier peut toutefois être judicieux pour la stabilité des sols - par exemple, dans une zone détrempée, un stade de développement impliquant le plus haut taux possible d'évapotranspiration.

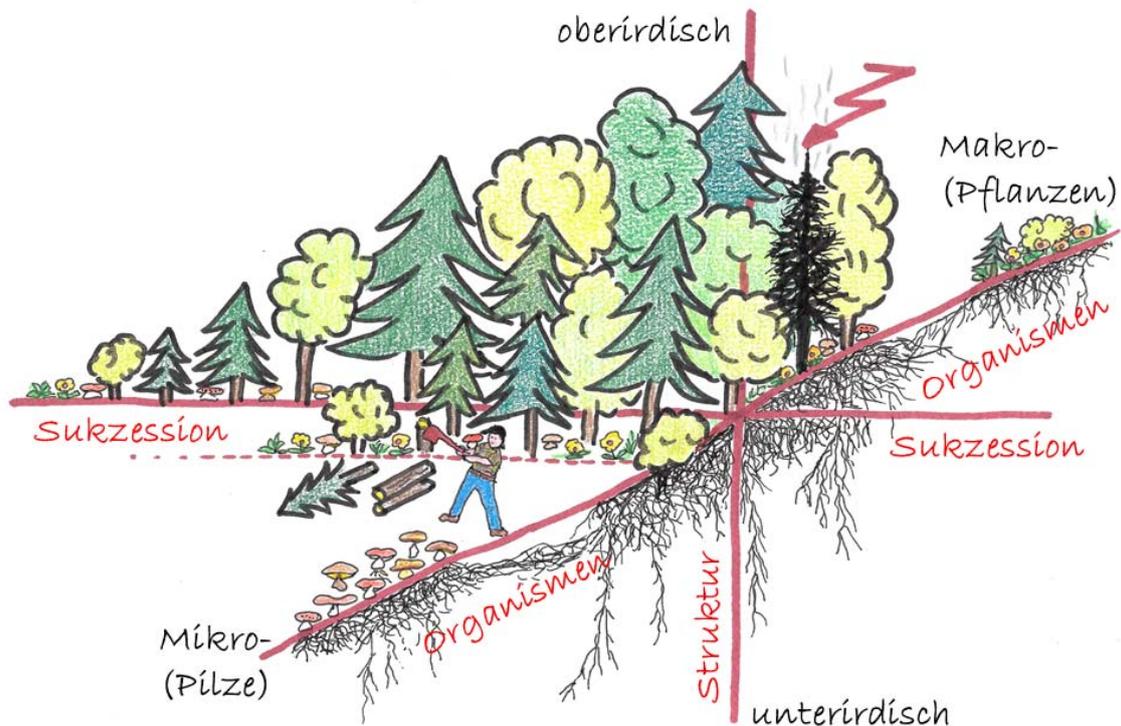


Illustration 1: Diversité présentée en 3D, y compris les micro- et macro-organismes (plantes et champignons mycorhiziens), les structures souterraine et aérienne, ainsi que la succession et sa régulation par les interventions anthropiques (entretien) et les dangers naturels comme les vents tempétueux, les bostryches, les incendies, les avalanches, etc. (dessin : V. Graf-Morgen, 2016).

Utilisation du sol

Au-dessus et au sein des régions vulnérables aux glissements, il faut renoncer à une exploitation agricole et alpestre intensive, puisqu'un apport supplémentaire de nutriments et le compactage du sol mettent en péril la stabilité des versants à risque. L'excès de nutriments limite la croissance racinaire et la diversité des champignons mycorhiziens, et évincent les espèces localement adaptées. Le compactage du sol entrave le développement des racines, et donc le renforcement du sol par les racines, mais également le développement des champignons mycorhiziens.

Génie biologique

Lorsque l'on re-planté et re-stabilise les versants après un glissement de terrain par des méthodes de génie biologique, il faut considérer les combinaisons plantes-champignons de l'état d'origine. Pour obtenir les associations végétales souhaitées, il faut veiller à ce que les processus de succession soient les plus naturels possible. Il faut aussi intégrer les points de vue relevant de la technique et de la construction. Préalablement aux mesures de protection biologiques, le pied du versant doit être stabilisé (p. ex. par la consolidation des berges) et les parties extrêmement raides nivelées. Par ailleurs, les transitions brusques (rectilignes) entre et au sein des types de végétation (p. ex. espaces non boisés) et le long de ruptures de terrain (arêtes) doivent être évités. Il faut plutôt favoriser les structures en mosaïque, qui se chevauchent et ont une limite irrégulière, aussi bien

à l'horizontale qu'à la verticale (espace racinaire). Il s'agit de veiller à ce que la morphologie du terrain soit la plus hétérogène possible, avec un microrelief varié y compris dans la zone proche de la surface.

Aspects conceptionnels

Le concept proposé, c'est-à-dire le filtre tripartite, la diversité en 3^D et NaiS, doit continuer à être développé et amélioré. Un premier pas dans cette direction sera d'utiliser les calculs de probabilité non plus seulement pour expliquer les glissements, mais de les étendre à la prévision des événements, aspect qui ne fait pas partie de notre concept. Il faudra pour cela tenir compte des caractéristiques du terrain, et surtout de la végétation, dans la future documentation des glissements de terrain superficiels.

Les recherches dans d'autres régions devront montrer quel est le potentiel effectif de protection des forêts adéquatement entretenues. Si les résultats que nous avons obtenus dans l'étude de cas « Sachseln 1997 » et les conclusions que nous en avons tirées se confirment, des investissements de 300 à 800 francs par hectare et par année pour l'entretien des forêts de protection se justifient pleinement à long terme.