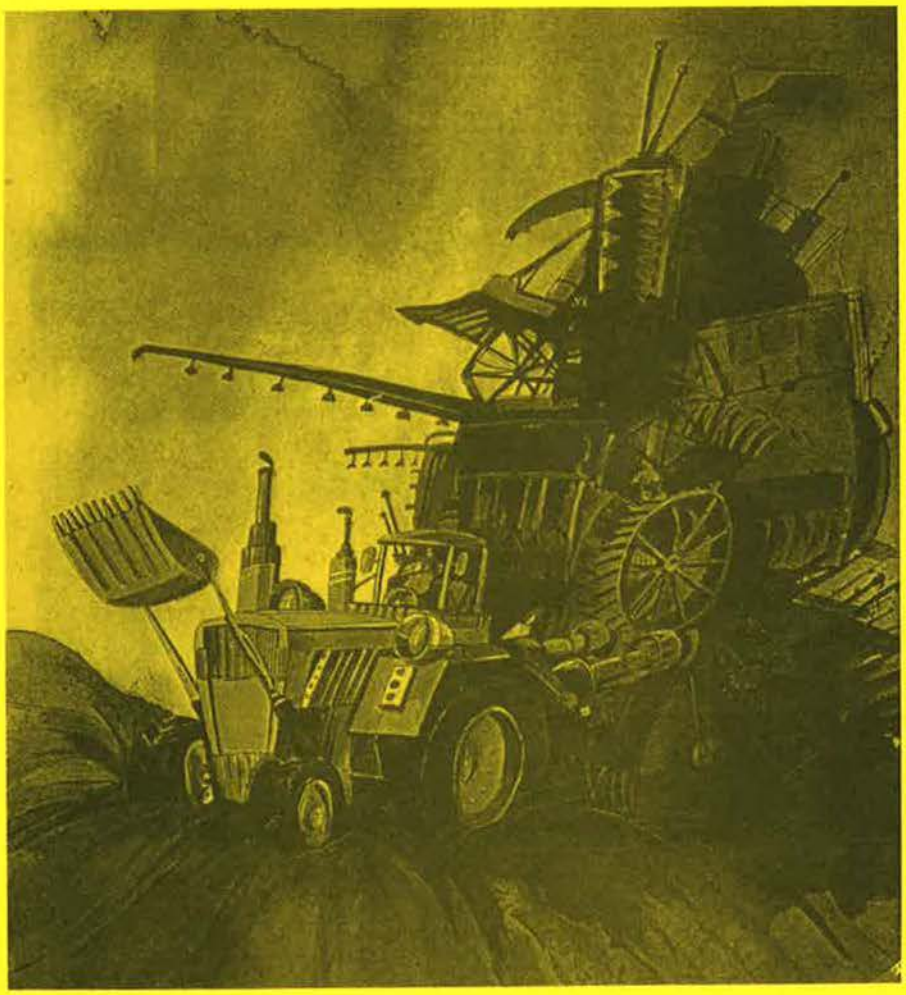
BODENKUNDLICHE GESELLSCHAFT DER SCHWEIZ
SOCIETE SUISSE DE PEDOLOGIE

BGS
SSP

PROTECTION DES SOLS CONTRE LES ATTEINTES PHYSIQUES

stratégie pour la mise en œuvre des nouvelles prescriptions formulées dans la Loi sur la protection de l'environnement (LPE) et l'Ordonnance sur les atteintes portées aux sols (OSol)



BGS DOKUMENT / DOCUMENT SSP 9

BODENKUNDLICHE GESELLSCHAFT DER SCHWEIZ

SOCIETE SUISSE DE PEDOLOGIE

Adresse: Geographisches Institut der Universität Zürich (GIUZ)
Winterthurerstrasse 190, CH-8057 Zürich

Telefon 01 635 51 21 oder 22 **Fax** 01 635 68 48

E-Mail fitze@geo.unizh.ch

Postcheck-Konto: BGS Bern 30-22131-0 Bern

Vorstand / Comité 1999

Präsident / Président:	F. Borer, Solothurn	032 627 24 91	E-Mail franz.borer@vd.so.ch
Vizepräsident / Vice-président:	R. Schulin, Schlieren	01 633 60 71	E-Mail schulin@ito.umnw.ethz.ch
Beisitzer / Assesseur:	J.-M. Gobat, Neuchâtel	032 718 23 37	Jean-Michel.Gobat@bota.unine.ch
Sekretär / Secrétaire:	P. Fitze, Zürich	01 635 51 22	E-Mail fitze@geo.unizh.ch
Rechnungsführer / Comptable:	M. Jozic, Ebikon	041 450 26 57	E-Mail mj@agrolab.ch

Redaktion / Rédaction

M. Müller
Schweizerische Hochschule für Landwirtschaft, 3052 Zollikofen
Telefon 031 910 21 24/11 Fax 031 910 22 96/99 E-Mail Moritz.Mueller@shl.bfh.ch

Dokumentationsstelle / Service des documents

Landwirtschaftliche Lehrmittelzentrale LMZ, Länggasse 79, 3052 Zollikofen
Telefon 031 911 06 68 Fax 031 911 49 25
E-Mail lmz@pop.agri.ch Internet http://combi.agri.ch/lmz

Vorsitzende der Arbeitsgruppen / Présidents des groupes de travail

Klassifikation und Nomenklatur:	J. Presler, Zürich	01 385 29 58	E-Mail babu_zh@datacomm.ch
Lysimeter:	J. Brändli, Zürich	01 256 91 11	E-Mail jbr@sma.ch
Bodenschutz und Werthaltung:	U. Vökt, Zollikofen	031 910 53 31	E-Mail uvoekt@swissonline.ch
Bodenerosion/Bodenkonservierung:	D. Schaub, Frick	062 865 72 52	E-Mail daniel.schaub@fibl.ch
Bodenkartierung:	M. Knecht, Zürich	01 383 70 71	E-Mail ambio@bluewin.ch
Reflexion/Strategie	P. Germann, Bern	031 631 38 54	E-Mail germann@giub.unibe.ch

Koordination Ausstellung und Broschüre BODEN/SOL

U. Zihlmann, Zürich-Reckenholz 01 377 74 08 E-Mail Urs.Zihlmann@fal.admin.ch

BODENKUNDLICHE GESELLSCHAFT DER SCHWEIZ
SOCIETE SUISSE DE PEDOLOGIE

DOCUMENT 9

PROTECTION DES SOLS CONTRE LES ATTEINTES PHYSIQUES

stratégie pour la mise en œuvre des nouvelles prescriptions formulées dans la Loi sur la protection de l'environnement (LPE) et l'Ordonnance sur les atteintes portées aux sols (OSol)

proposée de la
"Plateforme protection des sols" de la
Société Suisse de Pédologie

S. Tobias, R. Schulin, D. Schaub, P. Weisskopf, B. Buchter,
S. Zimmermann, F. Borer, U. Vökt

Les membres du groupe de travail:
R. Bono, F. Borer, B. Buchter, J.-P. Clément, E. Diserens, M. Fischler, S. Häusler,
S. Isler, J.-A. Neyroud, S. Rolli, Ch. Salm, D. Schaub, R. Schulin, S. Tobias,
U. Vökt, P. Weisskopf, L. Zehnder, S. Zimmermann

ISBN 3 260 05435 9
Juris Druck und Verlag
Dietikon 1999

Publications de la Société Suisse de Pédologie

Commandes, envoi: Landw. Lehrmittelzentrale LMZ
Länggasse 79
3052 Zollikofen
Tel. 031 911 06 68
Fax 031 911 49 25
e-mail lmz@pop.agri.ch
Internet http://combi.agri.ch/lmz

Bulletins SSP prix: Fr. 15.- par pièce sans frais d'envoi

No	an	No de commande
3	1979	970 801
5	1981	970 802
6	1982	970 803
8	1984	970 805
11	1987	970 808
12	1988	970 809
14	1990	970 811
15	1991	970 812
16	1992	970 813
17	1993	970 814
18	1994	970 815
19	1995	970 816
20	1996	970 817
21	1997	970 818
22	1998	970 819
23	1999	970 870

No 1, 2, 4, 7, 9, 10 et 13 épuisé

Documents SPP prix: Fr. 15.- (No 9 a et f Fr. 25.-) par pièce sans frais d'envoi

No	an	théma	No de commande
1 f	1984	Exploitation du gravier et agriculture	970 840
2 f	1985	Estimation et protection des sols	970 841
3 a	1986	Bodenschädigung durch den Menschen	970 822
4 a	1989	Lysimeterdaten von schweizerischen Messstationen	970 823
5 a	1994	Aktuelle Bodenforschung in der Schweiz	970 824
6 a	1995	Aktuelle Bodenforschung in der Schweiz II	970 825
7 a	1995	Aktuelle Bodenforschung in der Schweiz III	970 826
8 a	1996	Aktuelle Bodenforschung in der Schweiz IV	970 827
9 a	1999	Physikalischer Bodenschutz	970 828
9 f	1999	Protection des sols contre les atteintes physiques	970 842

No 1 et 2 allemand épuisé

D'autres publications

Guide d'excursion ISSS 1886 (transversale des Alpes)	No de comm.	970 860
Gefährdete organische Böden der Schweiz (1982)		970 861

Frontispice: Christoph Biedermann (Nebelspalter 15/1995)
Traduction en français: Bénédicte Friedli
Photos: Marco Walser

ISBN 3 260 05435 9

Préface

Les débats aux Chambres lors de la révision de la Loi sur la protection de l'environnement (LPE) à propos du 2ème alinéa de l'article 33 nous l'ont amplement prouvé. Par leurs interventions et leurs propositions, les conseillers nationaux et les conseillers aux états ont expressément souhaité introduire dans la loi l'obligation de protéger les sols contre les atteintes dues à l'érosion ou à la compaction. Il ne s'agit donc pas d'une nouvelle obligation qui aurait été introduite subrepticement dans la LPE.

Le Conseil fédéral soutient également cette volonté de protéger les sols. Il a approuvé les mesures destinées à prévenir ces atteintes dans le cadre de la procédure d'approbation de la nouvelle ordonnance sur les atteintes portées aux sols. Cette volonté commune du législatif et de l'exécutif fédéral est réjouissante, elle nous encourage et nous oblige à agir.

Les textes de la loi et de l'ordonnance doivent se répercuter dans la pratique. Car autrement le sol serait le parent pauvre.

La protection qualitative des sols contre les atteintes physiques est un domaine encore peu exploré. Elle ne peut pas s'appuyer sur une longue expérience. Il est donc d'autant plus utile que la SSP s'engage concrètement dans ce domaine. La SSP, qui s'impose de plus en plus comme la plate-forme de toutes les activités pédologiques et de protection des sols en Suisse, est, grâce à la diversité des activités et des formations de ses membres, prédestinée pour combiner les connaissances pédologiques fondamentales avec les prescriptions législatives et les besoins de la pratique.

La présente stratégie pour la mise en oeuvre de la protection qualitative des sols contre les atteintes physiques est exemplaire de cette aptitude. Je remercie, au nom de l'OFEFP, la SSP et en particulier le groupe de travail protection des sols pour ses initiatives et son travail qui nous permettent de faire un pas de plus dans la bonne direction.

Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage
section sol et biologie générale

Jürg Zihler

Jürg Zihler

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier tous les membres du groupe de travail pour les discussions intensives et les conseils utiles permettant de concevoir le présent ouvrage de base pour la protection physique des sols. Les auteurs expriment aussi leur gratitude à Dietmar Matthies et à August Ott pour leur lectorat critique ainsi qu'à Etienne Diserens et Jean-Auguste Neyroud pour la correction de la version française. Finalement les auteurs remercient l'Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage (OFEFP), division substances, sol et biotechnologie, section sol et biologie générale, d'avoir procurer les moyens financiers nécessaires à la conception de ce texte et à sa traduction française.

Les auteurs:

Silvia Tobias, Rainer Schulin, Daniel Schaub, Peter Weisskopf, Bernhard Buchter, Stefan Zimmermann, Franz Borer, Urs Vökt

Février 1999

Les membres du groupe de travail:

R. Bono, F. Borer, B. Buchter, J.-P. Clèment, E. Diserens, M. Fischler, S. Häusler, S. Isler, J.-A. Neyroud, S. Rolli, Ch. Salm, D. Schaub, R. Schulin, S. Tobias, U. Vökt, G. von Rohr, P. Weisskopf, L. Zehnder, S. Zimmermann

Résumé

Le sol constitue une base vitale pour les hommes, les animaux, les plantes et les micro-organismes. Il doit par conséquent être protégé contre toute utilisation abusive ou erronée qui le dégrade.

Objectifs de la protection des sols

En Suisse, comme dans beaucoup d'autres pays, la protection des sols se limitait jusqu'à présent à lutter contre la pollution liée aux substances persistantes nocives et aux métaux lourds. Depuis peu, il existe de nouvelles prescriptions protégeant le sol contre les atteintes physiques. Leur objectif est de prévenir les atteintes dues aux sollicitations physiques, telles que le compactage, l'érosion, le décapage et le remblai de terre ainsi que les mesures techniques de correction des eaux souterraines touchant le sol. Le sol étant un bien limité, sa protection préventive s'avère d'autant plus importante.

La protection des sols vise les objectifs suivants:

1. **Garantir la multifonctionnalité du sol:** Le sol peut remplir plusieurs fonctions simultanément. La fertilité du sol telle qu'elle est définie par l'Ordonnance sur les atteintes portées aux sols (OSol) tient compte de cette multifonctionnalité. Selon l'OSol, un sol est réputé fertile lorsque, non seulement il assure une production de biens végétaux, mais également lorsque ses autres fonctions sont garanties. L'objectif principal de la protection chimique et physique des sols consiste donc à garantir à long terme leur multifonctionnalité.
2. **Prévenir de nouvelles atteintes:** Conformément au principe de prévention défini par la Loi sur la protection de l'environnement (LPE) il s'agit surtout de prévenir les nouvelles atteintes aux sols. En même temps, il est indispensable de préserver les possibilités d'exploitation économique du sol. La protection physique des sols doit donc être menée d'abord par une exploitation judicieuse du sol. Il s'agit d'adopter des techniques compatibles au maintien de la fertilité.
3. **Sauvegarder les surfaces fertiles:** Il est indispensable de sauvegarder un maximum de surfaces fertiles et perméables. Cet objectif ne peut être atteint qu'en préservant d'une part les surfaces perméables et d'autre part en faisant valoir le principe de compensation des surfaces en cas de changement d'affectation d'un terrain. Cette approche se rallie au principe de compensation du défrichement tel qu'il est en rigueur dans la législation forestière.
4. **Remédier aux atteintes:** Dans la mesure du possible, il s'agit de réhabiliter les sols ayant subis des dommages en encourageant la régénération naturelle du sol par des techniques d'exploitation appropriées.

Principes régissant la mise en œuvre de la protection physique des sols

Tant dans la mise en œuvre pratique que dans l'exécution administrative, il convient de veiller à ce que les impacts physiques causés au sol lors de son utilisation et son exploitation ne dépassent pas les limites de tolérance imposées par l'écosystème. Ce contrôle exige des critères d'appréciation clairs aussi bien du côté de l'exploitation que du côté du sol. Il s'agit de fixer des

valeurs indicatives permettant d'apprécier la vulnérabilité des sols aux atteintes physiques et d'en déduire les seuils de résistance de l'écosystème.

Pour les atteintes physiques, la forme, l'ampleur et la durabilité des préjudices portés au sol dépendent non seulement de l'impact, mais aussi du degré de vulnérabilité du sol. Comme tous les écosystèmes, le sol est à même, dans une certaine mesure, de se remettre des dommages subis. Mais pour l'heure, il est illusoire de vouloir quantifier cette faculté de régénération.

Par conséquent, toute une série d'acteurs trouvent leur part de responsabilité en matière de protection physique des sols: les autorités, les agriculteurs, les sylviculteurs, les ouvriers de la construction, ainsi que les stations de recherche, les écoles et les politiciens.

La protection physique des sols possède des liens étroits avec d'autres disciplines. Il s'agit là avant tout de la protection et de l'aménagement des cours d'eau, de l'agriculture, de la sylviculture, de la construction et du génie civil ainsi que de l'aménagement du territoire et de l'aménagement foncier. De ce fait, il est indispensable de coordonner la protection des sols avec les domaines précités.

La mise en œuvre de la protection physique des sols se base sur l'approche suivant:

- **Informer et motiver:** Il s'agit d'élargir et d'approfondir les connaissances du sol liées à son exploitation tant dans les programmes de formation que dans les programmes de post-formation.
- **Paramètres d'évaluation, de mesure et de contrôle:** Il s'agit de définir des valeurs indicatives indiquant les seuils de résistance de l'écosystème sol. L'introduction d'un examen élargi du type de véhicules et de machines travaillant le sol permettrait d'encourager les engins évitant des atteintes durables aux sols.
- **Recommandations, directives, prescriptions et mesures d'incitation:** L'affection d'un sol à une utilisation précise et le choix des cultures doivent tenir compte de la vulnérabilité du sol. Afin d'atteindre ce but, il s'agit d'édicter des recommandations, des directives, des prescriptions et des mesures d'incitation appropriées. Aussi s'agit-il de concevoir des règles de „bonne pratique" pour les différentes façons et techniques d'exploitation du sol.

Atteintes physiques fréquentes en Suisse

Les exemples suivants illustrent, quelles sont les atteintes physiques aux sols fréquentes en Suisse avec leurs causes et mesures préventives à déployer:

- Les atteintes dues au **compactage** du sol peuvent être d'origine différente: brassage d'horzons, tassement par affaissement, cisaillement, pétrissage et homogénéisation. Ces processus sont souvent liés au décapage et au remblai (remise en état) de sols, à des mesures d'amélioration foncière touchant le sol ou alors au passage de véhicules et au travail du sol à l'aide de machines. Souvent, l'atteinte est causée par une portance insuffisante du sol lors de sa sollicitation (humidité trop élevée par exemple). Conformément au principe de prévention, les mesures efficaces de protection visent à éviter toutes atteintes durables aux sols suite au compactage.

- En Suisse, **l'érosion** est surtout causée par la déportation de particules de terre par l'eau. Ce phénomène touche principalement les terrains en pente ayant une structure du sol peu agrégée par nature ou en raison de son exploitation. L'érosion diffuse (en nappe) apparaît sur des sols atteints de battance. Sur les pentes plus raides, l'eau ruisselant à la surface peut se concentrer dans les ornières laissées par les roues ou dans les lignes de semis, menant à l'érosion linéaire. Les rigoles peuvent se réunir en réseaux entiers et causer des ravines profondes au bas des pentes (érosion des thalwegs). L'érosion peut être éviter en adaptant la structure parcellaire et en cultivant la pente transversalement. Surtout sur les sols ayant une structure instable il est recommandé d'éviter la jachère nue.
- Les atteintes au régime hydrique surviennent par exemple lors d'un assèchement de sols marécageux ayant pour but de faciliter leur exploitation. L'apport d'oxygène dans les horizons organiques déclenche la minéralisation de la tourbe, entraînant un affaissement du profil. Ce phénomène constitue une grave atteinte au sol, dont ce dernier ne peut de lui-même se remettre, même avec le temps. La culture des sols marécageux n'est en aucun cas une opération durable et est donc à proscrire.
- **L'évacuation des eaux dites „non polluées" par infiltration directe dans les zones habitées** peut elle aussi porter atteintes aux sols. D'une part, elle peut être à l'origine d'une pollution chimique des sols suite aux substances nocives d'origine atmosphérique déposées sur les surfaces peu perméables puis concentrées dans la zone d'infiltration. D'autre part, de fines particules de poussière sont entraînées dans le réseau poreux finissant par l'obstruer et ainsi de compacter le sol. La législation fédérale sur la protection des eaux devrait tenir compte de ce phénomène menaçant la fertilité des sols.

Valeurs indicatives pour la protection physique des sols

Dans les annexes, la plate-forme „protection des sols" de la Société Suisse de Pédologie (SSP) traite les valeurs indicatives pour la lutte contre le compactage et l'érosion du sol. Elle estime que les paramètres physiques suivants se prêtent le mieux à la définition de valeurs indicatives pour la lutte contre le compactage: volume des pores grossiers, perméabilité à l'eau et à l'air, capacité d'infiltration et profondeur d'enracinement. Les seuils de résistance du sol face aux sollicitations mécaniques devraient être fixer à l'aide des paramètres tels que la contrainte de préconsolidation (prise à la capacité au champ), la résistance au cisaillement (prise à la capacité au champ), la force de succion, la résistance à la pénétration, la profondeur des ornières laissées par les roues d'un engin (déformation), la plasticité (indices de plasticité) et la pierrosité du sol.

Pour l'érosion, il s'agit de définir les valeurs indicatives en fonction du taux tolérable de perte de sol. Dès lors, si l'on voulait appliquer strictement le principe de prévention, la valeur indicative pour l'érosion du sol devrait être fixée à zéro. Toutefois, la plate-forme „protection des sols" de la SSP se rallie aux valeurs indicatives figurant dans les annexes de l'OSol fixées en fonction de la profondeur physiologique du sol. D'après l'état actuel des connaissances, les valeurs sont définies de façon à ce que il n'y ai pas de réduction sensible du potentiel de rendement naturel d'un sol sur une période de 300 à 500 ans.

Contenu

1. Introduction

1.1 Définition de la protection physique des sols

Le sol est la couche externe de la croûte terrestre. Il se forme sous l'influence de la roche-mère, du climat, du relief, des êtres vivants et du temps. Le sol est le siège d'un échange intense de matière et d'énergie entre l'air, l'eau et les roches. En tant que partie de l'écosystème terrestre, il occupe une position clé dans les cycles globaux des matières[1]. Le sol constitue de ce fait une base vitale pour les hommes, les animaux, les plantes et les micro-organismes. Ce bien vital doit en conséquence être protégé contre toute utilisation trop intensive ou erronée qui le dégrade (Blume 1992).

En Suisse, comme dans beaucoup d'autres pays, la protection des sols se limitait jusqu'à présent aux atteintes d'origine chimique. Il s'agissait en premier lieu de lutter contre la pollution liée aux métaux lourds[2]. Depuis peu, il existe de nouvelles prescriptions protégeant le sol contre les atteintes physiques susceptibles, à long terme, d'entraver sa fertilité.

La protection physique des sols touche plusieurs domaines: le **compactage** du sol résultant de la pression exercée aux passages de machines lourdes, diminuant la perméabilité du sol à l'eau et à l'air; **l'érosion hydrique ou éolienne** provoquant des pertes irréversibles de matériaux terreux; **le décapage, le stockage et le remblai** de terre liés à l'exploitation de matières premières et aux travaux de chantier; **l'affaissement des sols organiques** après des corrections des eaux souterraines à grande échelle.

1.2 La multifonctionnalité du sol

Le sol remplit les fonctions les plus diverses. Elles sont de nature essentiellement écologique, économique ou immatérielle. Relevons parmi les plus importantes (cf. fig. 1):

- agent de transformation biologique pour la décomposition de substances organiques;
- substrat vital pour la croissance des plantes et les associations végétales naturelles et cultivées;
- espace vital pour la faune et les organismes du sol (y compris réservoir de gènes);
- filtre et tampon pour les substances nocives;
- régulateur du régime de l'eau, de l'air et de la chaleur;
- agent d'informations („archive");
- support pour la construction d'installations et le passage des machines agricoles ou forestières;
- réservoir de matières premières.

La fertilité du sol telle qu'elle est définie par l'Ordonnance sur les atteintes portées aux sols (OSol) ne se limite pas à la seule notion de rendement ou de production, c'est-à-dire à sa fonction de substrat pour la croissance des plantes. Par atteintes portées aux sols, la Loi sur la protection de l'environnement (LPE) entend toutes modifications imputées à l'état naturel des sols (art. 7, al. 4bis LPE). Selon l'Osol, un sol est réputé fertile lorsque, non seulement il assure une production végétale, mais également lorsque ses autres fonctions sont garanties (agent de transformation

[1] Définition du terme „sol": Proposition du groupe de travail ad hoc „Définition du sol" à l'adresse de la Société Suisse de Pédologie (cf. texte détaillé dans les annexes).

[2] Ordonnance sur les atteintes portées aux sols (OSol) 1998 (SR 814.12)

biologique, espace vital pour les organismes du sol, filtre et tampon pour les substances nocives et régulateur du régime de l'eau, de l'air et de la chaleur; art. 4 OSol, art. 2, al. 2, OSol).

Dans le langage courant, la notion de „fertilité du sol" implique déjà un certain jugement de valeur sur la qualité du sol. Ce qui n'empêche pas les milieux intéressés (agriculteurs, autorités publiques, organisations écologiques) d'avoir leur propre conception de la valeur d'un sol. La présente étude utilise la notion de „fertilité du sol" au sens défini dans l'OSol ou du terme anglais „soil quality". Aujourd'hui, les experts définissent la **fertilité du sol** (soil quality) comme **l'aptitude du sol à remplir ses diverses fonctions**, tant à l'intérieur de sa propre „écosphère" qu'à l'extérieur en présence d'autres écosystèmes (Larson et Pierce 1994; Karlen et al. 1997; Johnson et al. 1997). En ce sens, la fertilité du sol peut être interprétée comme étalon de mesure de la multifonctionnalité du sol.

Chaque fonction du sol a son importance. Cette dernière varie en fonction des conditions locales et des exigences des hommes ou des autres êtres vivants. Ainsi, selon **l'usage** qu'il se propose d'en faire, l'homme valorise certaines fonctions du sol au détriment parfois d'autres. Mais, ce faisant, l'homme peut porter atteintes aux autres fonctions au risque même de les anéantir (par exemple: tassement du sol et imperméabilité causées par le passage d'engins lourds, exploitation outrancière de matières premières, drainage et modifications du régime hydrique à la suite d'améliorations foncières).

Les fonctions du sol les plus sensibles sont les premières atteintes, ce qui a pour effet dans tous les cas de restreindre la multifonctionnalité du sol (cf. fig. 1). L'exemple de l'agriculture illustre parfaitement ce postulat: dans l'agriculture, l'homme profite en premier lieu du sol en tant que substrat permettant une production de biens alimentaires. Or cette fonction fait aussi appel à toute une série d'autres fonctions du sol: espace vital pour les organismes du sol, régulateur du régime de l'eau et de l'air, filtre et tampon pour les substances nocives et transformateur biologique. Le passage de machines agricoles lourdes sur le sol humide (par exemple pendant la récolte de cultures sarclées) provoque souvent un tassement irréversible du sol. L'aération insuffisante des zones comprimées entraîne une sérieuse dégradation de la qualité du sol comme espace vital. Celle-ci provoque à son tour une réduction de la faculté de transformation biologique. De surcroît, la perméabilité réduite du réseau poral d'un sol compacté ralentit la circulation de matières et d'énergie entre l'atmosphère, la pédosphère et la lithosphère.

La vulnérabilité des fonctions du sol face aux atteintes physiques est variable (cf. fig. 1). Cette différence dans le degré de vulnérabilité s'explique principalement par la différence dans le degré d'interaction réciproque des fonctions. La figure 1 présente de manière très simplifiée une insertion „hiérarchisée" des fonctions entre elles, avec, au premier plan, les fonctions les plus vulnérables. Les fonctions représentées au premier plan présupposent, du moins en partie, la présence des fonctions figurant à l'arrière-plan. Plus une fonction est affectée par le disfonctionnement d'une autre, plus elle sera qualifiée de sensible. Cette règle est surtout valable pour les fonctions de substrat pour la croissance des plantes, d'agent de transformation biologique, d'espace vital pour la pédofaune et de régulateur du régime de l'eau, de l'air et de la chaleur. Les autres fonctions n'influencent que peu ou pas les cinq fonctions précitées. La succession des couches pédologiques est-elle perturbée, des conséquences sont dès lors possibles au niveau du sol en tant que support à la construction, agent d'informations („archive") et réservoir de matières premières. Les cinq autres fonctions, plus vulnérables, peuvent à leur tour être perturbées.

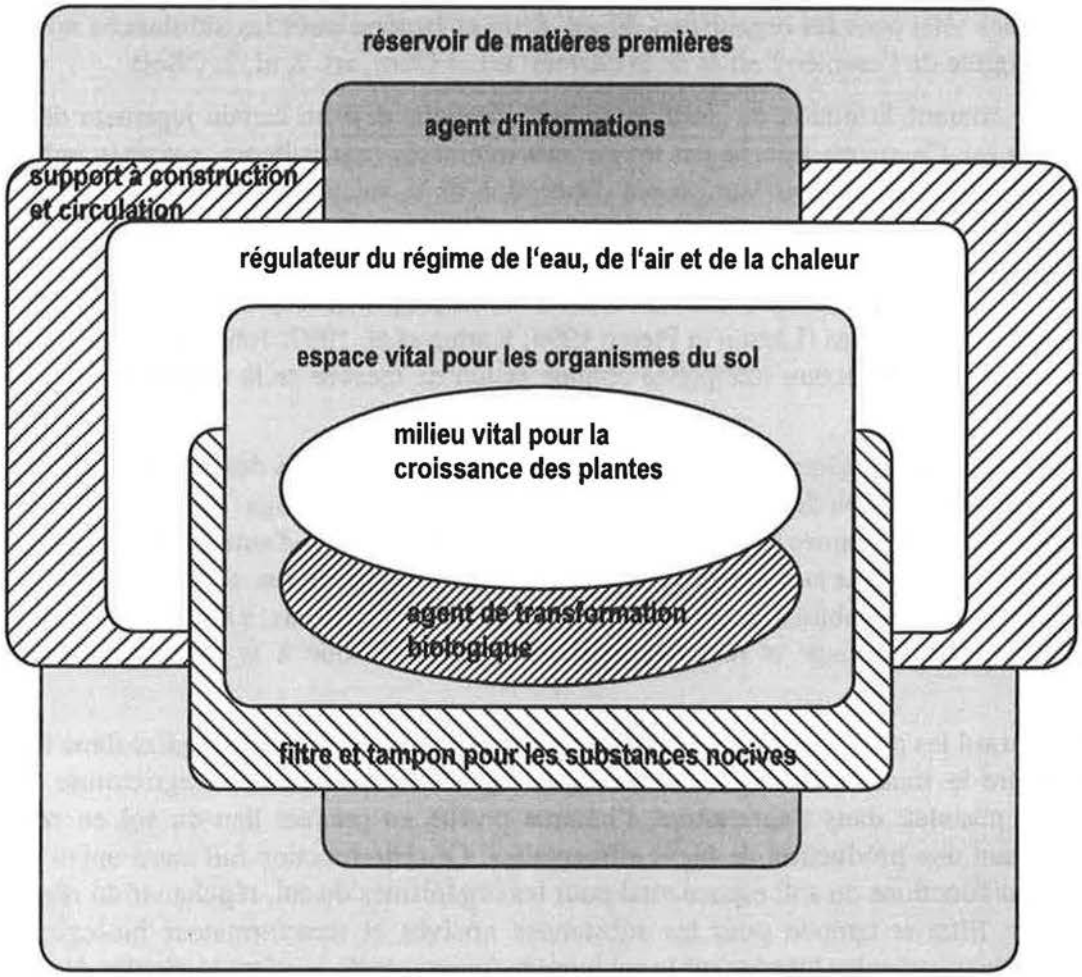


Fig. 1 Les multiples fonctions du sol

2. Objectifs et concepts de la protection physique des sols

2.1 Objectifs de la protection physique des sols

La mise en œuvre de la nouvelle législation sur la protection physique des sols et son application par les autorités exige que l'on définisse de manière précise et concrète les objectifs recherchés. Cette définition s'avère en l'occurrence d'autant plus nécessaire que les propriétés physiques du sol ont déjà été modifiées à maints endroits par son exploitation. Ces modifications ne se traduisent pas toujours par des chutes de rendement. Au contraire, des mesures destinées à améliorer le régime de l'eau et de l'air dans le sol peuvent même accroître sa productivité.

L'objectif principal de la protection chimique et physique des sols consiste à **garantir à long terme la multifonctionnalité du sol** et par là sa **fertilité** (cf. chap. 1.2). Les objectifs dépendent, dans chaque cas d'espèce, tant des conditions locales et du potentiel d'un sol que de l'importance attachée par l'homme et la nature aux diverses fonctions vitales du sol à cet endroit précis. Ainsi l'objectif doit être concrétisé pour chaque site compte tenu du contexte locale. Il s'agit

soit de préserver les fonctions du sol naturel non perturbé ou de les restituer à leur état naturel, soit d'améliorer certaines fonctions en vue d'un usage déterminé du sol.

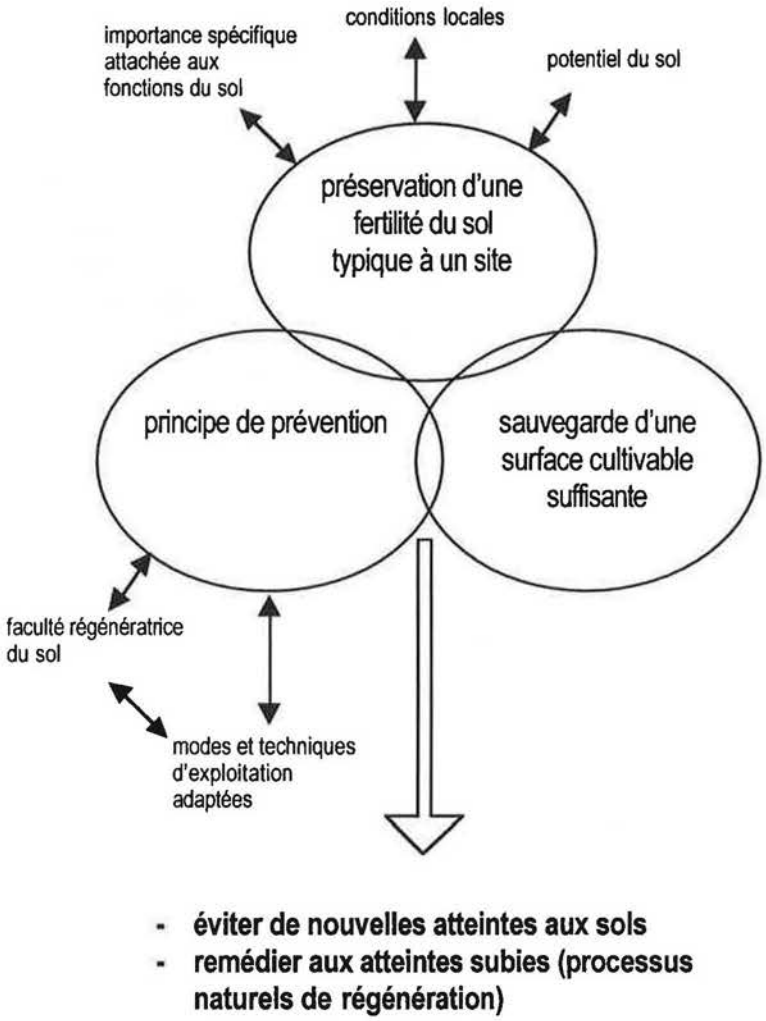


Fig. 2 Les objectifs de la protection physique du sol

La LPE est essentiellement un instrument de **prévention** pour garantir à long terme la multifonctionnalité des sols. Cette protection s'avère d'autant plus urgente, que le sol est un bien limité (Lal 1994). Mais, en même temps, il est indispensable de préserver les possibilités d'exploitation du sol. La protection des sols doit donc être menée d'abord à travers la façon d'exploiter le sol. Pour l'agriculture et la sylviculture, il s'agit d'adopter des modes d'exploitation conformes préservant ou restituant, le cas échéant, la fertilité „naturelle" ou „intrinsèque" du sol. Le mode d'utilisation d'un sol doit tenir compte déjà de son potentiel de régénération (cf. chap. 2.3; Stasch et Stahr 1993).

Une protection durable des sols implique aussi la **sauvegarde des espaces**, soit d'une surface cultivable suffisante (Häberli 1991), d'où trois postulats:

- Les activités de construction doivent se limiter aux espaces non exploités à l'intérieur des zones à bâtir déjà viabilisées.
- Les espaces inutilisés dans les zones à bâtir doivent être réaffectées aux zones agricoles.
- Une protection durable exige aussi une compensation de surfaces en cas de changement d'affectation.

A chaque fois qu'une surface donnée est exposée à un mode d'utilisation portant préjudice à l'une des fonctions vitales du sol, une surface équivalente sise dans la même région doit être restituée aux surfaces protégées. De même, l'affectation de terrains inutilisés dans la zone à bâtir en espaces à exploiter de manière appropriée devrait être obligatoire. Chaque fois qu'un terrain à vocation agricole disparaît, cette perte de surface perméable doit être également compensée en revitalisant par exemple une route désaffectée. Cette approche se rallie au principe de compensation du défrichement (LFo, art. 1, al. 1, art. 3, art. 7, al. 1). Une protection durable des sols contre les atteintes physiques s'avère impossible sans la réalisation de ces trois postulats en matière d'aménagement du territoire. Ces idées ont été développées par Knoepfel et al. (1996).

2.2 Atteintes physiques

Conformément au principe de prévention, la protection des sols vise avant tout à éviter les atteintes aux sols diminuant à long terme leur fertilité. Par atteintes physiques, on entend les atteintes portées à une ou à plusieurs fonctions du sol à la suite d'une dégradation de sa structure. Les causes peuvent être directes ou indirectes.

Le travail de la terre en agriculture ou la manipulation de matériaux terreux sur les chantiers peuvent avoir des **effets** néfastes **directs** sur la structure des sols, si l'on pense aux travaux du sol mal adaptés ou au passage d'engins lourds sur des sols peu portants. Ces actions jouent un rôle prépondérant dans les atteintes physiques. Moins importants, les **effets indirects** ne sont pas pour autant négligeables. En leur présence la vulnérabilité du sol peut augmenter (cf. chap. 2.3). Citons comme exemple les interventions dans le régime hydrique d'un territoire ayant pour effet une augmentation de l'humidité du sol. Autre exemple: la réduction de la circulation de l'eau dans le sol et l'érosion engendrées par des corrections de cours d'eau. Le tableau 1 énumère les sources caractéristiques d'atteintes aux sols et les dommages souvent durables qui en résultent.

L'action préventive va de pair avec l'action curative. Il faut pour cela encourager la régénération naturelle des sols tout en améliorant ou en développant des techniques d'exploitation appropriées.

Le principe de prévention exige également de prévenir les atteintes susceptibles d'être causées par des usages hypothétiques du sol. Cela signifie qu'il faut en principe protéger toutes les fonctions du sol, même si elles sont à première vue sans importance pour l'usage actuel ou projeté d'un terrain. S'il en va certes d'abord des fonctions du sol les plus sensibles comme celles de régulateur du régime de l'eau, de l'air et de la chaleur, ou d'espace vital pour la faune et la flore; il ne faut cependant jamais oublier qu'une fonction moins vulnérable, comme celle „d'archive", peut elle aussi devenir importante un jour. Il convient d'éviter toute infraction superflue, en particulier au niveau de la disposition des horizons (par exemple: remblai de terre humifère).

Sources d'atteintes physiques aux sols	Dommages qui en résultent
travail mal approprié du sol agricole (sol trop humide, vitesse de rotation du cultivateur trop élevée)	dégradation de la structure (pétrissage, lissage) des couches supérieures du sol, encroûtement et battance superficielle, érosion
passage de machines agricoles ou forestières trop lourdes (sol trop humide ou trop peu portant)	dégradation de la structure (pétrissage) des couches supérieures du sol, compactage des couches supérieures et intermédiaires du sol, érosion
manipulation de matériaux terreux (décapage, stockage, remblai de sol trop humide)	dégradation de la structure, dérangement de la succession des couches pédologiques, compactage, engorgement
drainage	tassement des couches organiques du sol, pulvérisation de la matière organique
irrigation	salinisation de la frange capillaire, réduction de la capacité d'absorption d'eau (en fonction de l'intensité d'irrigation)

Tabl. 1: Sources caractéristiques d'atteintes physiques aux sols et dommages souvent durables qui en résultent

2.3 Vulnérabilité et faculté régénératrice du sol

Lorsqu'une substance nocive et persistante contamine le sol, on parle de pollution chimique. Toutefois, les effets de telles substances sur les fonctions d'un sol dépendent étroitement de la nature de la fixation de ces substances dans le sol ou de leur bio-assimilabilité. Pour les atteintes physiques (dégradation de la structure, érosion) la forme, l'ampleur et la durabilité des préjudices dépendent non seulement de la nature, de l'ampleur et de la durée de l'impact mais aussi des propriétés du sol.

La vulnérabilité d'un sol aux sollicitations mécaniques dépend, notamment, de la composition de ses matières solides et du taux d'humidité du sol lors de l'impact. Ce taux peut bien entendu varier très fortement et rapidement au gré des conditions climatiques. La vulnérabilité du sol peut dès lors changer radicalement en peu de temps. Elle dépend ainsi non seulement des **conditions locales** (type de sol, texture) mais aussi de **l'état du sol** au moment de la sollicitation (taux d'humidité, couverture végétale, structure et stabilité structurale).

Comme tous les écosystèmes, le sol possède une certaine faculté de se remettre de dommages subis si on lui en donne le temps. Lorsqu'un sol a perdu ses facultés régénératrices, les dommages deviennent irréversibles. On entend par faculté régénératrice l'aptitude d'un sol à retrouver son état initial après avoir été endommagé (Szabolcs 1994). Cette régénération peut être le résultat aussi bien de processus pédogénétiques que d'interventions humaines.

Les **processus naturels de régénération** obéissent aux lois de la pédogenèse. L'amélioration de la structure du sol et la disparition graduelle de la semelle de labour lorsque des surfaces labourées sont durablement transformés en prairies naturelles en fournit un bon exemple. Au fil de ces processus, la couche supérieure du sol retrouve progressivement sa structure grumeleuse, et le système poral des zones intermédiaires sa perméabilité. Le temps nécessaire permettant une

régénération naturelle dépend du climat, du régime hydrique annuel du sol et de l'ampleur des dommages. Cette régénération dépend à son tour - comme on l'a déjà vu plus haut - de la vulnérabilité du sol au moment de sa sollicitation. Toutefois, la durée de cette réhabilitation est souvent supérieure à l'intervalle de temps séparant deux impacts physiques[3].

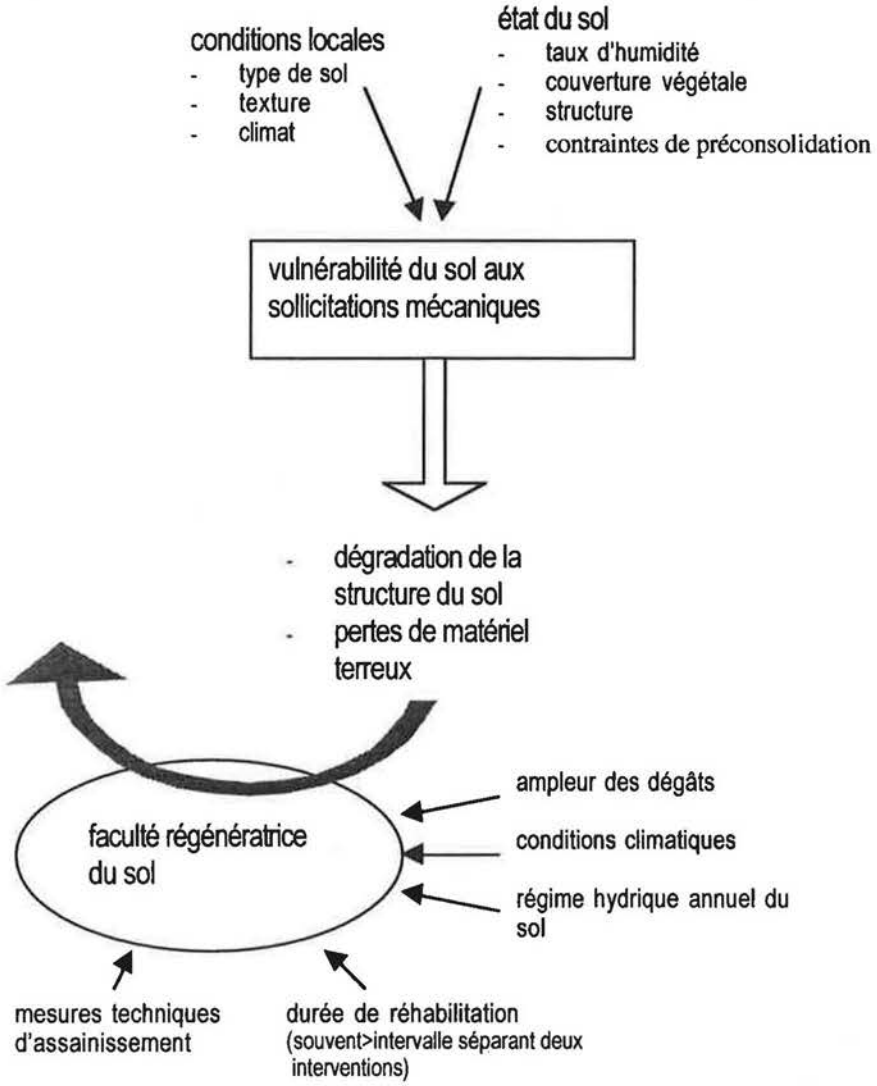


Fig. 3 Vulnérabilité du sol aux sollicitations mécaniques et sa faculté régéneratrice

Parfois, la durée de régénération peut être accélérée par des **mesures techniques appropriées d'assainissement**. Encore faut-il tenir compte, impérativement, du temps nécessaire au sol pour

[3] Par exemple, on a pu constater un abaissement d'environ 2 cm de la surface du sol dans les traces de roues d'un tracteur après un premier passage sur une prairie grasse en été. Le sillon laissé par les traces de roues s'était à peine comblé jusqu'au passage suivant du tracteur, trois mois plus tard (dernière fauche de l'année); en tous cas, le sol n'avait pas retrouvé son niveau d'origine. Le passage suivant provoqua une nouvelle déformation des ornières. L'élasticité mécanique du sol ayant déjà été dépassée au premier passage, les effets se sont cumulés. En comparant les mouvements superficiels du sol et l'évolution de sa force de succion, on a certes pu relever des mouvements du sol résultant de phénomènes de gonflement et de retrait. Ces mouvements étaient toutefois quelque dix fois plus faibles que les déformations dues au poids des roues. (Baracchi et Stüber 1997)

neutraliser les préjudices éventuels occasionnés par ces interventions. La réhabilitation de la fonction du sol en tant qu'espace vital pour la faune et la flore, par exemple, exige une reconstitution compétente puis une mise en culture qui ménage le sol.

L'état actuel des connaissances ne permet que difficilement d'apprécier les effets d'impacts physiques sur les fonctions intrinsèques du sol. Des essais scientifiques de longue durée, utilisant le rendement de la récolte comme indicateur, ont été menés en Suède et en Ukraine[4]: les couches supérieures du sol ont été intentionnellement compactées, entraînant des baisses de rendement les années suivantes. Après quatre à six ans, les tassements n'étaient plus perceptibles sur la base des critères habituels d'évaluation de la productivité agricole d'un sol. Malheureusement, le rendement agricole ou forestier ne constitue pas à lui-seul un critère suffisant pour mesurer la faculté de régénération de l'écosystème sol. Ce rendement dépend, dans une très large mesure, des conditions climatiques et du mode d'exploitation. On ignore toujours le temps nécessaire pour qu'un sol retrouve toutes ses fonctions énumérées au chapitre 1.3. Pour l'heure, il est impossible de définir des normes d'appréciation quantitative des atteintes portées à la fertilité d'un sol (Schulin 1993).

2.4 La protection physique des sols au carrefour de plusieurs disciplines

2.4.1. Importance spatiale des fonctions du sol

Les fonctions du sol représentées dans la figure 1 se distinguent non seulement par le degré de leurs interactions réciproques, mais également par le champ plus ou moins vaste de leur importance spatiale. Tandis que les fonctions du sol en tant que „support" et „archive" se limitent à l'espace étroitement circonscrit du profil, la fonction de régulateur du régime de l'eau et de l'air s'étend à tout le territoire d'un bassin versant hydrologique. Les vastes mesures de régulation des cours d'eau agissent généralement aussi sur les nappes phréatiques des territoires environnants. C'est le cas en particulier des abaissements ou des relèvements artificiels du lit, et donc du niveau d'un cours d'eau, qui ont un impact sur le niveau des nappes souterraines et sur leurs fluctuations. Ces mesures à grande échelle peuvent provoquer des altérations du profil du sol et affecter la fonction du sol en tant que milieu pour la croissance des plantes.

Les interventions techniques de grande envergure touchant au **régime de l'eau dans le sol** (régulations des cours d'eau, drainages, irrigations) ont souvent pour but d'améliorer la production agricole au niveau du profil du sol. Inversement, l'agriculture peut elle aussi affecter fortement, par les méthodes de culture, l'état des cours d'eau situés dans le bassin d'alimentation d'une parcelle. Un ameublissement trop intensif de la surface d'un sol faiblement structuré favorise l'érosion lors de précipitations intensives. Les particules de terre entraînées par les eaux charrient avec elles des

---

[4] Afin de vérifier l'effet d'ameublissement du labour, la surface d'un sol choisi fut fortement compactée artificiellement juste avant le labour, et ceci pendant 5 ans de suite. Sous l'effet de ces compactions, le rendement baissa dans un premier temps d'année en année pour se stabiliser, après 4 à 5 ans, à un niveau inférieur. Puis, on cessa les compactions additionnelles et on continua à labourer le sol selon le mode usuel. En 4 à 5 ans, les rendements agricoles retrouvèrent leur niveau initial. Les chercheurs en déduisirent que les baisses de rendement dues à un compactage des couches supérieures du sol peuvent être compensées en 4 à 5 ans par l'action conjuguée de labour annuel et des conditions climatiques. Dans un autre essai, les chercheurs effectuèrent dix passages avec un tracteur de 8 tonnes; il s'ensuivit des baisses de rendement pendant 5 à 6 ans, après quoi on ne pu plus constater de baisse de rendement imputable à ces passages. (Håkansson et Medvedev 1995)

substances nutritives ou nuisibles provenant d'engrais. L'érosion contribue ainsi à l'eutrophisation des cours d'eaux.

L'abaissement d'un cours d'eau provoque également une baisse du **niveau de la nappe phréatique,** ou plus précisément du niveau piézométrique des terres environnantes. Ceci peut créer des conditions favorables pour certaines cultures. Cette baisse de niveau peut toutefois avoir des conséquences néfastes pour les sols riches en matières organiques, celles-ci se décomposant plus rapidement en présence d'oxygène. Il s'agit là du phénomène bien connu de l'affaissement des tourbières. A l'inverse, il est possible de relever intentionnellement le niveau des cours d'eau dans le but de rétablir un régime hydrique proche de la saturation sur certains territoires délimités, comme cela se fait aujourd'hui à l'occasion d'aménagements fonciers destinés à reconstituer d'anciennes zones marécageuses (Grenchner Witi, Département des constructions du canton de Soleure 1993a et 1993b).

Les **substances agricoles auxiliaires** épandues sur une parcelle peuvent traverser le sous-sol finissant par aboutir dans la nappe phréatique et par là-même se déplacer avec le courant. Ces substances peuvent ainsi se répandre, par voies souterraines, sur une surface plus vaste que prévue, entraînant des nuisances comme l'eutrophisation des nappes phréatiques.

Le fait de favoriser unilatéralement certaines fonctions du sol directement utiles à l'exploitation peut susciter des conflits d'utilités, si ces fonctions portent préjudice à d'autres. La construction, et plus précisément **l'imperméabilisation** d'une surface, ne touche en principe que la fonction de „support". Or cette opération neutralise en général toutes les autres fonctions du sol de manière irrémédiable.

2.4.2 Disciplines annexes et législation

En raison précisément de l'extrême diversité du champ d'influence spatiale des diverses fonctions du sol, la protection du sol ne peut se contenter d'agir uniquement au niveau du profil, mais doit s'inscrire dans une conception globale de préservation de l'environnement et des ressources naturelles. De ce fait, il est indispensable de coordonner la protection des sols avec les domaines touchant:

- **la protection et l'aménagement des cours d'eau:** crues, sources d'érosion du sol liées à un apport dans les cours d'eau de particules de terre renfermant des substances nutritives et nuisibles.
- **l'agriculture et la sylviculture:** modifications de la structure du sol suite à un travail du sol mal adapté ou suite au passage d'engins lourds.
- **la construction et le génie civil:** modifications de la succession des couches pédologiques et de la structure du sol dues à la manipulation de matériaux terreux et au passage d'engins lourds.
- **l'aménagement du territoire et l'aménagement foncier:** affectation de surfaces à des modes d'utilisation précis ou modification du régime hydrique d'une région pour les besoins de l'agriculture.

Ainsi la protection des sols se trouve du moins en partie impliquée dans d'autres bases légales ci-mentionnées sans devoir y occuper nécessairement une place prioritaire. La Loi sur l'aménagement du territoire (LAT) régit par exemple la protection contre l'imperméabilisation outrancière,

l'exploitation abusive des matières premières ou le dépôt des ordures. La LPE, de son côté, vise à protéger entre autre les fonctions naturelles du sol contre les atteintes physiques, chimiques et biologiques.

Du fait des corrélations mentionnées plus haut, les bases légales ci-après jouent également un rôle dans la protection des sols, même si elles n'ont pas directement pour objet le sol:

- la Loi fédérale sur la protection des eaux et loi fédérale sur l'aménagement des cours d'eau
- la Loi fédérale sur l'agriculture
- l'Ordonnance sur les forêts
- l'Ordonnance sur le traitement des déchets
- la Loi fédérale sur l'aménagement du territoire.

3. Mise en œuvre de la protection physique des sols

3.1 Principes fondamentaux régissant la mise en œuvre

La protection du sol est efficace surtout sous forme préventive, c'est-à-dire lorsque toute utilisation du sol est conçue de manière à éviter des dommages. Elle doit par conséquent intégrer aussi, en fonction de son extension spatiale, toutes les autres disciplines mentionnées au chapitre 2.4 (aménagement du territoire, génie rural, agriculture, sylviculture, génie civil, protection et aménagement des cours d'eau). Les mesures de protection des sols dites curatives, destinées à réparer des dégâts, ont en général des effets limités.

Tant dans la mise en œuvre pratique que dans l'exécution administrative, il convient de veiller à ce que les impacts mécaniques causés au sol lors de son utilisation et son exploitation ne dépassent pas les limites de tolérance de l'écosystème (cf. figure 2). Ce contrôle exige des critères clairs aussi bien du côté des causes (méthodes d'exploitation) que du côté des effets (réactions du sol). La définition de ces critères présuppose une connaissance précise de la relation entre une cause et son effet, c'est-à-dire entre le mode d'exploitation et la réaction du sol qui s'ensuit.

Il s'agit de définir des seuils de résistance au-delà desquels les fonctions vitales d'un sol (espace vital pour les organismes du sol et pour les plantes, régulateur du régime de l'eau, de l'air et de la chaleur) ne peuvent plus être assurées (Lal 1994). Ces seuils peuvent être définis d'une part sous forme d'indicateurs mesurables (paramètres), d'autre part par les rapports liant les indicateurs entre eux.

Il s'agira donc de déduire de la relation entre l'usage ou l'exploitation du sol et sa réaction des critères permettant d'apprécier la compatibilité écologique d'un usage ou d'un mode d'exploitation déterminé du sol et de l'impact mécanique qui s'ensuit. Ces critères sont destinés en premier lieu à faciliter la mise en application de la protection physique des sols, servant de base à:

- un choix du mode d'utilisation adapté au site en question, à l'échelon de l'aménagement du territoire.
- des recommandations concernant le choix de l'assolement, le degré de mécanisation et les techniques d'exploitation appropriées au site, à l'échelon de l'exploitation individuelle (travail du sol, amendements, récoltes et transports dans l'agriculture; coupes et transport de bois, plantation d'arbres et débardage dans la sylviculture).

- des directives concernant la „bonne pratique" agricole ou forestière et des instructions expliquant comment s'assurer de la stabilité requise du sol au moment des travaux projetés.
- des directives encourageant les techniques de construction ou de remise en état des sols tenant compte de l'écosystème „sol".

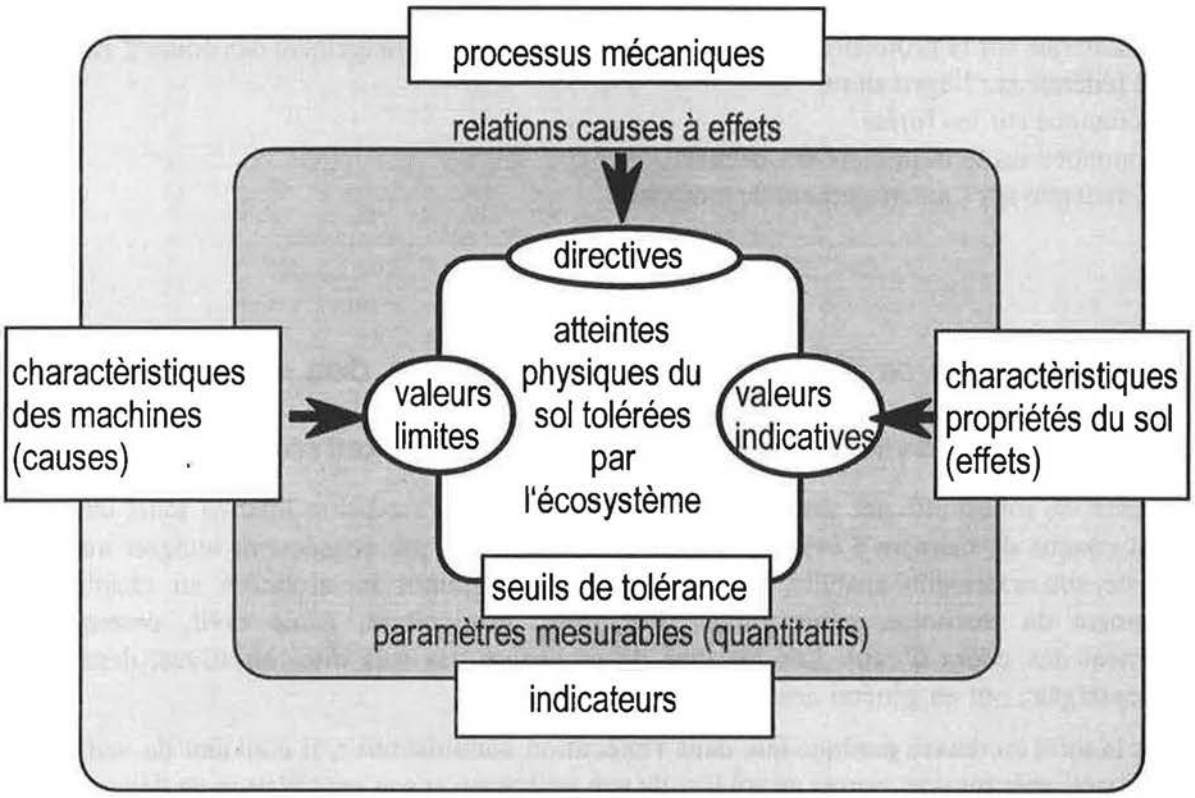


Fig. 4 Principe de la mise en œuvre de la protection physique des sols

Par ailleurs, ces critères sont destinés à fournir aux autorités des outils pour la surveillance de la qualité des sols et l'attribution des responsabilités en cas d'atteintes à l'écosystème, selon le principe „qui casse paie" (principe pollueur/payeur) préconisé par la LPE.

Dans la mise en œuvre, il est déjà possible de définir et d'assigner des modes d'utilisation et d'exploitation respectant le sol sur la base d'une description qualitative des relations entre la sollicitation du sol et sa réaction. En cas de litiges, l'application du principe „qui casse paie" appuyé sur des preuves chiffrées s'avère cependant beaucoup plus efficace.

Dans ce contexte, la principale question repose sur la mesure des indicateurs. Pour les **valeurs indicatives**, le travail de mesure devrait tenir compte de la dynamique du paramètre en question. Les paramètres qui varient peu, tels que la texture du sol et la succession des couches pédologiques, tributaires du site, peuvent être mesurés de manière précise mais coûteuse. Ils peuvent ensuite servir de relevés pour des cartes de „vulnérabilité des sols". Les paramètres très variables, tels que l'humidité et la structure du sol, doivent en revanche pouvoir être estimés aisément par l'agriculteur, le sylviculteur ou le maître d'œuvre lui-même. On utilisera là, dans la mesure du possible, des indicateurs simples comme la profondeur des ornières, la plasticité du sol, la résistance à la pénétration (pénétrométrie) ou le potentiel hydrique (tensiométrie).

Les **directives** seront élaborées graduellement. On commencera par rédiger le plus rapidement possible, sur la base des connaissances et des expériences qualitatives, des instructions concernant les techniques de culture adaptées à la sensibilité des sols. Ces premières instructions seront ensuite complétées, notamment par des données quantitatives, au fil des nouvelles connaissances acquises. Tel est le procédé prévu par la LPE. Les directives ad hoc seront édictées par le Conseil fédéral et les offices fédéraux compétents (art. 33, al. 2, LPE; art. 6, al. 6, OSol).

Toute une série d'**acteurs**, à divers niveaux, participent à la mise en œuvre de la protection physique des sols:

- **politiciens**
- **divers groupes et syndicats d'intérêts** (ONG)
- **écoles:**
  - universités et hautes écoles spécialisées (ETHZ et EPFL, UNI, ETS, HES)
  - écoles d'agriculture, de sylviculture ou de génie civil
  - écoles supérieures, écoles primaires

- **stations de recherche** (FAL, FAT, RAC, FAW, FAM, RAP, FNP, IFAEPE)
- **autorités**
  - à l'échelon fédéral (OFEFP, OFAG, OFEE, OFAT, OFEN)
  - à l'échelon cantonal (services cantonaux de la protection des sols, de l'agriculture, de l'aménagement du territoire et de la protection de l'environnement)
  - à l'échelon communal (notamment les responsables des questions de droit de la construction et de droit foncier)

- **praticiens:**
  - agriculteurs
  - sylviculteurs
  - ouvriers de la construction, contremaîtres
  - maîtres d'œuvre, planificateurs.

3.2 Instruments pour la mise en œuvre des nouvelles prescriptions

L'approche suivante est destinée à faciliter la mise en œuvre de la protection physique des sols:

3.2.1 Informer et motiver

Cette tâche incombe aux écoles et hautes écoles spécialisées d'agriculture, de sylviculture et de génie civil, ainsi qu'aux politiciens et aux organisations écologiques (ONG). Elle comporte trois axes:

- **Connaissances de base**: Il s'agit d'élargir et d'approfondir les bases scientifiques sur les relations de causes à effets entre les atteintes portées au sol et les conséquences pour sa fertilité et l'environnement. Sur ces nouvelles bases ensuite, des règles pratiques seront élaborées sur la manière de travailler le sol avec ménagement au niveau de l'exploitation et au niveau du chantier.
- **Motivation**: Il s'agit de faire connaître la valeur d'un écosystème sol jugé intact et l'importance de sa protection tout en stimulant le sens des responsabilités à son égard.

- **Formation**: La formation pratique d'agriculteurs et de sylviculteurs ne doit pas négliger l'importance de la rotation des cultures et d'une exploitation adaptées aux conditions locales. De même, il est indispensable d'instruire les personnes chargées de planifier l'emploi des machines en terrain cultivable, afin qu'elles soient en mesure d'assumer leurs responsabilités. Il convient de mettre sur pied des cours assortis d'exercices sur le terrain, et de réunir les ouvrages-clés sur ce thème permettant aux intéressés d'acquérir par eux-mêmes les connaissances nécessaires. La remise de certificats pourrait clore les cours.

Fig. 5 Chaque année, la FNP organise des cours pour les contre-maîtres et les responsables des véhicules en sylviculture ayant pour thème l'usage approprié des machines forestières. Les participants y apprennent à apprécier le compactage des sols des forêts causé par les machines.

3.2.2 Paramètres d'évaluation, de mesure et de contrôle

Les paramètres d'évaluation, de mesure et de contrôle sont destinés, d'une part, à fournir des indications concrètes sur la vulnérabilité momentanée d'un sol, et sur les impacts probables causés par un mode d'exploitation, et, d'autre part, à permettre aux autorités de contrôler l'adéquation des systèmes d'exploitation en matière de protection physique des sols. Ces paramètres prendront en considération les aspects suivants:

- **Données liées au site**: à titre de base de planification pour l'exploitation et les projets de construction, il faut dresser une carte des risques de compactage. On prendra pour premier critère la contrainte de préconsolidation, qui peut être établie à partir de la courbe de tassement d'un sol.
- **Valeurs indicatives physiques**: Du côté des effets, il convient de recenser - pour le contrôle des résultats - les indices typiques visant la qualité d'un sol. Les paramètres de sensibilité spécifique au site sont ici notamment le pourcentage de macropores, la contrainte de préconsolidation et la perméabilité à l'air d'un sol ressuyé (prise à sa capacité au champ). Les bases de données nécessaires à la fixation d'indicateurs font encore défaut, à l'exception de

celle existant pour les macropores. Les principaux paramètres permettant de mesurer la vulnérabilité occasionnelle d'un sol sont en l'occurrence le taux d'humidité et la force de succion de l'eau.

Le danger n'apparaît pas seulement au moment où les valeurs indicatives sont dépassées mais dès que les paramètres caractéristiques du sol commencent à se dégrader. L'état momentané d'un sol doit de ce fait, faire l'objet de contrôle réguliers (monitoring). L'intervalle entre deux observations dépend de la vitesse d'évolution des paramètres caractéristiques du sol. Il oscille normalement entre 5 à 10 ans; en cas d'évolution négative, cet intervalle doit être fortement écourté. C'est là le seul moyen de réagir à temps.

- **Examen élargi du type de véhicules et de machines**: Du côté des causes, il s'agit de définir les valeurs limites d'un impact mécanique pour un sol de sensibilité donnée, et d'introduire, à titre de complément, un examen élargi du type d'engins agricoles et forestiers. On relèvera les indices de répartition des charges (variables suivant le réglage de la machine) et la dimension des pneumatiques, renseignant sur la pression des roues sur le sol et la surface foulée. Ces indices doivent prendre en considération non seulement les risques de compaction, mais aussi d'érosion. Enfin, il convient de délimiter le domaine d'utilisation des véhicules et des engins agricoles et forestiers.

  Sur la base de cette expertise, on élaborera des directives pour la construction de machines agricoles ménageant le sol. La charge à la roue, la pression des roues sur le sol et le nombre de passages nécessaire par opération pourraient faire figure ici de critères généraux.

  Une attention particulière doit être portée aux engins et machines dont on sait que, même correctement utilisés, ils risquent de provoquer des tassements intolérables du sol. L'usage de ces machines devrait être autorisé uniquement sur des sols dont la sensibilité spécifique au site ne dépasse pas une valeur limite précise. On pourrait faire de même pour des systèmes entiers de culture.

- **Auto-contrôle**: Afin d'encourager l'auto-contrôle par les responsables d'impacts physiques aux sols, il convient de développer des tests pratiques simples, pouvant être effectués sur le terrain, et définir des critères d'appréciation. Entrent ici en ligne de compte notamment l'usage de sondes, en combinaison avec des mesures de l'humidité du sol, ainsi que des critères basés sur la profondeur, la forme et la largeur des traces (bourrelets latéraux) laissées par les roues d'un engin.

3.2.3 Recommandations, directives, prescriptions et mesures d'incitation

Ces réglementations doivent être conçues et édictées par les autorités fédérales, cantonales et communales. Elles porteront sur les domaines suivants:

- **Détermination de l'aptitude d'un sol à une utilisation** donnée, compte tenu de la vulnérabilité du sol et de sa capacité de régénération. A l'échelon de l'aménagement du territoire déjà, le plan de zones doit s'appuyer non seulement sur les critères spécifiques au site, mais aussi sur la fertilité et la sensibilité du sol, c'est-à-dire sa faculté de régénération. Le ministère de l'environnement du Baden-Württemberg (1995), par exemple, a élaboré un guide visant en particulier à stopper la construction sur les terres cultivables (principe de préservation des espaces, cf. chap. 2.1).

  A l'intérieur d'une zone d'affectation donnée, le mode d'exploitation devrait être adapté à la vulnérabilité et la capacité de régénération du sol. Ce principe exige, en particulier dans la zone agricole une rotation des cultures qui ménage le sol. Cela signifie que tous les travaux nécessaires aux cultures projetées doivent être exécutés en temps voulu, avec les machines à

disposition, sans porter d'atteintes durables à l'écosystème (cf. chap. 2.3). A titre de base, il conviendrait d'établir des **cartes de sensibilité des sols**, pour l'ensemble des surfaces arables, sur le modèle des cartes des risques d'avalanches et d'autres dangers naturels (cf. Direction de la construction et de la protection de l'environnement du canton de Bâle-Campagne 1998).

- **Directives relatives à la pratique conforme aux règles de la profession**: il convient de réglementer au travers de directives l'exploitation du sol et la construction d'installations. Ces directives devront être approuvées par la Société Suisse de Pédologie (Schulin 1995). Des règles de „bonne pratique" s'avèrent nécessaires en particulier pour l'agriculture, la sylviculture, la construction de routes et de conduites souterraines. On peut prendre pour modèle, en l'occurrence, les directives relatives à la protection des sols dans la construction de conduites souterraines édictées en 1993 et révisées en 1995 par l'Office fédérale de l'énergie (OFEN) ou encore les feuilles de renseignement éditées par la société allemande „Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau" (DVWK) en 1995.
- **Incitations financières** pour l'exploitant: les exigences requises permettant de toucher l'allocation de compensations écologiques devrait tenir compte également du tassement. Pour cela, il faut tenir compte non seulement de l'état d'un sol et des cultures pratiquées mais encore des engins utilisés sur le terrain. L'adoption de techniques de culture prévenant l'érosion constitue aujourd'hui déjà une des conditions minimales pour qu'un système de culture se voie reconnaître la qualité de production intégrée (Office fédérale de l'agriculture 1996, art. 22b OPD). Il serait pertinent d'étendre ces exigences minimales à la protection des sols contre le compactage.

4. La protection physique des sols dans la pratique

Ce chapitre donne des exemples concrets d'atteintes physiques fréquentes en Suisse et leurs causes. Il présente en outre des mesures efficaces de prévention. Notre objectif est notamment d'indiquer concrètement aux acteurs désignés au chapitre 3 comment ils peuvent contribuer, dans la mesure de leurs possibilités et de leurs devoirs, à protéger le sol d'atteintes physiques. Nous aimerions signaler à ce propos l'ouvrage de Mosimann (1996), qui dresse un état exhaustif des risques de compactage des sols sur tout le territoire de la Suisse.

4.1 Atteintes mécaniques

4.1.1 Mise en remblai, brassage d'horizons, remise en état

La ***mise en remblai*** est l'apport de matériaux terreux à la surface d'un sol naturel ou déjà partiellement décapé, en vue de se débarrasser de matériel de déblai ou d'éliminer des obstacles d'origine topographique (dépressions de terrain) ou pédologique (engorgement) qui entravent l'exploitation. Pour qu'il y ait mise en remblai, il faut donc obligatoirement qu'il y ait eu au préalable l'opération inverse soit le décapage séparé de la couche supérieure du sol et du sous-sol.

Atteintes possibles: Un remblai (remodelage du terrain) est ou bien très meuble et peut s'avérer instable, ou alors tassé par les machines recouvrant le sol d'humus. Dans les deux cas, le remblai

ne possède pas de structure secondaire stable, formant un réseau continu de pores. Le passage d'engins sur la surface remblayée provoque souvent des dégâts de lissage et de pétrissage difficilement réparables, spécialement dans le sous-sol. En outre, une rupture de la continuité capillaire dans la zone tampon séparant deux horizons distincts, entrave la percolation hydrique.

Mesures préventives: L'origine de telles atteintes et les moyens de les prévenir seront abordés plus loin dans le contexte de la remise en état.

Par ***brassage d'horinzons***, on entend le mélange d'horizons et le nivellement de sols d'origine naturelle ou constitués artificiellement en vue d'éliminer des obstacles topographiques ou pédologiques gênant l'exploitation agricole ou forestière. Ces mesures peuvent favoriser l'échange gazeux et la mobilité des ions nutritifs dans la zone racinaire ainsi que faciliter le travail du sol.

Atteintes possibles: Le brassage modifie la succession naturelle des couches pédologiques, leur profondeur et leur uniformité. Le sol devient de ce fait instable, augmentant ainsi le risque de compactage. Le principal problème réside, à court terme, dans la destruction de la structure du sol, et, à long terme, dans la modification de ses propriétés chimiques, comme cela se produit par exemple lorsqu'un sol pauvre en carbonates est incorporé à un sous-sol riche en carbonates. Les causes de ces atteintes sont décelables principalement aux variations des critères morphologiques, tels que l'uniformité des propriétés d'un horizon donné, l'existence de limites distinctes entre deux horizons différents et la succession des horizons caractéristiques du site ou de leurs propriétés. Il n'existe malheureusement guère de paramètres mesurables évidents, mais seulement des indices probables: changement brusque de la texture, de la pierrosité, de l'adsorption et du pH dans un petit espace ou volume, peu représentatif d'un horizon donné; ou encore des propriétés du sol non caractéristiques du site quant à la teneur en matières organiques, l'alcalinité, la texture, la pierrosité, etc.

Causes: Pour l'exploitation agricole, les travaux du sol comprenant le labour profond, l'ameublissement en profondeur (le sous-solage) à l'aide de bêcheuses spéciales ou de scarificateurs, sur des sols „naturels" non remaniés, contribuent à brasser le sol. L'incorporation de matériel terreux étranger (provenant d'excavation, de déblai, etc.) dans un sol insuffisamment ressuyé constitue une autre source fréquente d'atteintes. Dans les travaux de construction, ce sont surtout les remodelages de terrains à l'aide d'excavatrices ou le remblayage et l'incorporation de matériaux terreux d'excavations, qui sont à l'origine d'un brassage.

Dans certains cas, le brassage du sol peut être voulu. Nous avons classé ci-après les modifications des sols selon leurs effets, des effets les plus bénins et souhaités (niveau 1) aux effets les plus indésirables (niveau 5).

1) Interventions agricoles effectuées sur de grandes surfaces à l'aide de bêcheuses ou de chisels, dépassant la profondeur de travail usuelle et ayant pour but d'ameublir occasionnellement le sol en profondeur pour „faire éclater" la semelle de labour située à la limite entre la couche cultivée et le sous-sol.

2) Petites corrections de terrain à l'intérieur de parcelles généralement bien cultivables, pour faciliter l'exploitation d'une partie du terrain très accidentée ou réduire le risque de compactage dans une petite dépression du terrain trop humide.

3) Ameublissement ou brassage du sol sur une vaste surface et à grande profondeur, à l'aide de bêcheuses spéciales, pour éliminer la stagnation de l'eau, le tassement en profondeur, ou, par

des labours profonds, pour ralentir la décomposition de la substance organique en incorporant du matériel minéral provenant d'une couche inférieure ou d'un autre site.

4) Comblement de fouilles de construction, effectué sans soins et par des méthodes inappropriées.

5) Remodelages de terrain sur une grande surface, destinés à modifier considérablement les conditions propres au site ou pour se débarrasser indûment de matériel d'excavation.

Mesures préventives: Le brassage ou l'homogénéisation peut être sciemment recherché dans l'exploitation agricole, dans le but, par exemple, d'étendre la zone racinaire ou la couche biologiquement active, ou encore d'incorporer du matériel organique ou terreux possédant les propriétés souhaitées. Il est possible en l'occurrence d'éviter les dommages en observant les règles suivantes:

- fixer des objectifs clairs (conceptions précises des propriétés d'un site avant et après les interventions) et s'assurer que les améliorations réalisables justifient l'intervention (c'est-à-dire facilitent une exploitation adaptée au site et donc moins risquée sans exiger des mesures d'assainissement permanentes)
- planifier la réalisation de la construction ou de l'intervention en parfaite adéquation avec le site et avoir un plan clair de remise en culture (établir quels sont les travaux indispensables, leur déroulement, le choix du matériel, la profondeur de travail, l'emploi des machines)
- exécuter les travaux dans les règles de „la bonne pratique" agricole, à savoir
  a) respecter un ressuyage minimal du sol en fonction du type de machine utilisé
  b) utiliser uniquement des machines appropriées (aussi légères que possible, mode de travail ménageant le sol)
  c) réaliser la remise en culture selon des méthodes qui ménagent le sol, qui favorisent sa restructuration et lui en laissent le temps (ensemencement immédiat ou rotation appropriée de cultures extensives, sans fortes sollicitations mécaniques du sol)
- prendre l'engagement, si possible par écrit, de respecter les critères de qualité ou d'utiliser des méthodes de travail appropriées

On entend par ***remise en état*** l'ensemble des mesures prises en vue de reconstituer techniquement un sol déplacé ou décapé de manière à permettre sa réaffectation à un usage déterminé. La reconstitution de surfaces cultivables est extrêmement importante pour l'agriculture et la sylviculture ainsi que la protection de l'environnement, car les surfaces construites ne cessant d'augmenter, les espaces propres à ce genre d'usages diminuent comme peau de chagrin. En Suisse, les surfaces bâties ont passé de 168'665 ha en 1986 à 213'421 ha en 1996, soit une progression d'environ 25 % (Office fédéral de la statistique, 1986 et 1996). Dans la sylviculture, on emploie usuellement les termes de „reboisement" ou de „reforestation" pour désigner la restauration d'un site, tandis que dans la protection de la nature on parle plutôt de „renaturation" ou de „revitalisation".

Atteintes possibles: Contrairement aux sols d'origine naturelle, la structure et les propriétés des sols artificiels ne sont pas le fruit de la pédogénèse. Une remise en état est une intervention technique à court terme, qui ne saurait égaler le lent processus de formation du sol modelé au fil des siècles sous l'effet conjugué de la force de gravité, de l'eau, du vent, de la végétation ainsi que des micro-organismes et de la pédofaune qui lui sont associés.

Après une remise en état, l'épaisseur du sous-sol et la couche humifère présentent généralement partout la même épaisseur, quel que soit le relief du terrain. Comme le matériel terreux est apporté

par camions entiers des endroits les plus divers, les sols artificiels peuvent présenter une composition de matériaux terreux et donc du régime hydrique et de l'air des plus hétérogènes (Schafer 1988). D'où l'impossibilité, par cartographie, d'extrapoler des données ponctuelles au niveau de la parcelle à l'aide de paramètres géologiques ou géomorphologiques. L'hétérogénéité s'explique aussi par le fait que, dans un sol fraîchement déposé, la structure du sol est souvent encore insuffisamment développée: des zones fortement homogénéisées voisinent avec des mottes grossières, des pierres ou des espaces vides. Le remblayage peut aussi provoquer, inversement, une homogénéisation de la structure du sol sur tout son profil, homogénéisation qui ne disparaîtra que lentement au fur et mesure de sa régénération (Friedli 1997).

Après sa remise en état, le sol met très longtemps à retrouver sa porosité. En outre, la surface des matériaux de comblement forme généralement une couche imperméable. L'eau d'infiltration ne peut s'écouler en profondeur et doit donc être évacuée latéralement. De fait, l'engorgement constitue le problème numéro un dont se plaignent les exploitants de sols reconstitués. De surcroît, ces sols présentent souvent une forte pierrosité (beaucoup de cailloux, dont certains de grandes dimensions).

Fig. 6 Remise en état d'un site exploité par une cimenterie à Rekingen (AG)

Causes: Les différentes opérations d'une remise en état voient leurs effets spécifiques se superposer, voire s'entremêler. Il est donc très difficile de déterminer, après coup, les causes effectives d'un engorgement. Si l'humidité persiste dans la zone de surface des matériaux de comblement, dans le sous-sol et dans la zone tampon entre le sous-sol et la couche supérieure, elle peut être attribuée à des fautes commises durant la reconstitution: parcelles trop longues sans drainage, surface de comblement irrégulière ou compactage du sous-sol lors de la mise en place de l'horizon supérieure. En revanche, les compactions de la surface du sol sont imputables le plus souvent aux exploitants. De fortes compactions ponctuelles sont provoquées par la mise en place de matériel terreux détrempé ou par une sollicitation mécanique trop intensive, comme en bout de parcelle, là

où le tracteur fait demi-tour ou à l'endroit de la parcelle où les véhicules agricoles et les engins employés pour la remise en état entrent et sortent.

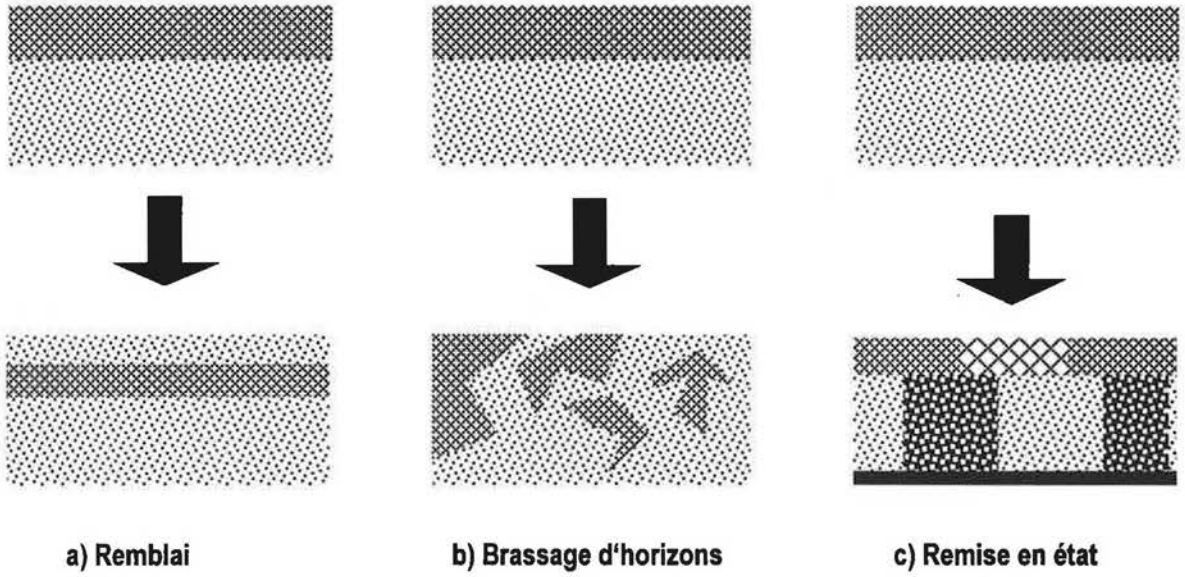


Fig. 7 ***Remblai, brassage d'horizons, remise en état*** *Il s'agit là d'interventions techniques touchant au profil du sol. L'épaisseur et la succession des horizons y sont perturbées. La remise en état d'un sol décapé va souvent de pair avec un mélange de matériaux terreux d'origine différente. Toutes les trois interventions causent un ameublissement outrancier du sol augmentant sa vulnérabilité au compactage.*

Mesures préventives: Il existe en Suisse de nombreuses directives et feuilles d'instructions traitant de la remise en état du sol agricole, publiées notamment par la SSP, les stations de recherche, les cantons, l'OFEFP et d'autres groupes intéressés. Ces directives sont complétées et remises à jour régulièrement[5].

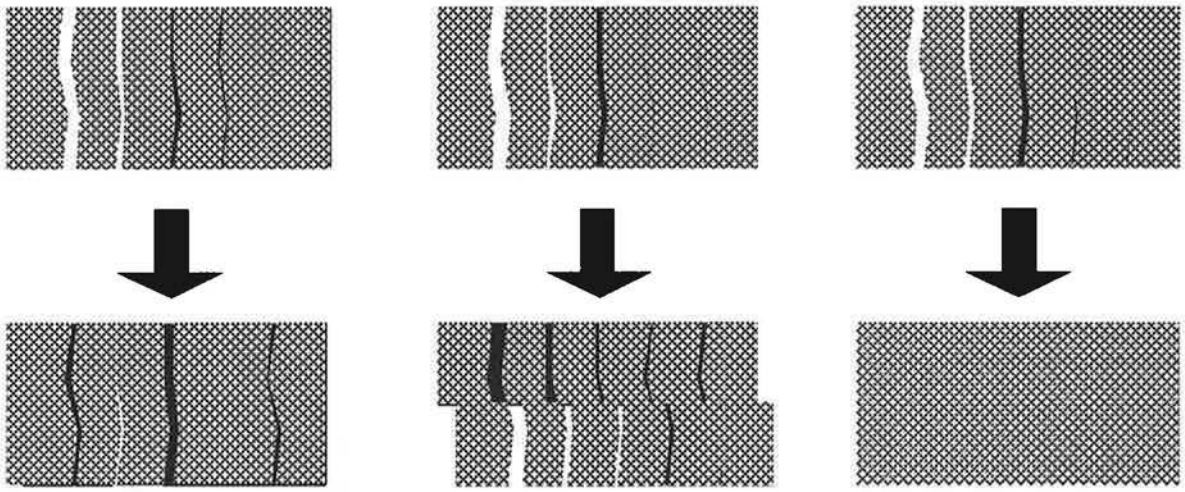
Les points ci-après sont déterminants pour le succès d'une remise en état :

---

[5] Bodenkundliche Gesellschaft der Schweiz BGS/SSP und Baudepartement des Kantons Aargau, 1984: Kiesabbau und Landwirtschaft (am Beispiel des Kantons Aargau). BGS Dokument 1. Juris Druck und Verlag. Zürich
Communiqué Osol No. 4, 1993: Réutilisation des matériaux terreux. Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage OFEFP et Station fédéral de recherches en chimie agricole et sur l'hygiène de l'environnement FAC, Liebefeld. (en révision)
Direktion der öffentlichen Bauten und Direktion der Volkswirtschaft des Kantons Zürich, 1991: Richtlinien für die Durchführung von Rekultivierungen (von Auffüllungen, Geländeveränderungen, Deponien, Kiesgruben, Ablagerungen, Installationsplätzen, Baupisten). Zürich
Eidg. Forschungsanstalt für landwirtschaftlichen Pflanzenbau FAL (ehem. FAP) Reckenholz und Schweiz. Fachverband für Sand und Kies FSK (Hrsg.), 1987: Kulturland und Kiesabbau. Richtlinien zur Rückführung von Abbaugebieten in die Landwirtschaft. Zürich-Reckenholz und Bern
Ministère de l'environnement Baden-Württemberg, 1991: Erhaltung fruchtbaren und kulturfähigen Bodens bei Flächeninanspruchnahmen. Luft-Boden-Abfall, Heft 10
OTD O sur le traitement des déchets du 10 décembre 1990, RS 814.600
Salm Ch.,1996: Protection des sols et génie civil. Office fédéral de l'environnement, des forêts et paysage OFEFP. Berne.

- Mise en place d'un sous-sol et d'une couche supérieure meuble par temps sec. Pour favoriser la stabilisation des couches du sol, il est recommandé de procéder à un ensemencement intermédiaire pendant une année au moins ou jusqu'à ce qu'une population suffisante de vers de terre se soit installée.
- A la mise en place de la couche humifère, ne circuler sur le sous-sol qu'avec des engins légers, ou, mieux encore, éviter de passer sur le sous-sol avec des engins. Ce qui est parfaitement faisable, par exemple en étendant l'humus à partir de pistes de sable ou de la surface du comblement.

4.1.2 Tassement par affaissement, cisaillement, pétrissage et homogénéisation



a) Tassement par affaissement **b) Cisaillement** **c) Pétrissage**

Fig. 8 ***a) Tassement par affaissement :*** *Tassement par affaissement: Le tassement par affaissement implique une perte de pores grossiers accompagnée d'une réduction du volume total des pores et éventuellement d'une augmentation du taux de pores moyens et fins.*
b) Cisaillement : *Les contraintes de cisaillement n'entraînent pas dans tous les cas une augmentation de la densité du sol. Elles provoquent une rupture du réseaux des pores et de ce fait une réduction de sa conductivité.*
c) Pétrissage: *Le pétrissage détruit la structure secondaire du sol. Le passage d'un sol agrégé à un sol ayant une structure compacte ou particulaire (structure primaire) représente une homogénéisation de la structure du sol.*

Le tassement par affaissement résulte de l'action conjointe de deux contraintes (l'une normale, l'autre de cisaillement) suffisamment élevées pour que le sol cède sous les roues ou les chenilles du véhicule agricole, forestier ou de chantier (Diserens et Bucher 1997). En cas de cisaillements, les particules du sol sont déplacées les unes contre les autres (rupture profonde). Le „pétrissage", et en particulier „l'homogénéisation" peuvent transformer radicalement la structure d'un sol. Ils n'ont

d'ailleurs pas toujours pour effet de la comprimer mais peuvent aussi, dans des cas extrêmes, créer de nouveaux interstices.

Les atteintes dues au cisaillement et au lissage peuvent prendre des formes très différentes selon la nature et l'intensité des pressions subies.

- Cisaillement: zones de rupture du sol allant de pair avec une perturbation (év. un accroissement) de la conductivité et une modification (év. une augmentation) du volume des pores entre les différentes zones du sol, qui peuvent être compactées à proximité (à une distance allant de quelques µm au cm) de la rupture et ne présenter en revanche que peu ou pas d'atteintes dans les parties plus éloignées (à une distance de l'ordre du cm ou plus).
- Lissage: zones ponctuelles fortement compactées allant de pair avec une forte diminution de la porosité et de la conductivité du sol. Selon l'action de la pression (force et direction de la tension) et l'état momentané d'un sol (résistance au cisaillement ou humidité du sol), le lissage peut aussi avoir pour effet de créer des nouveaux interstices, qui présentent cependant le défaut d'être rarement reliés entre eux. A l'échelon de la couche pédologique, la conductivité reste diminuée.
- Homogénéisation: destruction des structures différenciées du sol, passage d'une structure compacte à une structure particulaire (structure primaire), souvent liées à un tassement et à une réduction de la perméabilité à l'eau et à l'air.

Fig. 9 *Le compactage du sol dans les ornières laissées par les roues d'un engin se manifeste souvent par une capacité d'infiltration réduite à cet endroit.*

Dans certaines circonstances, plusieurs phénomènes peuvent coexister: à l'échelon d'une couche pédologique, la conductivité peut se trouver augmentée grâce à l'apparition de macropores dans la zone de cisaillement et de fentes de retrait, alors que les zones intermédiaires du sol (grumeaux grossiers, blocs) restent comprimées et sont de ce fait que peu perméables.

Causes: En général, les tassements par affaissement sont dus à l'emploi d'engins agricoles et forestiers ou de machines de chantier lourdes (passage sur le sol, travail du sol), sur un sol qui ne

possède pas une portance suffisante (contrainte de préconsolidation, résistance au cisaillement). A cet égard, il faut distinguer entre deux éléments: les propriétés de stabilité de la „charpente" d'un sol déterminées par sa constitution et les variations à court terme de la portance selon les conditions climatiques et le régime hydrique régional.

Le type et l'état du sol ne sont-ils pas considérés lors du choix des méthodes d'exploitation ou lors de l'emploi de machines ou de véhicules, les risques susceptibles alors de porter préjudice au sol sont considérables. Lorsqu'il y a négligence, celle-ci s'explique, d'une part, par le fait que les responsables des travaux ne disposent pas de méthodes appropriées pour apprécier la portance du sol ou les ignorent. D'autre part, ils sont tributaires de contraintes économiques pouvant faire obstacle à l'emploi d'outils, de machines, de techniques appropriées, protégeant le sol.

Le passage sur un sol instable (généralement trop humide) de véhicules agricoles, forestiers ou de machines de chantier avec des charges par essieu ou des pressions au sol trop élevées provoquent également des dégâts de cisaillement et de lissage. Les atteintes sont aggravées en sol ameubli, „plastique", ou lors de sollicitations intensives, en présence d'impacts dynamiques (par exemple de vibrations). De même pour le travail du sol et la préparation du lit de semence, un réglage mal approprié des machines (vitesse de rotation trop élevée des outils, vitesse trop lente d'avancement) porte nuisance au sol (structure „pulvérisée", „lissée").

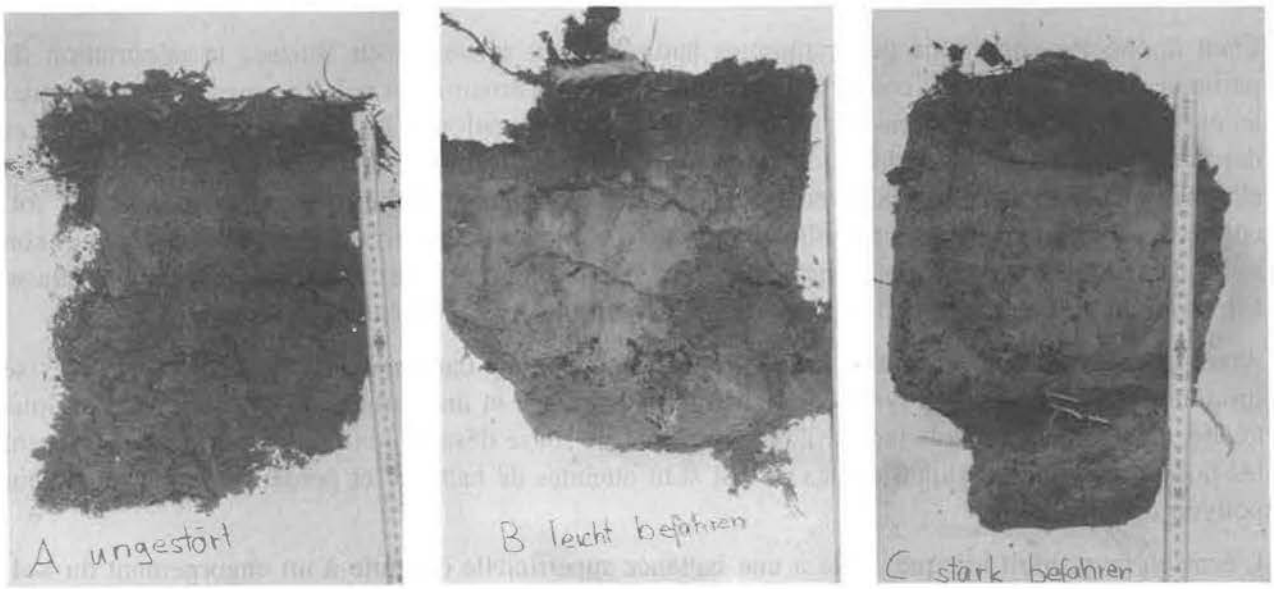


Fig. 10 Cette série de photos a été prise dans une forêt située près de Rüdlingen. On creusa trois trous situés à une distance de 60 m au maximum dans le sol ayant subis des impacts différents (nombre de passages avec une machine) et on y apprécia le compactage subi à l'aide de la structure et de signes indiquant la qualité de l'aération du sol.
a) Sol non sollicité: structure naturelle (meuble) de la terre fine
b) Sollicitation légère: tassement léger (structure visiblement perturbée)
c) Sollicitation forte: clairs signes de compactage et d'engorgement (teinte gris-bleu jusqu'à une profondeur de 15 cm)

Mesures préventives: La protection des sols contre le tassement est tributaire de l'action volontaire des personnes impliquées dans le travail du sol; l'imposition de mesures restrictives par les autorités n'exerce qu'une action préventive dans les cas les plus graves. Il est en effet très difficile de contrôler directement si les exploitants respectent les seuils de résistance en matière d'humidité du sol; ces contrôles pouvant tout au plus être effectués sporadiquement et par sondage. Or, les moyens nécessaires, regroupant paramètres adéquats et critères d'appréciation (tenant compte de la variabilité naturelle des sols dans le temps et l'espace) font hélas encore défaut.

Les dommages portés au sol ne peuvent jamais être totalement „réparés"; il faut par conséquent concentrer les efforts sur l'action préventive. Les principes directeurs de la protection des sols sont dès lors au nombre de trois (voir aussi chap. 3.1).

a) Formation, formation continue, information.
b) Auto-responsabilité: motivation, compétence professionnelle et contrôle autonome des résultats.
c) Prévention: adapter les machines à l'état du sol, choisir le moment opportun pour intervenir sur le champ. Pour les travaux du sol, établir une liste des interventions nécessaires (profondeur de travail et degré d'ameublissement nécessaire), puis adapter en conséquence les outils, leur réglage et la vitesse de travail. Il n'est pas toujours nécessaire de traiter toute la parcelle, dans le meilleur des cas un semis direct (sans labour) suffit.

4.1.3 L'érosion

Etant donné les conditions géographiques naturelles qui prévalent en Suisse, la déportation de particules de terre par l'eau constitue le principal facteur d'érosion du sol. Il convient de distinguer ici entre deux types de dommages: les phénomènes de déportation et les phénomènes de dépôt. Les dommages causés par les déportations peuvent prendre des formes très diverses. Cette diversité est elle-même conditionnée par la diversité des facteurs d'influence: pluie, nature du sol, état du sol, couverture végétale, structure parcellaire et mode d'exploitation du terrain, ainsi que sa pente et son relief. Les atteintes ne peuvent donc, en règle générale, être imputées à une seule et unique cause. Elles varient tant en fonction du site que dans le temps au gré des fluctuations climatiques.

Atteintes possibles et leurs causes: Le phénomène de battance sur des surfaces entières se produit surtout sur des sols ayant une structure peu agrégée et une faible couverture végétale. Sous le choc des gouttes de pluie (splash), les grumeaux du sol se désagrègent; leurs fragments obstruent les pores, les couches superficielles du sol sont atteintes de battance et perdent une partie de leur pouvoir d'infiltration.

L'érosion se produit lorsque, suite à une battance superficielle ou suite à un engorgement du sol, l'eau de pluie ne parvient plus à s'infiltrer et s'écoule en nappe mince sur la surface du terrain en y pénétrant à peine. Au cours de ce processus, les particules de terre ameublies par le choc des gouttes de pluie sont déportées; les semis et les plantes peuvent également être emportées.

Plus le terrain est pentu ou plus l'écoulement des eaux en surface se concentre dans les traces creusées dans le terrain par le travail du sol (ornières laissées par les roues du tracteur, lignes de semis), plus l'écoulement superficiel devient irrégulier, formant alors de petites rigoles linéaires. Sur de grandes parcelles, ces rigoles isolées peuvent se réunir en réseaux et entraîner finalement des masses considérables de terre. Dans les rigoles situées à mi-hauteur ou au bas des pentes où l'eau s'accumule, les réseaux de rigoles peuvent se transformer en ravines profondes (thalwegs). Ce

phénomène, appelé érosion des thalwegs, non seulement provoque la perte d'importantes masses de terre mais encore les emporte sur de longues distances.

Lorsque la force de traction de l'eau diminue, le matériel terreux charrié est déposé et forme de différentes configurations de dépôts. C'est le cas lorsque l'inclinaison de la pente ou l'intensité des précipitations diminue, ou que la résistance de la surface à l'écoulement superficiel augmente. Les sédiments recouvrent l'horizon humifère à la surface du sol; ils peuvent aussi ensevelir les semis et les plantes. Plus le phénomène d'érosion prend des proportions importantes et s'accompagne de processus de déportations linéaires, plus le danger est grand que le matériel terreux charrié soit transporté au-delà de la parcelle jusque sur les chemins, dans les fossés de drainage, sur les routes ou dans les cours d'eau avoisinants. Ceci risque, d'une part, de provoquer l'ensablement des bassins de rétention ou des étangs et d'autre part, d'affecter la qualité des eaux par les engrais et les substances de traitement des plantes charriées avec le sol.

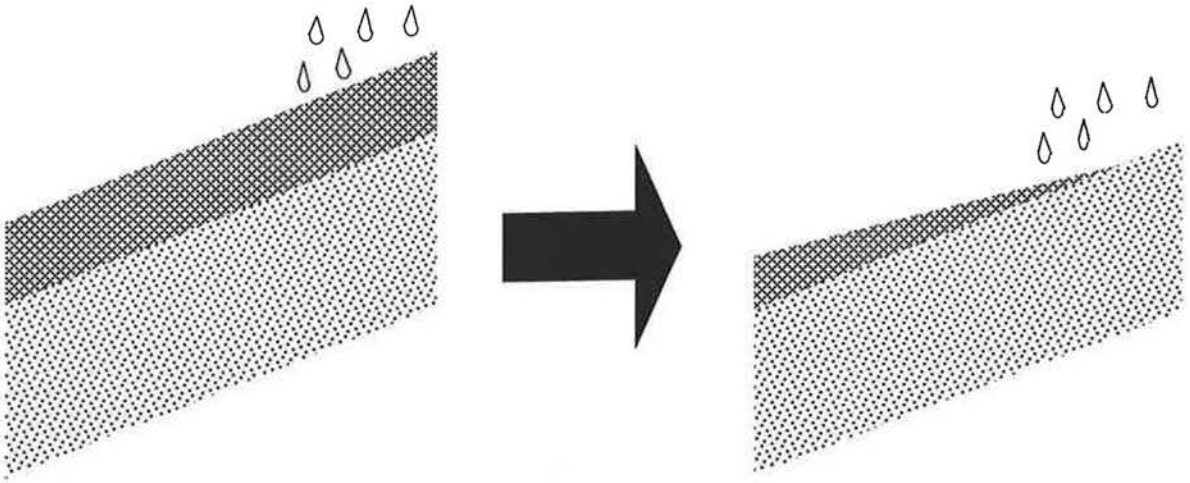


Fig. 11 ***Erosion****: En Suisse, l'érosion est causée principalement par la déportation de particules de terre par l'eau. L'érosion diffuse (en nappe) se produit sur des surfaces atteintes de battance. L'eau se concentrant dans les ornières ou les lignes de semis peut déclencher l'érosion en rigoles. Les rigoles peuvent se réunir en réseaux entiers et mener ainsi à l'érosion des thalwegs.*

Mesures préventives: La structure parcellaire, le mode d'exploitation, le couvert végétal et l'état du sol sont les facteurs d'influence (mentionnés plus haut) les plus tributaires de l'activité humaine. S'appuyant sur l'étude de Mosimann et al. (1991) - un ouvrage fondamental sur l'érosion en Suisse - le canton de Bâle-Campagne a effectué une enquête détaillée en matière d'érosion du sol dans le canton et exposé des stratégies pour prévenir de nouvelles atteintes (Direction de la construction et de la protection de l'environnement du canton de Bâle-Campagne 1994). Mosimann et Rüttimann (1996) fournissent par ailleurs aux praticiens des bases pour l'évaluation du danger d'érosion.

4.2 Atteintes au régime hydrique

4.2.1 Drainage

Nous nous intéresserons ici avant tout aux opérations techniques effectuées dans le passé pour assécher les zones marécageuses et les tourbières. Ces drainages visaient en premier lieu à permettre la mise en culture ou l'amélioration foncière des grands marais du Plateau suisse. Ils représentaient en tout cas de lourdes interventions dans le régime des eaux souterraines et des émissaires.

Atteintes possibles: L'assèchement de sols marécageux et tourbeux déclenche des affaissements du sol, des processus de retrait, la minéralisation de la tourbe et l'érosion. Ces phénomènes finissent par altérer les propriétés des sols touchés et, avec le temps, leur aptitude à l'exploitation agricole.

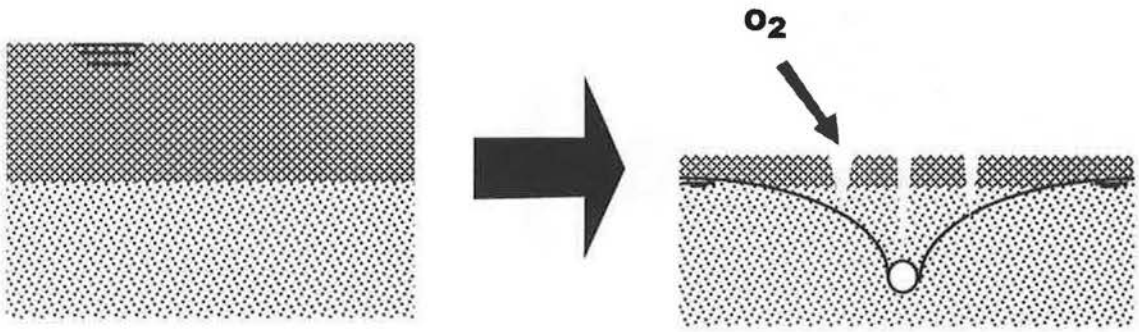


Fig. 12 ***Affaissement des tourbières****: L'apport d'oxygène dans des couches riches en matière organique accélère fortement sa décomposition. Ce phénomène se manifeste par un affaissement visible des sols de tourbière et représente une grave atteinte au sol, dont ce dernier ne peut plus se remettre de manière naturelle.*

Causes: L'affaissement entraîne une multitude d'effets néfastes, manifestés par une perte de volume et une compaction de la couche organique supérieure. Dans les couches aérées, la tourbe se minéralise; cette minéralisation provoque une nouvelle compaction de la substance tourbeuse, une modification de la distribution des pores et une baisse du volume total des pores. L'assèchement et le réhumectage périodiques de la couche supérieure riche en tourbe conduisent à de nouvelles dégradations de la structure et à une réduction de la capacité utile de rétention. Sous l'emprise de ces processus, les propriétés chimiques de la tourbe se modifient également; elle s'enrichit entre autres en composants peu dégradables. La libération de nitrates, de composés azotés gazeux, de dioxyde de carbone et l'accumulation de substances nocives organiques ou anorganiques constituent une source potentielle d'atteintes pour les eaux souterraines et pour l'air.

Le taux d'affaissement est particulièrement élevé dans les premières années qui suivent un assèchement et peut atteindre jusqu'à 30 mm par an en Suisse. Il devient ainsi nécessaire de réinstaller le système de drainage plus bas. L'abaissement répété du système de drainage enclenche le cercle vicieux: drainage - affaissement - décomposition de la tourbe - processus de retrait - abaissement de

la surface. Une fois que l'épaisseur de la couche supérieure, organique, tombe en-dessous d'un seuil critique, le substrat minéral est alors mélangé à la tourbe par le labour.

En asséchant les sols marécageux cultivés, leur aptitude agricole au cours des années s'affaiblit. Les sols, qui au départ étaient encore très perméables, deviennent humides, en présence d'eau de stagnation, puis atteignent la saturation (eau de rétention). La croissance des plantes est entravée, le travail du sol à l'aide de machines est rendu plus difficile en présence d'eau stagnante et sur un relief irrégulier. Les excès d'azote favorisent le développement des racines en surface (et non en profondeur), pouvant porter préjudice sur la qualité et la quantité des produits végétaux. Le laps de temps entre deux mesures récurrentes d'amélioration ne cesse de se raccourcir tandis que les conditions d'exploitation se détériorent, que les rendements et en particulier leur régularité diminuent et que les coûts des mesures d'amélioration augmentent. Une fois la tourbe complètement décomposée, l'utilisation des sols nouvellement formés dépend du sous-sol minéral alors en place et du régime hydrique. La formation de gley à anmoor est caractéristique des sous-sols argileux. La présence de substrats riches en carbonate (craie lacustre) laisse présager de sérieuses entraves quant à l'aptitude du sol à l'exploitation agricole.

Mesures préventives: Pour plusieurs raisons (la nécessité d'adopter des méthodes d'exploitation agricole extensive, la préservation de la diversité des espèces et des sites naturels, la sauvegarde des sols), l'exploitation de sols organiques est à proscrire. La mise en culture de sols marécageux n'est pas durable et les préjudices qu'elle inflige sont irréversibles. Les informations „archivées" jusque là par le sol disparaissent.

4.2.2 Irrigation

Dans les zones sèches, l'irrigation des sols peut provoquer leur salinisation. En Suisse, de telles atteintes (salinisation, dégradation de la structure, érosion) apparaissent tout au plus en Valais. De ce fait, l'eau d'irrigation ne devrait pas contenir plus de 1,5 g de sel par litre avec des teneurs en sodium réduites au minimum.

4.2.3 Régime des eaux dans les zones habitées

Atteintes possibles: L'eau de ruissellement en provenance des toits et des chaussées enrichie de particules (poussières, substances nocives) peut s'avérer néfaste lors de son infiltration dans le sol. Des préjudices touchant la fertilité du sol de nature chimique comme physique ne peuvent être écartés.

Causes: Dans les zones habitées, les surfaces permettant à l'eau de s'infiltrer sont généralement très réduites comparées aux surfaces exposées aux précipitations (toit ou surface imperméable). Il en résulte un écoulement excessif au niveau des émissaires, nécessitant une régulation des cours d'eau. L'évacuation des eaux des routes par les bas côtés entraîne de très fines particules (de poussière) dans le système poral du sol, tout en le polluant (substances nocives). Les particules de poussière s'accumulent dans les interstices du sol finissant par les obstruer. L'écoulement des eaux est perturbé (engorgement), la densité apparente du sol augmente, les symptômes indésirables du compactage apparaissent.

Mesures préventives: La Loi sur la protection des eaux (art. 7, al. 2, LEaux) exige que les „eaux non polluées" (eaux météoriques) soient évacuées par infiltration. Il convient de restreindre cette exigence en précisant que les eaux provenant des routes, comme celles des toits dans les zones à forte pollution atmosphérique, doivent être traitées comme des eaux „polluées" en raison de leur teneur élevée en poussières. Il est par conséquent interdit de les évacuer sans les traiter (Boller et Häfliger 1996, Office de la protection de l'environnement du canton de Soleure 1997).

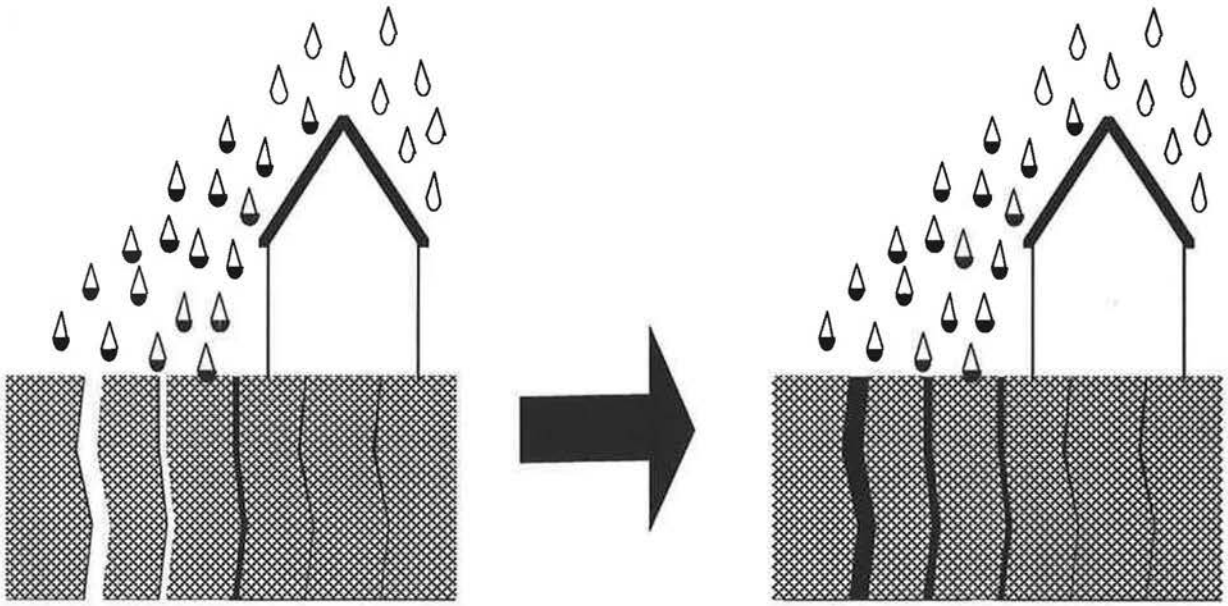


Fig. 13 ***L'évacuation des eaux météoriques par infiltration dans les zones habitées:*** *L'évacuation des eaux (météoriques) dites „non polluées" par infiltration directe dans les zones habitées peut causer une pollution chimique des sols suite à la concentration de substances nocives d'origine atmosphérique déposées sur les surfaces imperméables dans le relativement petit volume d'infiltration. En même temps, de fines particules de poussière sont entraînées dans le réseau des pores finissant par l'obstruer et ainsi de compacter le sol.*

Références bibliographiques

Baracchi C. und Stüber Th., 1997: Methoden zur Bestimmung der Verdichtungsempfindlichkeit von aggregierten Böden. Diplomarbeit ETHZ Abt. VIII, Institut für Kulturtechnik, Zürich, unveröffentlicht

Blume, H.-P. (ed.), 1992: Handbuch des Bodenschutzes. ecomed, Landsberg/Lech. 794 S.

Bodenkundliche Gesellschaft der Schweiz BGS/SSP und Baudepartement des Kantons Aargau, 1984: Kiesabbau und Landwirtschaft (am Beispiel des Kantons Aargau). BGS Dokument 1. Juris Druck und Verlag, Zürich

Boller M., M. Häfliger, 1996: Verbleib von Schwermetallen bei unterschiedlicher Meteorwasserentsorgung. Gas Wasser Abwasser (gwa) *1/96*: 3-15

Communiqué Osol No. 4, 1993: Réutilisation des matériaux terreux. Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage OFEFP et Station fédéral de recherches en chimie agricole et sur l'hygiène de l'environnement FAC, Liebefeld. (en révision)

Département de la construction du canton de Soleure, 1993a: Zonenvorschriften zur kantonalen Landwirtschafts- und Schutzzone Witi. Entwurf vom 23. Juni 1993

Département de la construction du canton de Soleure, 1993b: Erläuterungen zur kantonalen Landwirtschafts- und Schutzzone der Witi von Grenchen bis Solothurn.

Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e. V. (DVWK) (Hrsg.), 1995: Gefügestabilität ackerbaulich genutzter Mineralböden. Teil I: Mechanische Belastbarkeit. Merkblätter zur Wasserwirtschaft *234*. 11 S.

Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e. V. (DVWK) (Hrsg.), 1996: Gefügestabilität ackerbaulich genutzter Mineralböden. Teil II: Auflastabhängige Veränderung von bodenphysikalischen Kennwerten. Merkblätter zur Wasserwirtschaft (Entwurf Jan. 1996). 11 S.

Direction de la construction et de la protection de l'environnement du canton de Bâle-Campagne (ed.), 1994: Bodenerosion im Kanton Basel-Landschaft, Liestal, 31 S.

Direction de la construction et de la protection de l'environnement du canton de Bâle-Campagne (ed.), 1998: Empfindlichkeit der Baselbieter Böden gegenüber mechanischen Belastungen, Liestal, 31 S. und Anhang

Direktion der öffentlichen Bauten und Direktion der Volkswirtschaft des Kantons Zürich, 1991: Richtlinien für die Durchführung von Rekultivierungen (von Auffüllungen, Geländeveränderungen, Deponien, Kiesgruben, Ablagerungen, Installationsplätzen, Baupisten). Zürich, 10 S.

Diserens, E., F. Bucher, 1997: Bodenverdichtung aus der Sicht der Bodenmechanik. Agrarforschung *2/1997*: 83-86

Eidg. Forschungsanstalt für landwirtschaftlichen Pflanzenbau FAL (ehem. FAP) Reckenholz und Schweiz. Fachverband für Sand und Kies FSK (Hrsg.), 1987: Kulturland und Kiesabbau. Richtlinien zur Rückführung von Abbaugebieten in die Landwirtschaft. Zürich-Reckenholz und Bern

Friedli, B.,1997: Neue Methoden zur bodenökologischen Beurteilung rekultivierter Flächen. Einsatz von Erhebungstechniken aus den Bereichen Fernerkundung und Geophysik. Zusammenarbeit zwischen dem Institut für Kulturtechnik, ETH Zürich, und dem Kanton Aargau, unveröffentlicht

Häberli, R., C. Lüscher, B. Praplan Chastonay, Ch. Wyss, 1991: L'affair sol, pour une polotique raisonnée de l'utilisation du sol. Georg, Genève. 192p.

Håkansson, I., V. W. Medvedev, 1995: Protection of soils from mechanical overloading by establishing limits for stresses caused by heavy vehicles. Soil and Tillage Reserach *35* (1995): 85-97

Johnson, D. L., S. H. Ambrose, T. J. Bassett, M. L. Bowen, D. E. Crummey, J. S. Isaacson, D. N. Johnson, P. Lamb, M. Saul, A. E. Winter-Nelson, 1997: Meanings of Environmental Terms. J. Environ. Qual. 26:581-589 (1997)

Karlen, D. L., M. J. Mausbach, J. W. Doran, R. G. Cline, R. F. Harris, G. E. Schuman, 1997: Soil Quality: a Concept, Defintion, and Framework for Evaluation. Soil Sci. Soc. Am. J. 61:4-10 (1997)

Knoepfel, P., D. Achermann, W. Zimmermann, 1996: Bilanzstudie Bodenpolitik 1990 bis 1995. Inst. de hautes études en administration publique und WWF Schweiz. Chavannes-près-Renens und Zürich

Lal, R., 1994: Sustainable Land Use Systems and Soil Resilience. In: D. J. Greenland, I. Szabolcs (eds), 1994: Soil Resilience and Sustainable Land Use. CAB International, Wallingford: 41-67

Larson, W. E., F. J. Pierce, 1994: The Dynamics of Soil Quality as a Measure of Sustainable Management. In: J. W. Doran, D. C. Coleman, D. F. Bezdicek, B. A. Stewart (eds.) 1994: Defining Soil Quality for a Sustainable Environment. Soil Sci. Soc. of America Special Publ. *35*: 37-51

LAT LF sur l'aménagement du territoire du 22 juin 1979, RS 700

LEaux LF sur la protection des eaux du 24 janvier 1991, RS 814.20
LFo LF sur les forêts du 4 octobre 1991, RS 921.0
LPE LF sur la protection de l'environnement du 7 octobre 1983, RS 814.01, RO 1997 1155
LPN LF sur la protection de la nature et du paysage du 1er juillet 1966, RS 451
Ministère de l'environnement Baden-Württemberg (ed.), 1991: Erhaltung fruchtbaren und kulturfähigen Bodens bei Flächeninanspruchnahmen. Luft, Boden, Abfall *10* (1991)
Ministère de l'environnement Baden-Württemberg (ed.), 1995: Bewertung von Böden nach ihrer Leistungsfähigkeit. Luft, Boden, Abfall *31*(1995)
Mosimann, Th., A. Maillard, A. Musy, J.-A. Neyroud, M. Rüttimann, P. Weisskopf, 1991: Lutte contre l'érosion des sols cultivés. Programme Nacional de Recherche „Utilisation du Sol en Suisse". Liebefeld, Berne.
Mosimann, Th., M. Rüttimann, 1996: Abschätzung der Bodenersion und Beurteilung der Gefährdung der Bodenfruchtbarkeit. Grundlagen zum Schlüssel für Betriebsleiter und Berater. Amt f. Umweltschutz u. Energie, Bodenschutzfachstelle Baselland. Liestal. 40 S.
Mosimann, Th., 1996: Die Gefährdung der Böden in der Schweiz. WWF Schweiz. Zürich
Office de la protection de l'environnement du canton de Soleure, 1997: Neuer Umgang mit Meteorwasser. Richtlinie für die Versickerung von Regenabwasser im Liegenschaftsbereich. AfU-Bericht Nr. 38, Solothurn
Office fédéral de l'agriculture, 1996: Instructions sur les exigences minimales pour la reconnaissance des règles régissant la production intégrée dans le secteur de la culture des champs.
Office fédéral de l'énergie, 1997: Directives pour la protection des sols lors de la création de conduites souterraines de transport.
Office Federal de la Statistique 1986 et 1996: Annuaire statistique de la Suisse 1986 et 1996.
OPD Ordonnance du 7 décembre 1998 sur les paiements directs versés dans l'agriculture (Ordonnance sur les paiements directs,), RS 910.13
OSol Ordonnance sur les atteintes portées aux sols du 1 juillet 1998, RS 814.12
OTD O sur le traitement des déchets du 10 décembre 1990, RS 814.600
Salm Ch.,1996: Protection des sols et génie civil. Office fédéral de l'environnement, des forêts et paysage OFEFP. Berne.
Schafer, W. M. 1988: Implications of Spatial Variability to Postmine Management. In: L. R. Hossner (ed.) 1988: Reclamation of Surface-Mined Lands. Vol. II: 231-237. CRC Press, Inc. Boca Raton, Florida
Schulin, R., 1993: Physikalische Grundlagen zur Umschreibung des Begriffs der Bodenfruchtbarkeit. Landwirtschaft Schweiz, *6*: 115-120
Schulin, R., 1995: Physikalischer Bodenschutz und die Kluft zwischen Physik und Bodenschutz. Bull. Bodenkundl. Ges. Schweiz, Bd. *19*: 67-72
Stasch, D., K. Stahr, 1993: The Soil Potential Concept - A Method for the Fundamental Evaluation of Soils and Their Protection. In: H. J. P. Eijsackers and T. Hamers (eds.), Integrated Soil and Sediment Research: A Basis for Proper Protection: 107-109. Kluwer Academic Publishers, The Netherlands.
Szabolcs, I., 1994: The Concept of Soil Resilience. In: D. J. Greenland, I. Szabolcs (eds), 1994: Soil Resilience and Sustainable Land Use. CAB International, Wallingford: 33-39
Tobias, S., 1994: Aktuelle Fragen des Bodenschutzes in der Schweiz und die Konzepte zu dessen Realisierung. Z. f. Kulturtechnik und Landentwicklung *35* (1994): 74-80

Annexes

1 **Concept pour la définition de valeurs indicatives pour la lutte contre le compactage du sol**
2 **Concept pour la définition de valeurs indicatives pour la lutte contre l'érosion du sol**
3 **Définition du terme „sol" par la Société Suisse de Pédologie**
4 **Des articles de la LF sur la protection de l'environnement (LPE) et de l'Ordonnance sur les atteintes portées aux sols (OSol) importants pour la protection physique du sol**

Concept pour la définition de valeurs indicatives pour la lutte contre le compactage du sol

1. Buts des valeurs indicatives pour la lutte contre le compactage du sol[1]

Le concept pour la définition de valeurs indicatives pour la lutte contre le compactage du sol[1] est élaboré à la lumière de l'objectif général de la protection du sol: la sauvegarde durable (ou si nécessaire la reconstitution) de la multifonctionnalité du sol. Les biens à protéger sont en l'occurrence les fonctions du sol en tant que

- espace vital pour les organismes du sol (y compris réservoir de gènes);
- substrat vital pour la croissance des plantes (et des associations végétales) naturelles et cultivées;
- régulateur du régime de l'eau, de l'air et de la chaleur;
- agent de transformation pour la décomposition des substances organiques;
- filtre et tampon pour les substances nocives;
- agent d'informations („archive");
- support pour la construction d'installations et pour le passage de véhicules et de machines agricoles et forestières;
- réservoir de matières premières.

De même que les valeurs indicatives pour la lutte contre la pollution du sol par les substances chimiques ou contre l'érosion, les valeurs indicatives pour la lutte contre le compactage du sol sont destinées à la mise en pratique du principe de prévention. Elles doivent fournir notamment la base nécessaire d'une prévention durable des atteintes aux fonctions du sol comme espace vital, substrat pour la croissance des plantes et régulateur du régime de l'eau, de l'air et de la chaleur.

2. Valeurs indicatives ou valeurs limites?

Dans la législation Suisse sur la protection de l'environnement, les valeurs limites fixent la transition entre une situation légale et une situation illégale. En vertu du principe de prévention, ces limites devraient être définies de façon à pouvoir être atteintes (même de manière réitérée) sans causer d'atteintes à l'écosystème, mais elles ne devraient pas être dépassées. Les valeurs indicatives par contre permettent uniquement de présumer l'existence d'une situation légale ou illégale. Il s'ensuit une inversion de la charge de la preuve lorsqu'une valeur indicative est dépassée (ou éventuellement, selon sa définition, n'est pas atteinte). Pour la protection du sol, par exemple, cela veut dire que des atteintes inférieures aux valeurs indicatives laissent supposer un maintien durable de la fertilité du sol, et que des dépassements des valeurs indicatives autorisent au contraire à

---

[1] Par „compactage du sol" on entend toutes dégradations de la structure des sols (en particulier le tassement par affaissement, les efforts de cisaillement, le pétrissage et le lissage), qui entraînent des atteintes durables aux fonctions des sols dues à des modifications de la distribution des pores ou à la perturbation de la continuité du réseau poral. Ces phénomènes ne causent pas dans tous les cas une augmentation de la densité d'un sol (cf. chap. 4.1.2 du concept pour la mise en œuvre de la protection physique des sols).

présumer que la fertilité n'est plus garantie à long terme. En cas de litige, il n'incombe plus au plaignant de prouver l'existence d'une mise en danger de la fertilité du sol mais au responsable de l'atteinte de prouver le contraire, c'est-à-dire que la fertilité du sol est assurée à long terme malgré le dépassement de la valeur indicative. Dès qu'une valeur indicative est dépassée (ou le cas échéant n'est pas atteinte), les autorités compétentes ont le devoir d'observer le territoire touché, d'analyser les causes de l'atteinte et, s'appuyant sur la législation existante, de prendre des mesures pour prévenir une aggravation des dommages.

En cas de compactage, on peut distinguer du côté des causes l'utilisation du sol par l'homme, et du côté des effets l'écosystème sol avec ses fonctions spécifiques. Il faut commencer par définir, du côté des effets, des valeurs indicatives dont le dépassement ou la non-atteinte devront être considérés comme l'indice d'atteintes durables à la multifonctionnalité d'un sol, c'est-à-dire à sa faculté de remplir ses fonctions. Puis, à partir de là, il conviendra de fixer des valeurs limites concernant les nuisances admissibles du côté des causes (fig. 1).

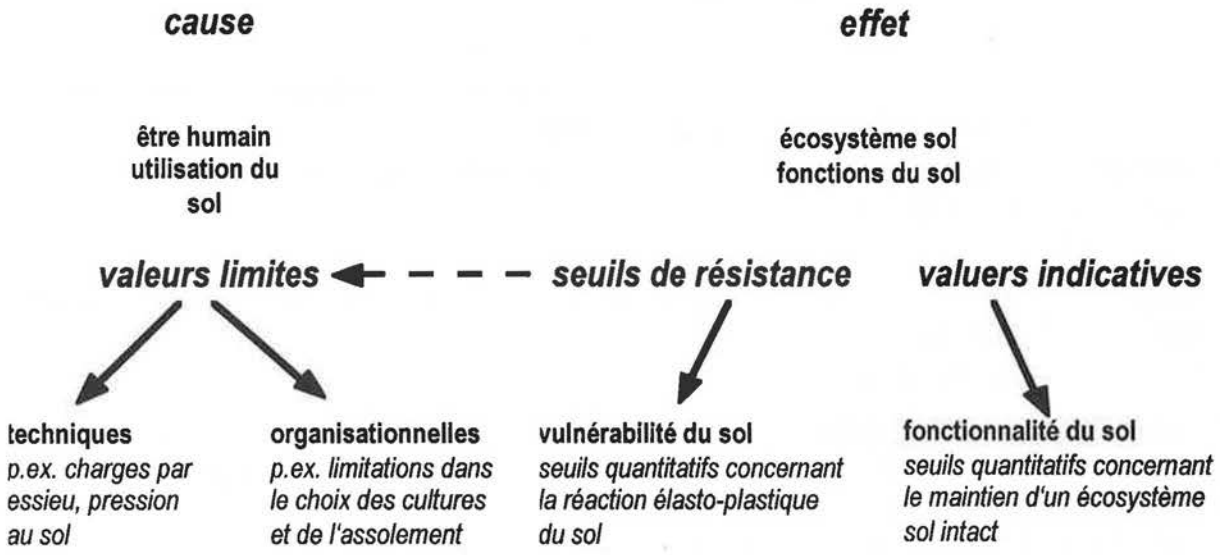


Fig. 1 Définition des valeurs limites et des valeurs indicatives pour la lutte contre le compactage du sol. Les valeurs limites doivent être fixées en fonction du seuil de résistance d'un sol.

Une particularité du compactage du sol réside dans le fait qu'une atteinte aux fonctions du sol dépend non seulement de la nature, de l'ampleur et de la durée d'un impact mécanique, mais encore, et tout autant, de l'état du sol au moment de sa sollicitation. La stabilité naturelle du sol, fonction de sa constitution et de son humidité, lui permet de résister à une contrainte. A partir du moment où cette stabilité propre est dépassée, des compactages dommageables se produisent. Le sol possède donc une certaine tolérance aux sollicitations mécaniques. Il s'agit en conséquence, du côté des effets, de déterminer les limites de cette tolérance en vue d'éviter les atteintes dues au compactage comme l'exige le principe de prévention. Les valeurs limites à fixer du côté des causes devront être définies pertinemment en fonction de ces seuils de résistance.

Analysons, à titre d'exemple, les relations de causes à effets qui aboutissent au compactage du sol dans la production végétale agricole (fig. 2). Le choix des cultures et de l'assolement détermine les

caractéristiques essentielles d'une culture, spécialement les moments du travail du sol et du passage des machines, comme aussi, dans bien des cas, la taille des machines nécessaires pour la récolte et le transport. Les outils et les moments des travaux dépendent dans le cas d'espèce de la technique de culture, tandis que la mécanisation de la récolte et son transport dépendent avant tout du choix de l'exploitant et des machines dont il dispose. Les outils et machines employées et leur intensité d'utilisation déterminent les paramètres de charge - poids par essieu, pression de contact des roues ou effets d'un mode de traitement - qui agissent sur le sol et lui portent atteinte sous forme de tensions normales, d'efforts de cisaillement et de vibrations.

Contre une atteinte, le sol mobilise sa stabilité (contrainte de préconsolidation et résistance au cisaillement). Les interactions réciproques des tensions mécaniques provoquent des déformations du sol. Ces déformations peuvent être de nature élastique, c'est-à-dire réversibles, lorsque les pressions normales sont inférieures à la contrainte de préconsolidation du sol et les efforts de cisaillement plus faibles que sa résistance au cisaillement. Dans le cas contraire, le sol subit des déformations plastiques, c'est-à-dire des transformations irréversibles de sa structure sous forme de tassements, de cisaillements, de pétrissage ou d'homogénéisation. Les déformations plastiques du sol suscitent des modifications de ses propriétés physiques (type et constitution de la structure, volume, dimension et continuité des pores). Ce qui finit par entraîner des perturbations des fonctions du sol, en particulier de ses fonctions d'espace vital, de substrat pour la croissance des plantes et de régulateur du régime de l'eau, de l'air et de la chaleur.

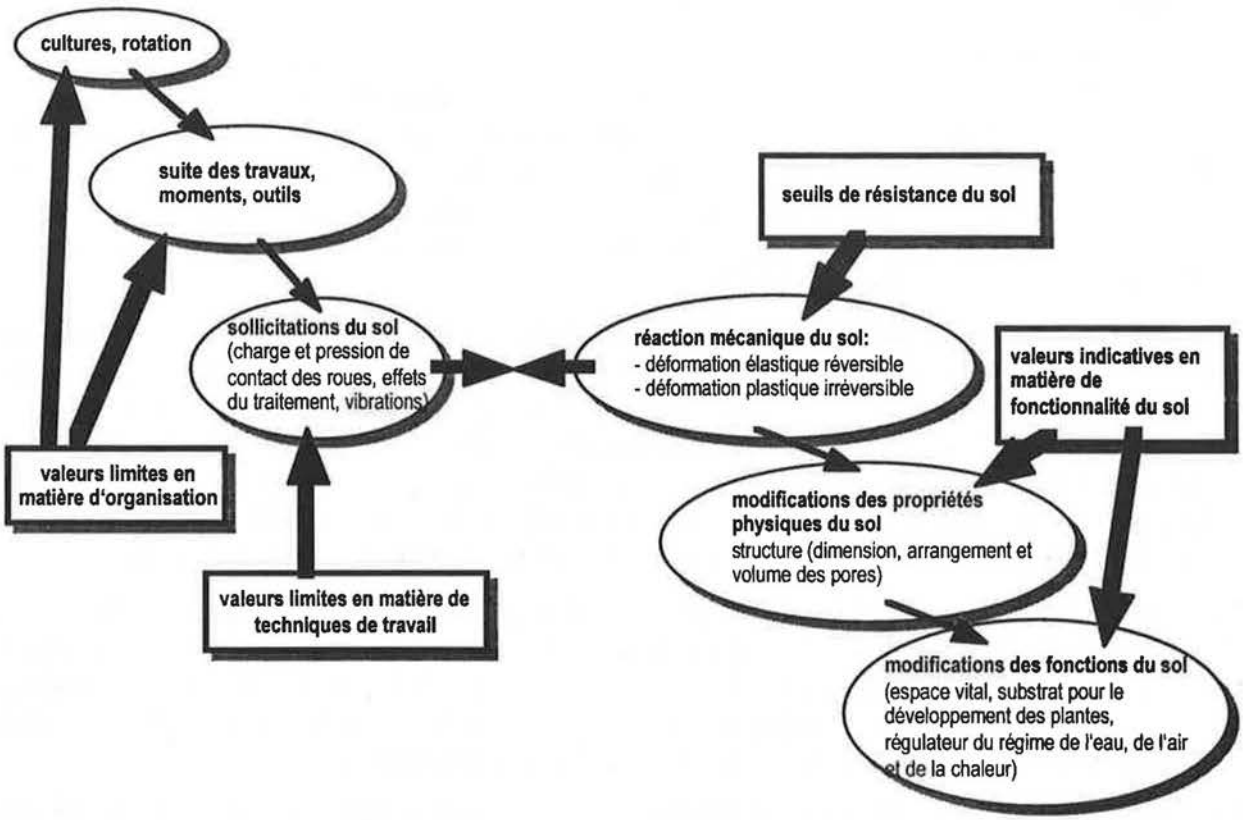


Fig. 2 Exemple des relations de causes à effets conduisant au compactage du sol

Du côté des effets, il s'agit de fixer les valeurs indicatives et les seuils de résistance. Les valeurs indicatives représentent les fonctions écologiques d'un sol et les seuils de résistance sa vulnérabilité aux sollicitations physiques et mécaniques. En d'autres termes, les valeurs indicatives définissent les exigences minimales, en ce qui concerne le compactage du sol, pour le maintien durable des fonctions du sol "espace vital", "substrat pour la croissance des plantes" et "régulateur du régime de l'eau, de l'air et de la chaleur". Les seuils de résistance se rapportent par contre à la fonction du sol comme support pour le passage d'engins. Les seuils de résistance ne doivent en aucun cas être dépassés si on veut éviter des atteintes durables aux fonctions du sol.

Du côté des causes, il faut définir les valeurs limites, par exemple pour l'exploitation agricole. Elles seront fixées en fonction des limites de résistance du sol et devraient représenter les nuisances maximales autorisées. Les valeurs limites en matière d'organisation du travail représentent des restrictions dans le choix des cultures ou de l'assolement, car ces facteurs conditionnent la suite des travaux nécessaires et leur calendrier en fonction des saisons et donc du taux d'humidité prévisible et de la stabilité d'un sol. Les valeurs limites relatives aux techniques de travail constituent des restrictions à la mécanisation dans des conditions déterminées, comme l'humidité du sol ou sa stabilité (par exemple: limitation de la charge par essieu ou des pressions de contact des roues selon les limites de tolérance du sol en question).

3. Emploi des valeurs indicatives et des seuils de résistance dans la lutte contre le compactage du sol

En ce qui concerne le compactage du sol, les valeurs limites et les seuils de résistance devraient servir de paramètres de contrôle pour la mise en œuvre d'une protection physique du sol conforme au principe de prévention. Ils sont destinés à fournir d'un côté aux praticiens de l'agriculture, de la sylviculture et de la construction, des instruments d'appréciation de l'état du sol et de l'adéquation écologique du mode d'utilisation. Mais ils doivent aussi fournir, d'un autre côté, aux autorités des outils de contrôle pour la surveillance de l'état du sol et des bases de décision pour l'établissement de prescriptions concernant son utilisation.

Les valeurs indicatives doivent exprimer les exigences minimales concernant les propriétés physiques du sol propres à garantir à long terme ses fonctions d'espace vital, de substrat pour la croissance des plantes et de régulateur du régime de l'eau, de l'air et de la chaleur. Lorsqu'une ou plusieurs de ces exigences (valeurs limites) ne sont pas remplies à un endroit donné, il faut d'abord examiner si la fonctionnalité réduite du sol est imputable aux conditions naturelles du site ou si elle a été causée par le mode d'utilisation. Il faut ensuite réduire les nuisances dues à l'exploitation du sol à cet endroit, et cela que l'atteinte soit imputable à des causes naturelles ou humaines.

Les seuils de résistance ou la vulnérabilité du sol aux sollicitations mécaniques expriment sa stabilité structurale et sont censés servir à apprécier la tolérance du sol aux sollicitations mécaniques. Dès que la portance du sol à un endroit donné n'est pas adaptée aux sollicitations, celles-ci doivent être dûment réduites; en d'autres termes, il convient d'adapter le mode d'utilisation, la technique de culture ou la mécanisation aux conditions du site.

Les valeurs indicatives et les seuils de résistance pour la lutte contre le compactage du sol étant appelés à servir de bases de décision à divers acteurs dans des situations très différentes, elles doivent donc satisfaire à des exigences également différentes en ce qui concerne leur exactitude, leur reproductibilité, leur clarté et la complexité des mesures. On ne pourra dès lors se borner à

définir en l'occurrence un petit nombre de paramètres applicables par tous et dans tous les cas. Quelques-uns des paramètres pédologiques proposés ici livrent des informations claires, peuvent être mesurés avec un haut degré de précision et sont reproductibles, mais leur mesure est souvent relativement complexe et coûteuse. Les autres fournissent uniquement des indices quant à l'état ou à la vulnérabilité du sol. Dans la plupart des cas, ils ne permettent pas de conclusions sans équivoque mais sont par contre mesurables ou estimables par des moyens simples et rapides. La valeur significative, la précision et la reproductibilité des mesures doivent néanmoins être suffisamment élevées pour prévenir tout risque qu'une erreur d'appréciation puisse conduire à choisir un mode d'action provoquant des compactions durables du sol.

Il existe trois cas de figures classiques dans lesquels les valeurs indicatives et les seuils de résistance pour la lutte contre le compactage peuvent servir de **base d'appréciation et de décision** à des actes différents:

- auto-contrôle des praticiens dans la planification et l'exploitation du sol;
- surveillance de l'état du sol par les autorités et établissement de prescriptions régissant son utilisation;
- établissement des dommages et des responsabilités en cas de litiges.

a) Auto-contrôle

Dans l'agriculture, la sylviculture et la construction, les praticiens doivent pouvoir estimer parfois juste avant une manipulation du sol si l'intervention projetée ne cause pas de tassements durables. A cette fin, ils ont besoin d'indicateurs ou de valeurs d'estimation faciles à déterminer, qui leur permettent de décider si les travaux projetés risquent ou non de provoquer un compactage. Les directives et les feuilles de renseignement pour la „bonne pratique" devraient elles aussi être basées essentiellement sur des valeurs d'estimation, faute de quoi elles seront impossibles à appliquer dans la pratique.

b) Surveillance de l'état du sol et prescriptions régissant son utilisation

En ce qui concerne la surveillance de l'état du sol par les autorités, il convient d'adapter les exigences auxquelles doivent satisfaire les paramètres pédologiques et la périodicité des contrôles au dynamisme des paramètres en question. Les paramètres qui par nature varient peu au fil du temps (c'est-à-dire qui présentent un faible dynamisme) peuvent être mesurés à des intervalles plus longs. En revanche, ils devraient livrer des informations claires, être mesurables avec exactitude et reproductibles. Dans ce cas, un coût relativement élevé des mesures est défendable. Les relevés par sondage de paramètres pédologiques variant rapidement (dynamisme élevé) n'apprennent rien sur l'état général d'un sol. Ces relevés n'ont de sens dans la surveillance du sol que s'ils sont effectués dans des conditions générales standardisées (par exemple: contrainte de préconsolidation à une force de succion donnée).

Dès qu'il y a présomption que le paramètre pédologique observé se rapproche des valeurs indicatives plus rapidement qu'il ne le devrait naturellement, il est recommandé d'opérer des contrôles à des intervalles de temps plus rapprochés mais en utilisant des valeurs d'estimation (indicateurs) plus simples de la fonctionnalité du sol. Ce procédé devrait permettre de prendre à temps les mesures nécessaires de protection du sol en limitant raisonnablement le travail et les frais d'enquête.

Les prescriptions légales relatives à l'utilisation du sol représentent toujours une certaine restriction du droit de propriété; elles doivent donc être édictées uniquement sur la base de paramètres clairs, mesurables avec exactitude et reproductibles. Les recommandations relatives à l'utilisation du sol n'ayant pas directement force de loi (par exemple dans des directives ou des feuilles de renseignement) peuvent reposer sur des indicateurs et des valeurs d'estimation. Mais dans les deux cas, il faut que les praticiens puissent relever rapidement et aisément les valeurs de contrôle destinées à vérifier le respect des prescriptions et des recommandations.

c) Etablissement des dommages et des responsabilités

En ce qui concerne l'établissement des dommages, il peut s'avérer plus économique selon les circonstances de procéder par étape. Si on soupçonne l'existence de compactages dommageables d'origine humaine à un endroit précis, il convient d'effectuer d'abord une rapide enquête préalable, à titre de „screening", s'appuyant sur des observations qualitatives. Si cette enquête préalable confirme les soupçons de compactage dommageable, l'existence des dommages devra alors être établie par une enquête détaillée en recourant à des paramètres clairs, quantitatifs et reproductibles. Pour établir la preuve de la responsabilité des dommages, il faudra établir en outre les relations de causes à effets permettant d'imputer sans équivoque un dommage à sa cause.

4. Propositions de valeurs indicatives et de seuils de résistance pour la lutte contre le compactage du sol

Dans sa plate-forme „protection du sol", la Société Suisse de Pédologie (SSP) estime que les paramètres physiques du sol ci-après se prêtent le mieux à la définition de valeurs indicatives et de seuils de résistance pour la lutte contre le compactage du sol:

Valeurs indicatives pour l'évaluation de la fonctionnalité du sol	**Seuils de résistance pour l'évaluation de la vulnérabilité du sol**
- volume des pores grossiers - perméabilité à l'air ou à l'eau - capacité d'infiltration - profondeur d'enracinement	- contrainte de préconsolidation (prise à la capacité au champ d'un sol) - résistance au cisaillement (prise à la capacité au champ d'un sol) - force de succion - résistance à la pénétration - profondeur des ornières laissées par les roues d'un engin (déformation) - plasticité du sol (indices de plasticité) - pierrosité

Concept pour la définition de valeurs indicatives pour la lutte contre l'érosion du sol

1. Introduction

Le concept pour la définition de valeurs indicatives pour la lutte anti-érosive est l'analogue de celui qui porte sur la lutte contre le compactage du sol: protéger les fonctions du sol et promouvoir l'application du principe de prévention en tant que finalité de la lutte contre l'érosion. Comme pour ce dernier, on établit le schéma des relations de causes à effets conduisant à l'érosion du sol (fig. 1); les mêmes questions concernant la définition des valeurs indicatives et des valeurs limites ainsi que concernant les causes et les effets y sont posées. Les bases conceptuelles sont exposées plus en détail aux chapitres correspondants du projet de définition de valeurs indicatives pour la lutte contre le compactage du sol.

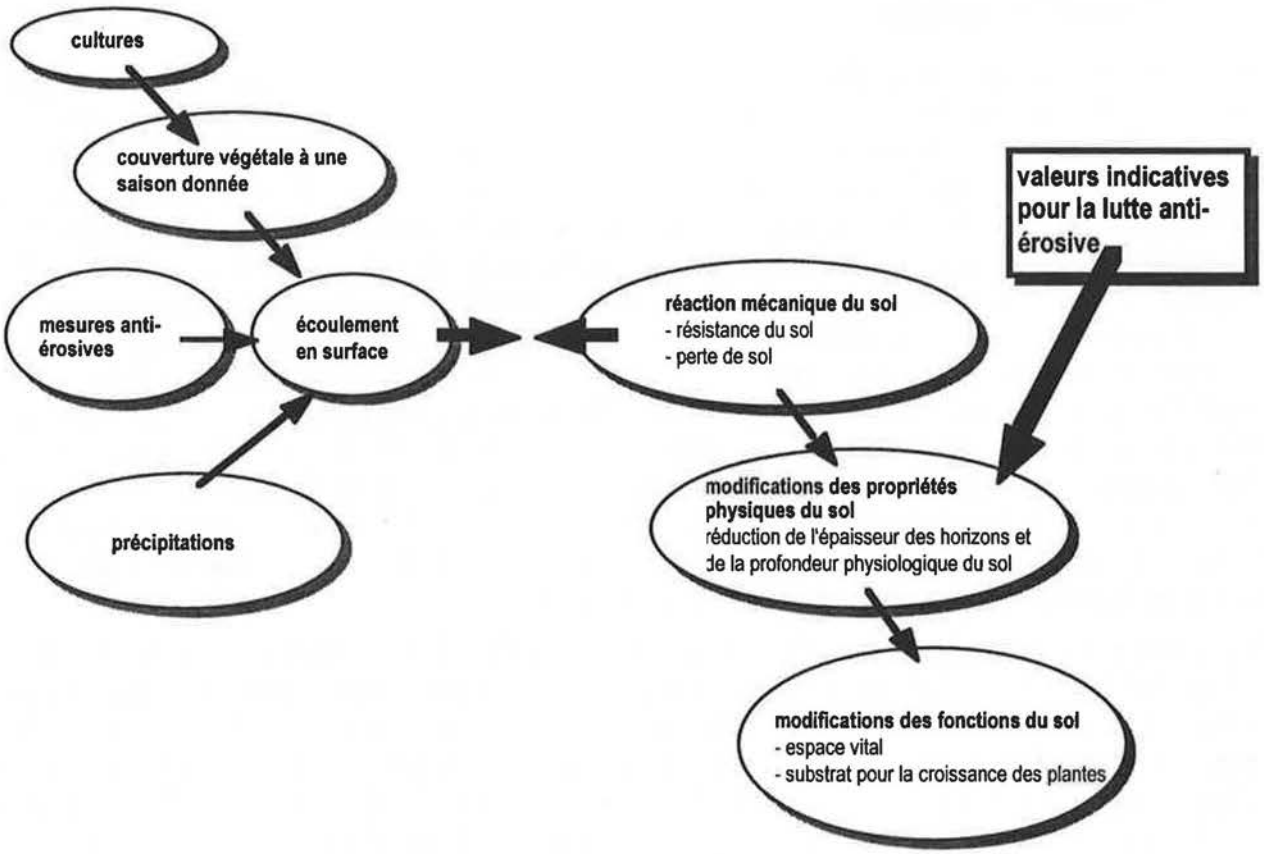


Fig. 1 Exemple des relations de causes à effets conduisant à l'érosion du sol

L'érosion est un phénomène naturel. Sur des pentes totalement recouvertes de végétation, l'érosion est presque nulle dans les conditions climatiques d'Europe centrale (cf. Bork 1988). L'érosion est

donc l'effet direct de l'usage du sol par l'homme qui périodiquement enlève ou réduit le couvert végétal. Dans la plupart des cas, ce phénomène touche les terres labourées, mais il peut aussi affecter des surfaces déboisées, dénudées par les incendies de forêt, surexploitées (pâturage trop intensif) ou perturbées par des travaux de construction (nivellement des pistes de ski, remise en état de sols décapés, banquettes de routes). Outre les atteintes à long terme à la fertilité des sols, les sédiments charriés peuvent arracher et recouvrir les plantes et donc causer des dommages aux cultures ou à la végétation naturelle, ou encore endommager les infrastructures. L'érosion du sol provoque des dégâts non seulement à l'endroit même où elle se produit mais également aux surfaces et aux écosystèmes avoisinants. Cet effet à distance doit être pris en considération dans la définition des valeurs indicatives. Quand la terre érodée arrive dans les cours d'eau, les engrais et les produits de traitement des plantes qu'elle charrie dégradent la qualité des eaux. D'où la nécessité de respecter aussi les prescriptions en matière de protection des eaux. L'érosion est déclenchée par l'eau ruisselante ou par le vent. En Suisse, nous n'avons pas connaissance de grandes surfaces endommagées par l'érosion éolienne; à vrai dire, il n'existe pas encore d'études approfondies sur ce sujet. En ce qui concerne le type d'atteintes, il faut distinguer entre l'érosion diffuse (en nappe) provoquée par le ruissellement superficiel et l'érosion linéaire (rigoles, ravines) provoquée par la concentration de l'eau ruisselant à la surface (Prasuhn et al. 1990). L'érosion éolienne provoque toujours une érosion diffuse.

2. Données existantes

En raison du caractère périodique du phénomène, les mesures directes de l'érosion exigent énormément de temps. En Suisse, des relevés portant sur une longue période existent pour les régions de la haute vallée du Rhin riches en lœss (Möhlin, AG) et du Jura tabulaire (Oberes Ergolztal); des relevés sur de courtes périodes pour les régions du Napf, du Plateau central (Lyss, BE) et du Plateau vaudois. Les résultats de ces relevés sont présentés de manière exhaustive dans l'étude de Schaub et Prasuhn (1998). Les pertes annuelles moyennes de terre fine vont de 3.0 à 5.0 t/ha sur les champs labourés dans les régions de lœss et de 0.5 à 1.0 t/ha sur d'autres surfaces. On peut dès lors dire qu'un risque étendu d'érosion en nappe existe uniquement dans les régions riches en lœss. Cependant ces chiffres moyens masquent le fait que les pertes de sol peuvent être beaucoup plus grandes sur certaines parcelles. Ainsi, on a pu mesurer des valeurs annuelles extrêmes allant jusqu'à 66 t/ha sur le Jura tabulaire et même jusqu'à 95 t/ha sur le Plateau central et dans la haute vallée du Rhin. De tels dommages surviennent en général dans les cuvettes, où agissent à la fois l'érosion diffuse des coteaux et l'érosion linéaire des ravines (érosion des thalwegs). Un des objectifs primordiaux de la protection physique des sols est donc d'identifier les causes de l'érosion et d'assainir les sites les plus menacés.

Il y a lieu de présumer que les atteintes dues à l'érosion du sol ont sensiblement augmenté avec l'extension des surfaces cultivées en maïs et l'intensification générale des cultures labourées depuis la fin de la deuxième guerre mondiale. Depuis une bonne dizaine d'année, la vulgarisation agricole apporte une attention accrue à ce problème. Une étude effectuée par le canton de Bâle-Campagne (Direction de la construction et de la protection de l'environnement du canton de Bâle-Campagne 1994) montre toutefois que le succès reste mince et que le risque d'érosion n'a guère diminué malgré les efforts. Les mesures anti-érosives dans l'exploitation (adaptation de la rotation des cultures, travail réduit du sol) peinent à s'imposer et leur effet est partiellement neutralisé par d'autres évolutions (agrandissement de la superficie des parcelles et donc accroissement de la longueur de pente érosive).

3. Bases pour la définition des valeurs indicatives

Parmi tous les processus qui menacent la fertilité du sol, la perte de terre par l'érosion est certainement le plus visible. Pourtant, on manque toujours aujourd'hui de données quantitatives concernant les effets des taux actuels de perte de terre sur la fertilité des sols sous tous ses aspects. Même la relation entre l'érosion et les rendements agricoles ne peut être chiffrée que dans des cas exceptionnels (Becher et Stürmer 1982), car les rendements sont influencés aussi par d'autres facteurs. Cela rend plus difficile encore la fixation de valeurs indicatives qui puissent être prouvées sans équivoque.

L'approche la plus simple pour la définition d'un taux tolérable de perte de sol consiste à postuler qu'en moyenne la perte ne doit pas être supérieure à la formation nouvelle de terre fine par la pédogenèse. Le problème est que l'ampleur naturelle de la pédogenèse est très difficile à déterminer (cf. Schwer 1994). Il y a lieu de présumer que même des pertes minimes de terre dépassent nettement la pédogenèse et mènent ainsi à long terme à une dégradation de la base de production agricole (Semmel 1995). **Dès lors, si l'on voulait appliquer strictement le principe de prévention, la valeur indicative pour l'érosion du sol devrait être fixée à zéro.** Pour la Bavière, Schwertmann et al. (1987, p. 12-13) ont proposé de fixer les seuils de résistance de pertes de sol en fonction de la profondeur physiologique des sols, de façon à ce que, en l'état actuel des connaissances, il n'y ait „pas de réduction sensible du potentiel de rendement naturel d'un sol sur une période de 300 à 500 ans". Mosimann et al. (1991) ont adopté ce concept pour la Suisse, mais ont abaissé le taux de pertes tolérables de sol par rapport aux normes bavaroises. Ces limites ont également été reprises par l'OSol. Les valeurs indicatives données dans l'OSol représentent donc un compromis, la plupart des techniques agricoles actuelles ne permettant pas d'éviter totalement l'érosion. Elles ne satisfont pas encore sur tous les points aux exigences d'une exploitation durable des sols. Il convient d'ajouter que même les experts en pédologie ont des avis divergents sur la profondeur physiologique d'un sol, qui détermine la valeur indicative, surtout quand il s'agit de sols situés sur des sédiments meubles (lœss, couches de couverture périglaciaires, etc.).

4. Application des valeurs indicatives pour la lutte anti-érosive

Les effets de l'érosion se voient aussi sur le profil du sol à une diminution de l'épaisseur des horizons. Mais, dans la plupart des cas, il est impossible de déterminer en combien de temps cette perte s'est produite. En Suisse, une grande partie des régions cultivées sont exploitées depuis plusieurs siècles. On sait qu'elles ont connu par le passé des périodes où l'érosion était plus intense. Les dommages apparaissant à des intervalles de temps très variables, les mesures directes dans des parcelles tests ou à l'aide de cartographie des dommages doivent être menées sur plusieurs années. Déduire le taux d'érosion du sol uniquement à partir des matières en suspension charriées par les cours d'eaux est une méthode trop peu fiable, même si l'on utilise des mesures très détaillées, les sédiments pouvant être apportés par d'autres sources que l'érosion (Schaub et al. 1997). Une autre méthode - plus prometteuse - consiste à déterminer le taux actuel de déperdition à partir de la répartition en profondeur de certaines substances introduites artificiellement dans le sol (par ex. radionucléides). Elle permettrait d'étudier aussi bien l'érosion naturelle des sols que

l'érosion due au labour et la perte de terre causée par la récolte. Malheureusement cette méthode n'est pas encore tout à fait au point aujourd'hui.

Afin de pallier ces problèmes de technique de mesures, les spécialistes ont développé une multitude de modèles mathématiques pour estimer rapidement les pertes de sol (Bork et Schröder 1996). Mais jusqu'ici, aucun de ces modèles n'a pu être testé de manière définitive au moyen de données de mesures. Si l'on regarde ce qui se fait dans d'autres pays, on constate là encore que la diversité règne (Bavière: EUPS; Saxe: EROSION 3D; Limburg-sud (NL): LISEM; Etats-Unis: WEPP). Ces systèmes fournissent également les bases environnementales régionales nécessaires à leur application (données climatiques et pédologiques) car l'établissement de ces données exige un énorme investissement en temps et en argent.

Il existe des indicateurs simples permettant d'apprécier le risque d'érosion à un endroit donné: les différentes formes de dommages visibles (battance ou ruissellement à la surface, rigoles d'érosion). Dans le cas d'érosion en rigoles, il est possible de mesurer également, du moins approximativement, l'ampleur de la perte en terre. Dans les autres cas, le risque d'érosion d'un site peut être estimé à l'aide des facteurs d'érosion suivants:

- précipitations („érosivité"),
- résistance du sol („érodibilité"),
- longueur de pente érosive,
- déclivité,
- couvert végétal.

Pour quantifier ces facteurs d'érosion, les méthodes d'estimation mentionnées plus haut offrent différentes approches. Il ne faut pas oublier que l'exploitation peut agir uniquement sur deux facteurs, la longueur de pente érosive (par la structure de la parcelle) et le couvert végétal (par la rotation des cultures) et que, par voie de conséquence, seuls ces deux facteurs offrent prise à des mesures anti-érosives.

Comme en matière de compactage des sols, on peut distinguer trois cas de figures où des valeurs indicatives devront servir de base d'appréciation et de décision pour des actes différents:

- auto-contrôle effectué par le praticien lui-même pendant la planification des travaux du sol et leur exécution;
- surveillance de l'état du sol par les autorités et arrêt de prescriptions régissant son utilisation;
- établissement des dommages et des responsabilités en cas de litiges.

a) Auto-contrôle

En Suisse le praticien dans l'agriculture dispose pour évaluer l'érosion d'un instrument simple basé sur l'EUPS (Erosion, clé d'appréciation du risque, Service romand de vulgarisation agricole, 1996). Si les paramètres sont relativement simples à déterminer, l'exactitude des prévisions laisse par contre à désirer selon la disposition du site.

b) Surveillance de l'état du sol et prescriptions régissant son utilisation

Les paramètres déterminant l'érosion du sol sont l'érosivité de la pluie, l'érodibilité du sol et la déclivité. On ne dispose pas encore de données détaillées sur l'érodibilité de la plupart des régions

de Suisse ainsi que sur les fréquences annuelles des brèves averses (5 à 30 minutes) responsables du déclenchement de l'érosion du sol. Les informations sur la déclivité peuvent être déduites des mensurations nationales; elles devraient cependant être vérifiées aux champs en cas de doutes pour des sites ayant un relief irrégulier. Pour les paramètres variant rapidement tels que la rotation des cultures ou la structure parcellaire (longueur de pente érosive), on se servira des analyses de la statistique agricole complétées par des relevés cartographiques (établis év. par des méthodes de reconnaissance aérienne).

Comme les prescriptions légales en matière d'utilisation des sols représentent toujours une certaine restriction du droit de propriété, il est indispensable qu'elles reposent sur des paramètres précis et reproductibles. En matière d'érosion du sol, on ne dispose pas encore aujourd'hui d'une méthode d'estimation qui réponde effectivement à ces exigences pour contrôler le respect des valeurs indicatives. En revanche, il est possible de formuler des recommandations relatives à l'utilisation du sol n'ayant pas directement force de loi (par exemple des directives ou des feuilles de renseignement) sur la base des paramètres mentionnés au point a).

c) Détection des surfaces à risques; établissement des dommages et des responsabilités

Le seul moyen de prouver un dépassement durable des valeurs limites concernant l'érosion des sols est de documenter les dommages apparus sur plusieurs années. Les contrôles effectués dans le cadre de la production intégrée peuvent jouer un rôle important dans la détection des surfaces à risques puisqu'ils doivent entre autres signaler l'apparition de phénomènes d'érosion. Les difficultés à reconnaître les dégâts d'érosion peuvent être grandement réduites par l'emploi de moyens auxiliaires simples (par exemple documentation photographique des dégâts typiques causés par l'érosion) et par une formation ad hoc. Dans la plupart des cas, les formes des dégâts permettent déjà de reconnaître leurs causes et ainsi d'établir les responsabilités, surtout s'agissant d'érosion des thalwegs (cf. aussi Herweg 1987). Cependant, pour chiffrer exactement l'ampleur de l'érosion sur ces surfaces menacées, des mesures directes de l'érosion sont encore une fois nécessaires.

5. Formes spéciales d'érosion

Outre l'érosion au sens étroit du terme, le labour („érosion de labour") et la récolte (terre adhérant aux produits récoltés, surtout quand il s'agit de betteraves à sucre ou de pommes de terre) peuvent également être sources de déportations et donc de pertes massives de terre. Une protection préventive de la fertilité du sol doit donc englober ces effets. Toutefois, des informations détaillées sur le volume de terre ainsi déporté dans les conditions régnant en Suisse font encore défaut aujourd'hui. Il conviendrait donc d'étudier ce phénomène.

6. Références bibliographiques

Becher, H.H., H. Stürmer, 1982: Maiserträge auf erodierten Lössstandorten. Bayer. Landw. Jahrb., 6, 735-747.

Bork, H.-R., 1988: Bodenerosion und Umwelt - Verlauf, Ursachen und Folgen der mittelalterlichen und neuzeitlichen Bodenerosion, Bodenerosionsprozesse, Modelle und Simulationen. Landschaftsgenese und Landschaftsökologie, Bd. 13, Braunschweig, 249 S.

Bork, H.-R., A. Schröder, 1996: Quantifizierung des Bodenabtrags anhand von Modellen. In: Handbuch des Bodenschutzes, 2. Lieferung, S. 1-44.

Direction de la construction et de la protection de l'environnement du canton de Bâle-Campagne (ed.), 1994: Bodenerosion im Kanton Basel-Landschaft, Liestal, 31 S.

Herweg, K., 1987: Die Geomorphologische Karte (GMK) als Instrument bei der Bodenerosionsbekämpfung. Natur und Landschaft, 62, 434-439

Mosimann, T.; Maillard, A.; Musy, A.; Neyroud, J.-A.; Rüttimann, M., P. Weisskopf, 1991: Erosionsbekämpfung in Ackerbaugebieten. Ein Leitfaden für die Bodenerhaltung. Liebefeld, 187 S.

Prasuhn, V., Schaub, D., E. Unterseher, 1990: Vorschlag zur Klassifikation und Nomenklatur von Erosionsformen. Mitt. Dt. Bodenkdl. Ges., 61, 39-42.

Schaub, D., V. Prasuhn, 1998: A map on soil erosion on arable land as a planning toll for sustainable land use in Switzerland. Advances in GeoEcology, 31, (in print)

Schaub, D., C. Wüthrich, C. Seiberth, 1997: Einfluss der Bodenerosion auf den Stoffhaushalt in unterschiedlichen schweizerischen Agrarlandschaften. Mitt. Dt. Bodenkdl. Ges., 83, 463-466.

Schwer, P., (1994): Untersuchungen zur Modellierung der Bodenneubildungsrate auf Opalinuston des Basler Tafeljura. Physiogeographica, Basler Beiträge zur Physiogeographie, Bd. 18, Basel, 190 S.

Schwertmann, U., W. Vogl, M. Kainz, 1987: Bodenerosion durch Wasser: Vorhersage des Abtrags und Bewertung von Gegenmassnahmen. Ulmer Verlag, Stuttgart, 64 S.

Semmel, A., 1995: Holozäne Bodenbildungsraten und „tolerierbare Bodenerosion" - Beispiele aus Hessen. Geol. Jb. Hessen, 123, 125-134.

Annexe 3: Définition du terme "sol" par la Société Suisse de Pédologie

Société Suisse de Pédologie

Qu'est ce que le sol?[1]

Le sol est la couche externe de la croûte terrestre, caractérisée par la présence de nombreux êtres vivants. Il est le siège d'un échange intense de matière et d'énergie entre l'air, l'eau et les roches. Le sol, en tant que partie de l'écosystème terrestre, occupe une position clé dans les cycles globaux des matières.

Formation

Le sol se forme par des processus très lents. Les roches s'altèrent sous l'action du climat et des êtres vivants; les constituants minéraux sont modifiés, en partie mélangés à des substances organiques et forment de nouveaux composants. Soumis à l'action de l'eau, travaillés par les plantes, les animaux et les microorganismes, les sols acquièrent progressivement des structures et des fonctions qui leur sont propres.

Constitution

Le sol est fait de matières solides, d'eau et d'air. Les matières solides: pierres, sable, silt, argile, de même que l'humus, constituent en quelque sorte la "charpente" du sol à travers laquelle circulent les fluides. Au cours du temps, il se forme dans le sol des couches différenciées par des teintes et des structures propres:

- une couche de surface le plus souvent foncée, humifère, riche en êtres vivants, densément colonisée par les racines. Elle est souvent de structure meuble et grumeleuse dans les sols les plus productifs;
- une couche intermédiaire (sous sol) de couleur plus claire, moins humifère, contenant moins de racines. Sa structure est différente de celle de la surface et de la couche sous-jacente;
- une couche de fond constituée de roches ou de matériaux peu (ou pas) altérés.

Le sol s'étend en profondeur aussi loin qu'on y trouve des êtres vivants, que les roches sont altérées ou que les racines peuvent s'étendre. La grande variété des conditions locales est à l'origine de la grande diversité des sols.

Fonctions

Le sol assure des fonctions régulatrices des flux de matière et du milieu vivant pour autant que sa surface et son volume soient suffisants. Son rôle est déterminant pour le stockage de l'eau, des éléments minéraux et pour la formation et la décomposition de la biomasse. Il épure les eaux de percolation.
Ces fonctions, ainsi qu'un pouvoir naturel d'autoconservation, sont affectés dans les sols soumis à des perturbations physiques (ex. tassement) ou chimiques (ex. pollution).

Utilisation et dégradation

L'homme utilise le sol pour la production des plantes utiles et comme réservoir de gènes. Il l'exploite pour ses matériaux de construction et le détruit pour ses bâtiments, ses activités diverses, ou encore pour y placer ses décharges.
Le sol est un bien culturel et une partie intégrante du paysage. Une utilisation erronée et trop intensive le dégrade, voire le détruit. Ses surfaces ne sont en principe pas extensibles.

---

[1] Au moment de la mise sous presse de ce document, la traduction des explications en français n'était pas encore terminée.

Annexe 4: Des articles de la LPE et l'OSol importants pour la protection du sol contre les atteintes physiques

Bases légales de la LF sur la protection de l'environnement (LPE) du 7 octobre 1983 (Etat 21 octobre 1997)

Art. 7, al. 4bis
Par **atteintes portées au sol**, on entend les modifications **physiques**, chimiques ou biologiques de l'état naturel des sols. Par **sol**, on entend la couche de terre meuble de l'écorce terrestre où peuvent pousser les plantes

Art. 33, al. 2
Il n'est permis de **porter atteinte physiquement** à un sol que dans la mesure où sa fertilité n'en est pas altérée durablement; cette disposition ne concerne pas les terrains destinés à la construction. Le Conseil fédéral peut édicter des prescriptions ou des recommandations sur les mesures destinées à lutter contre les atteintes physiques telles que l'érosion ou le compactage.

Bases légales de l'Ordonnance sur les atteintes portées aux sols (OSol) du 1 juillet 1998

Art. 2, al. 4
On entend par **atteintes physiques aux sols** les atteintes à la structure, à la succes-sion des couches pédologiques ou à l'épaisseur des sols résultant d'interventions humaines.

Art. 6, al. 1
Quiconque construit une installation ou exploite un sol doit, en tenant compte des caractéristiques physiques du sol et de son état d'humidité, choisir et utiliser des vé-hicules, des machines et des outils de manière à prévenir les **compactions** et les au-tres modifications de la structure des sols qui pourraient menacer la fertilité du sol à long terme.

Art. 6, al. 2
Quiconque procède à des modifications des sols ou exploite un sol doit veiller, par des techniques de génie rural et d'exploitation appropriées, telles qu'un aménage-ment antiérosif des parcelles et des techniques culturales antiérosives, une rotation des cultures et des soles culturales adaptées, à prévenir l'érosion qui pourrait mena-cer la fertilité du sol à long terme. Si la protection du sol contre **l'érosion** exige des mesures communes à plusieurs exploitations, le canton rend ces mesures obligatoi-res; en particulier en cas d'érosion causée par les eaux de ruissellement concentrées (érosion des thalweg).

Art. 7, al. 1
Quiconque **manipule, excave ou décape** un sol doit procéder de telle façon que le sol puisse être réutilisé en tant que tel.

Art. 7, al. 2
Si des matériaux terreux sont utilisés pour **reconstituer un sol** (p. ex. en vue de la remise en état ou du remodelage d'un terrain), ils doivent être mis en place de telle manière que:
a. la fertilité du sol en place et celle du sol reconstitué ne soient que provisoire-ment perturbées par des atteintes physiques;
b. le sol en place ne subisse pas d'atteintes chimiques supplémentaires.