

Plateforme d'information des sols suisse (PIS-CH)

Informations du sol, méthodes et instruments pour une utilisation durable de la ressource sol

Armin Keller Julia Franzen Paul Knüsel Andreas Papritz Martin Zürrer



SCHWEIZERISCHER NATIONALFONDS
ZUR FÖRDERUNG DER WISSENSCHAFTLICHEN FORSCHUNG



Ressource sol
Programme national de recherche PNR 68

Plateforme d'information des sols suisse (PIS-CH)

Informations du sol, méthodes et instruments pour une utilisation durable de la ressource sol

Synthèse thématique 4 du Programme national de recherche
« Utilisation durable de la ressource sol » (PNR 68)

Avant-propos

Qui veut agir de manière consciencieuse, efficace et durable a besoin d'informations sur le sujet en question et sur les effets des mesures. Il n'en va pas autrement pour le sol que pour les domaines environnementaux de l'eau, de l'air ou du climat ou l'économie. La collecte d'informations sur le sol présente cependant des défis spécifiques: pour décrire l'état du sol, il faut un nombre considérable de paramètres physiques, chimiques et biologiques, que l'on obtient principalement à partir d'échantillons de sol. En raison de l'hétérogénéité du sol, il a jusqu'ici été difficile d'avoir des informations sur de larges zones. Mais cela justement est possible avec les méthodes de cartographie numériques modernes que les chercheurs du Programme national de recherche « Utilisation durable de la ressource sol » (PNR 68) ont élaborées pour la Suisse sur la base de techniques déjà appliquées à l'étranger. Elles nécessitent cependant un étalonnage à l'aide d'inventaires conventionnels de l'état des sols et présentent des inexactitudes liées à la méthode. Toutefois la précision des méthodes conventionnelles est surestimée, car le facteur humain entraîne aussi des écarts dans différents aspects des relevés. Les auteurs de la synthèse thématique ST4 « Plateforme d'information des sols suisse (PIS-CH) » du PNR 68 ont le mérite d'avoir réuni les deux approches méthodologiques en un concept, qui permet de combler les grandes lacunes en matière d'informations sur les sols en Suisse dans un horizon temporel prévisible et avec une précision adaptée aux besoins. Comme le montrent les auteurs dans les études de cas, la collecte des données n'est pas du tout de « l'art pour l'art », mais génère une valeur ajoutée considérable dans divers domaines de la société, que ce soit la production d'eau potable, l'agriculture ou la protection contre les dangers naturels. Cette valeur ajoutée est bien supérieure aux coûts liés à la collecte d'informations sur les sols. Les informations sur les sols constituent donc la base essentielle de l'utilisation durable de la ressource sol et bénéficient à tous.

Prof. Dr. Emmanuel Frossard

*Président du Comité de direction du Programme national de recherche
« Utilisation durable de la ressource sol » (PNR 68)*

Table des matières

Avant-propos → 5

Table des matières → 6

Résumé → 8

Messages clés → 10

1 Informations du sol et instruments dans le cycle de valeur ajoutée → 15

- 1.1 Valeurs cachées → 15
- 1.2 Le sol, ses fonctions et ses services écosystémiques → 16
- 1.3 Des informations pédologiques pour utiliser et protéger la ressource sol → 18
- 1.4 Déficits en matière de sécurité alimentaire → 18
- 1.5 Des surfaces d'assolement insuffisantes → 19
- 1.6 Le cycle de création de valeur des informations du sol → 19
- 1.7 Protection du sol : état d'urgence en matière d'exécution → 21

2 Etat des lieux et lacunes → 22

- 2.1 Demande en informations du sol et en instruments → 22
- 2.2 Etapes d'une cartographie des sols → 36
- 2.3 Etat de la cartographie des sols en Suisse → 39
- 2.4 Gestion des données et système d'information sur les sols → 43
- 2.5 Etat de la cartographie des sols dans l'Union européenne → 47
- 2.6 Evaluation des fonctions du sol et des services écosystémiques → 53
- 2.7 Cartographie des sols comme base pour délimiter les surfaces d'assolement → 61
- 2.8 Instruments de protection des sols → 64
- 2.9 Conclusion → 69

3 Plateforme d'information des sols suisse (PIS-CH) → 70

- 3.1 Objectifs et portée → 70
- 3.2 Eventail minimal d'informations du sol → 71
- 3.3 Cartographie des sols de demain → 72

- 3.4 Régions prioritaires et échelle → 80
- 3.5 Calendrier → 81
- 3.6 Plateforme d'information → 83
- 3.7 Conclusion → 84

4 Plateforme d'information des sols suisse (PIS-CH) – un investissement rentable → 85

- 4.1 Analyse approximative des coûts et bénéfices → 85
- 4.2 Exemple de valeur ajoutée générée par les informations du sol → 86
- 4.3 Deux exemples de coûts de réparation → 91
- 4.4 Conclusion → 92

5 Recommandations d'action → 94

Annexe → 98

- A1 Sélection des interventions parlementaires → 98
 - Systèmes d'information sur les sols → 100
 - Le Programme national de recherche « Utilisation durable de la ressource sol » (PNR 68) → 103
 - Les projets de recherche du PNR 68 → 105

-
- A2 Index des illustrations → 109
 - Index des tableaux → 110
 - Glossaire → 111
 - Liste des abréviations → 114
 - Bibliographie → 115
 - Remerciements → 128

Impressum → 129

Résumé

Au vu des lacunes existant actuellement en matière d'informations du sol et des besoins manifestés par différents domaines politiques et environnementaux, il apparaît essentiel d'établir un système complet d'information sur les sols (SIS) qui associe prestations de services, conseil et transfert de connaissances. La synthèse thématique 4 du PNR 68 (ST4) «Plateforme d'information des sols suisse (PIS-CH)» esquisse une vision quant aux contenus dont ce SIS devrait être doté et aux conditions nécessaires à sa mise en place. Elle met en lumière de futures possibilités de développement de la cartographie et indique les étapes à suivre pour créer une plateforme d'information des sols. La mise en place d'une telle PIS-CH doit ce faisant être entendue comme l'œuvre d'une génération visant à assurer une utilisation durable du sol et à mieux appréhender la multifonctionnalité de cette ressource. La ST4 explicite le sens et le but de la PIS-CH et examine les facteurs de coûts qui se révéleront déterminants pour sa mise en place et son exploitation. Les investissements exigés pour cartographier les sols au plan national sont mis en balance avec les bénéfices qui en résulteront pour la science, les pouvoirs législatifs, l'agriculture et la pratique.

Le sol remplit de nombreuses fonctions écologiques et économiques et revêt une importance cruciale pour l'Homme comme pour l'environnement. Les sols sont multifonctionnels, tant par leur nature que par leur fonctionnement. Cependant, leur importance écologique et sociale s'avère souvent difficile à saisir directement. Les rôles joués par le sol en tant que support principal de la production alimentaire, interface biologiquement active entre la géosphère, l'atmosphère, la biosphère et l'hydrosphère et fournisseur de nombreuses prestations écosystémiques échappent en effet à une perception immédiate.

Les informations du sol décrivent la constitution et les propriétés des sols selon un profil vertical et s'attachent à caractériser leur qualité, leur diversité et les utilisations auxquelles ils sont adaptés. Disposer au plan national d'informations fondées sur la répartition et les propriétés des sols constitue pour la Confédération, les cantons et les communes un prérequis indispensable pour gérer efficacement les exigences d'utilisation et préserver les services écosystémiques fournis par les sols – et assurer ainsi une production alimentaire durable en garantissant la sécurité alimentaire. Dans le cadre de la mise en œuvre de la protection des sols par les cantons, il semble entre autres essentiel que des cartes d'application (ou cartes d'utilisateur) soient mises à disposition des acteurs de l'exploitation forestière, de l'agriculture et du développement territorial afin de permettre une utilisation durable de la ressource sol. En Suisse, des données étendues sur l'état actuel du sol font néanmoins défaut. Seuls quelques cantons ont jusqu'à présent comblé ces lacunes. Il s'agit là d'une des principales raisons expliquant pourquoi beaucoup de décisions, ou de domaines politiques, prennent à peine en compte, voire ignorent complètement, la ressource sol.

Informations du sol – Eléments d'une politique durable des sols

La présente synthèse thématique du PNR 68 «Plateforme d'information des sols suisse» présente le cycle des informations pédologiques. Il est nécessaire que les besoins des différents acteurs et domaines politiques soient déterminés, que les normes et les méthodes de relevé inhérentes à la cartographie soient définies et que leur développement soit poursuivi. Les données ainsi générées devront être gérées au sein d'un système d'information sur les sols doté d'instruments permettant d'évaluer et d'examiner les problé-

matiques rencontrées par les utilisateurs. La principale conclusion à laquelle la ST4 parvient est qu'il convient de mettre en place une Plateforme d'information des sols suisse (PIS-CH) qui réponde aux nombreux besoins des différents domaines politiques et exécutifs. Celle-ci devra à l'avenir constituer une plateforme d'information et de services ayant pour vocation de mettre à disposition des informations, des méthodes et des instruments afin de soutenir les parties prenantes impliquées dans la collecte des données pédologiques et la protection du sol dans le but d'assurer une utilisation durable de cette ressource. Dans cette perspective, les résultats de plusieurs projets du PNR 68 ont été évalués et des travaux de recherche et des études de portée nationale et internationale ont été pris en compte.

La ST4 indique comment les importantes lacunes existant actuellement quant à la nature, à la superficie et à la qualité des sols suisses peuvent être comblées sur le long terme. Elle présente de possibles voies et champs d'action dans le but d'élaborer une PIS-CH qui permettra d'établir les bases nécessaires pour planifier une utilisation durable et prolongée de la ressource sol. L'utilisation des informations du sol, les procédures méthodologiques nécessaires à l'élaboration d'une cartographie nationale ainsi que les instruments visant à identifier et prévenir les dangers menaçant les sols et à maintenir leurs fonctions essentielles sont au cœur des thèmes abordés par la ST4. La valeur ajoutée d'une PIS-CH est démontrée à l'aune de dix études de cas soigneusement sélectionnées.

Structure de la synthèse thématique

La ST4 présente les instruments et les méthodes scientifiques à employer afin de compléter de manière aussi efficace, ciblée et généralisée que possible les données pédologiques encore lacunaires dont dispose actuellement la Suisse et de les mettre à disposition des nombreux acteurs intéressés. Les messages clés synthétisent les principales conclusions de la ST4 sous la forme de recommandations d'action. Le premier chapitre met en évidence l'importance des informations du sol pour la société et les intègre au cycle de l'action politique. Le deuxième chapitre présente les éléments constituant le cycle de valeur ajoutée des informations du sol et met ceux-ci en relation avec les intérêts d'utilisation pertinents. Il dresse par ailleurs un bilan de l'état de la cartographie des sols suisses ainsi que des instruments destinés à prévenir les risques menaçant les sols et leurs fonctions. Le troisième chapitre décrit le système cible de la PIS-CH et présente – sur la base d'une analyse des lacunes et des contraintes présentées par l'actuel cycle de valeur ajoutée – une proposition pour sa mise en place. Le quatrième chapitre met en regard les coûts et les bénéfices qui découleraient d'une cartographie nationale généralisée des sols sur laquelle élaborer la PIS-CH. Le cinquième chapitre résume les champs d'action s'ouvrant aux domaines scientifiques, politiques et administratifs et les mesures pouvant être adoptées, dont découlent les messages clés préalablement formulés.

Messages clés

L'utilisation durable de la ressource sol exige de disposer d'informations du sol fiables au plan national, données qui font actuellement en grande partie défaut en Suisse. En tant qu'interface centrale des écosystèmes, le sol concerne de nombreux domaines politiques incluant la sécurité alimentaire, la planification territoriale, la protection du climat et du sol, la prévention des crues, l'exploitation agricole et forestière, et la biodiversité. Ces différents domaines ont manifestement fort besoin que des informations pédologiques permettant de gérer et de satisfaire durablement les diverses exigences d'utilisation soient mises à leur disposition. Ces données constituent par conséquent la base sur laquelle établir une politique nationale des sols efficiente et cohérente. La présente synthèse thématique 4 (ST4) propose qu'une Plateforme d'information des sols suisse (PIS-CH) fasse office de plaque tournante pour les données pédologiques et les produits, comme les cartes d'application, pouvant en être dérivés. Cette plateforme aurait pour objectif de couvrir les besoins en informations des différentes parties prenantes et de générer parallèlement une forte valeur ajoutée.

Afin de combler durablement les importantes lacunes existant quant à la nature, à la superficie et à la qualité des sols suisses, la ST4 formule quatre messages clés pour la mise en place et l'actualisation d'une PIS-CH. Ceux-ci s'appuient sur les résultats de plusieurs projets du PNR 68 ainsi que sur des travaux de recherche et des études de portée nationale et internationale. La ST4 est étroitement liée à la ST3 « Un agenda du sol pour l'aménagement du territoire » et à la ST5 « Vers une politique durable des sols » du PNR 68.

N° 1 Une cartographie nationale des sols constitue un investissement rentable. Des préférences doivent être définies quant aux régions à cartographier en priorité et aux étapes à respecter.

Pour assurer une utilisation durable des sols suisses, il est nécessaire que leurs propriétés et leur qualité soient cartographiées aux différentes profondeurs. Si la PIS-CH vise à couvrir les besoins de tous les utilisateurs, un processus politique décisionnel devra préalablement définir quelles sont les régions et les utilisations devant être cartographiées en priorité et selon quel calendrier procéder. Il sera ce faisant nécessaire de prendre en compte les aspects qui s'avèrent les plus importants pour l'utilisation durable et la protection des sols, par exemple, les surfaces d'assolement (SDA) à haute valeur agricole situées à proximité du milieu bâti. La ST4 fournit une analyse approfondie des principaux critères de sélection.

Actuellement, la méthodologie de cartographie des sols est principalement orientée vers la production agricole et les surfaces utiles (SAU). Dans la foresterie, la planification des stocks peut par ailleurs s'appuyer sur des directives de cartographie pour les sols forestiers. Afin que la multifonctionnalité des sols, à laquelle se rattachent entre autres les fonctions de régulation et d'habitat (biodiversité), fasse également l'objet d'un relevé, il convient de redéfinir les exigences et les besoins relatifs aux informations du sol. Le processus de clarification nécessaire pour ce faire prend désormais en compte toutes les exigences d'utilisation directes et indirectes et tous les acteurs concernés. S'inscrivant dans le cadre d'une démarche politique, il permet de déterminer les priorités fonctionnelles et spatiales devant être définies lors de la collecte des informations du sol. La ST4 met en lumière les informations qui sont concrètement nécessitées.

Etablir une cartographie des sols au plan national constitue un élément déterminant pour la mise en place d'une PIS-CH. Les coûts annuels correspondants sont estimés à 15–25 millions de francs. En fonction des préférences qui seront définies quant aux régions et utilisations à cartographier, un tel investissement devra être réalisé sur deux à trois décennies. Au vu des bénéfices en découlant pour différents domaines politiques comme la sécurité alimentaire, la planification territoriale, l'agriculture, l'exploitation forestière, la protection du climat et du sol, ces coûts annuels – qui correspondent à la construction de 60 à 100 mètres de route nationale – s'avèrent un investissement rentable. La ST4 met en exergue les bénéfices qui résulteraient d'un relevé pédologique généralisé au moyen d'évaluations économiques simplifiées réalisées dans dix domaines thématiques : chaque franc investi dans la collecte d'informations du sol génère une valeur ajoutée allant de 2 à 13 francs (moyenne : 6 francs) selon le domaine concerné. Ces estimations s'appuyant sur des hypothèses très conservatrices quant aux variables clés des scénarios de calcul, la valeur ajoutée effective pourrait s'avérer beaucoup plus élevée. La PIS-CH est un instrument de prévention qui n'est certes pas gratuit, mais qui se révélera moins onéreux qu'une réparation ultérieure des dommages encourus.

L'estimation des coûts qui résulteraient d'une cartographie nationale des sols est entachée d'incertitudes dans la mesure où les relevés pourraient être effectués de manière plus efficace à l'avenir. Plusieurs conditions-cadres, comme la mise en place d'une infrastructure commune et la superficie des régions à cartographier (économies d'échelle), s'avèreront décisives à cet égard. Le fait de cartographier des régions plus importantes qu'auparavant, de développer les procédures de relevé et d'analyse, de recourir à des mesures géophysiques ainsi qu'à des méthodes d'acquisition directe comme de télédétection permettra de réaliser des économies. Une fois recueillies, les données pédologiques pourront être utilisées pendant longtemps. Contrairement à d'autres domaines de l'observation environnementale (air et eau), les informations du sol conservent, à quelques exceptions près, leur validité durant des décennies.

N° 2 Il convient de tester – parallèlement aux relevés pédologiques en cours – de nouvelles technologies au moyen d'études de cas.

La PIS-CH exige qu'un standard de description des sols à la pointe des connaissances soit introduit au plan national. Il devra être adapté aux besoins des utilisateurs et permettre des comparaisons internationales. La Société suisse de pédologie (SSP) a élaboré une proposition en ce sens. Il sera dans un premier temps nécessaire que les directives relatives à la cartographie des sols agricoles et forestiers soient actualisées. La version actuelle date en effet de plus de deux décennies et remonte à une époque antérieure au développement des technologies numériques. Les travaux de terrain et la télédétection, les mesures géophysiques ou la préparation des données géologiques et environnementales peuvent compléter de manière ciblée la cartographie des sols. Il convient à cet égard d'examiner si les véhicules équipés de dispositifs de forage intégrés et les méthodes d'analyses basées sur des indicateurs supplétifs pourraient faciliter les mesures effectuées sur le terrain comme en laboratoire. Il importe aussi de déterminer grâce à des études de cas si les méthodes les plus récentes sont transposables dans la pratique. En vue d'une plus grande efficacité, il serait par ailleurs indispensable de mettre en place une infrastructure natio-

nale dédiée à la logistique des échantillons de sol et permettant leur préparation comme leur archivage centralisé. De nouvelles méthodes spectroscopiques, semblables à celles déjà utilisées à l'étranger pour les analyses de terrain et de laboratoire, permettent également de mesurer à peu de frais les propriétés des sols.

N° 3 Il convient de mettre des informations du sol harmonisées et des produits dérivés à disposition et d'établir une plateforme d'information jouant le rôle de plaque tournante pour les données pédologiques.

La PIS-CH est une plateforme d'information et de services qui s'articule autour d'un système d'information sur les sols dédié à la gestion et au regroupement des données pédologiques. Les structures existantes sont à même de servir de base à son élaboration. Ces dernières années, le Système national d'information pédologique NABODAT s'est révélé un instrument particulièrement performant et adapté à la pratique pour regrouper et utiliser les données pédologiques. Néanmoins, tous les acteurs concernés n'ont pas toujours accès à ces informations. Il convient par conséquent de veiller à pérenniser l'exploitation et le développement de ce système. La ST4 recommande qu'une plateforme permettant aux utilisateurs de consulter les informations du sol disponibles et les méta-informations essentielles s'y rapportant soit créée et mise à disposition afin de répondre aux questions techniques. A l'avenir, les données pédologiques doivent pouvoir être échangées rapidement et efficacement entre les parties prenantes selon des standards unifiés et leur mise à disposition doit être assurée. La suppression des barrières d'accessibilité et la libre disponibilité constituent les conditions préalables à une large utilisation des informations du sol par la Confédération, les cantons, les communes, le grand public et la science. La PIS-CH a pour vocation de répondre à ces objectifs.

La PIS-CH ne doit néanmoins pas uniquement être considérée comme une plateforme dédiée à l'information et à la connaissance, mais aussi comme un service centralisé ouvert à tous les acteurs intéressés par une politique durable des sols. Coordination technique, transfert de savoir et conseil constituent par conséquent des fonctions importantes que la PIS-CH – qui devra être administrée de manière centralisée – se propose d'assumer. De tels services, comme le Service géologique national, existent depuis longtemps dans d'autres domaines environnementaux. De manière analogue, il est recommandé qu'un « Service national de pédologie », qui serait chargé de la mise en place et du suivi de la PIS-CH, soit établi. Celui-ci serait également voué à jouer un rôle subsidiaire: en 2014, le Parlement fédéral s'est en effet prononcé en faveur d'une intervention relative à la création d'un « organe central indépendant de gestion et de coordination des informations pédologiques ». La Confédération est par ailleurs en train de préparer une stratégie pour la gestion durable du sol ayant pour objectif d'intégrer les aspects qualitatifs et quantitatifs aux décisions portant sur l'utilisation, l'imperméabilisation ou d'autres consommations du sol.

N° 4 Il convient de renforcer le transfert de connaissances en vue d'une utilisation durable du sol et de développer la protection préventive.

Malgré tous les efforts entrepris pour assurer son utilisation durable, l'érosion, l'imperméabilisation, la perte d'humus, l'acidification et les polluants affectent les performances de la ressource sol. Des instruments contribuant à sa protection ont été développés dans le cadre de plusieurs projets du PNR 68. Les données pédologiques nécessaires à la mise en œuvre régionale, voire nationale, de ces instruments continuent néanmoins en règle générale de faire défaut. L'instrument TERRANIMO nécessite par exemple des données relatives à la teneur en argile et en eau du sol afin de pouvoir calculer le risque de compaction découlant de l'usage d'engins agricoles. Les instruments de protection du sol devront à l'avenir pouvoir être appliqués uniformément et à grande échelle. Des cartes d'application contenant des informations sur la sensibilité au compactage, les risques d'érosion ou les pertes de nutriments pourraient par suite soutenir une utilisation durable de la ressource sol. Un ensemble d'indicateurs, grâce auquel la politique et l'administration pourraient établir des conditions-cadres permettant d'assurer une gestion durable des sols, doit par ailleurs être élaboré.

L'évaluation des fonctions du sol est un instrument principalement préventif permettant de déterminer les performances des sols qui est surtout voué à être utilisé pour l'aménagement territorial. Les cartes des fonctions du sol permettent de prendre en compte de manière adaptée la qualité du sol dans la troisième dimension lors de la pondération des intérêts, et des utilisations liées à des implantations spécifiques, et mettent en évidence sa multifonctionnalité. Assorties de valeurs pédologiques, elles constituent une solution tout indiquée pour permettre aux non spécialistes de prendre conscience de la valeur du sol et de sa contribution aux services écosystémiques (SES). Un premier catalogue méthodologique portant sur dix fonctions du sol a été développé dans le cadre du PNR 68. A moyen terme, il est prévu qu'un catalogue national incluant d'autres méthodes d'évaluation pertinentes et éprouvées dans la pratique soit élaboré.

Une politique du sol axée sur la durabilité exige que le monde politique et le grand public intègrent le fait que la ressource sol constitue un bien naturel rare et non renouvelable. La PIS-CH a par conséquent également pour vocation de permettre aux spécialistes et aux profanes d'échanger sur des thèmes comme les données pédologiques, la qualité, les fonctions et la protection du sol et le principe de précaution.

Informations du sol et instruments dans le cycle de valeur ajoutée

1.1 Valeurs cachées

Le sol fournit en secret des services indispensables et d'une haute utilité : la contre-valeur correspondant à la filtration de l'eau potable sur un hectare s'élève ainsi à plus de 100 francs par an (chapitre 4). Mesuré à l'aune des droits d'émission européens, le stockage des gaz à effet de serre représenterait plus de 1000 francs sur la même surface. Et les bénéfices résultant de la production de carottes ou de viande issues de l'agriculture biologique peuvent se révéler supérieurs à 10 000 francs par an et par hectare. Même si ces valeurs constituent des estimations, elles permettent de quantifier approximativement les avantages économiques apportés par le sol en matière de production alimentaire, de préservation du climat ou d'approvisionnement en eau. Chaque année, des économies de l'ordre de 7 à 10 millions de francs peuvent ainsi être réalisées sur le traitement de l'eau potable. Pérenniser la fonction de filtration du sol exige toutefois que les bases de planification contribuent de manière ciblée à réduire les apports

excessifs de fertilisants et de polluants là où ils ne sont pas nécessaires (chapitre 4).

Grâce à ces chiffres, même un regard scientifiquement non averti est à même de juger de la qualité d'un sol en fonction de ses propriétés. La société définit principalement la valeur d'un sol intact d'après sa capacité à assurer production alimentaire et sécurité d'approvisionnement. Mais le sol stocke, filtre et transforme également les substances les plus variées, dont l'eau et les nutriments. Il joue par ailleurs un rôle irremplaçable en tant que pool génétique garant de la diversité biologique. Une poignée de terre abrite plus d'organismes que la Terre d'êtres humains et près de deux tiers de toutes les espèces vivent cachées sous la surface. Après les océans, le sol constitue le deuxième réservoir mondial de dioxyde de carbone. Néanmoins, il peut assumer ces différentes fonctions de production, de stockage et de filtration que si la vie qu'il abrite est intacte, si la couche d'humus est saine et si l'utilisation qui en est faite est durable. Ce sont les performances des sols qui dé-

Illustration 1

Profils de sol de champs cultivés, de prairies et de sols forestiers : les sols se distinguent par la diversité de leur constitution et l'hétérogénéité de leurs propriétés et se prêtent par conséquent à des utilisations très diverses.

Photos: R. Brändli, U. Zihlmann, Agroscope ; A. Chervet, OAN Berne ; L. Walthert, S. Zimmermann, wsl.



Epeautre sur sol brun acide



Tournesol sur fluvisol



Prairie sur sol brun calcaire gorgé d'eau



Forêt d'érables et de frênes sur gley engorgé d'eau

terminent dans quelle mesure les exigences respectives des utilisateurs peuvent être satisfaites et les objectifs écologiques ou sociétaux correspondants peuvent être atteints. Services jusqu'alors naturellement fournis par un environnement intact, leurs fonctions écologiques sont de plus en plus mises en péril.

Comme le démontrent les évaluations citées à titre d'exemple dans la ST4 (chapitre 4), le sol présente un intérêt sociétal élevé et répond à de nombreuses exigences écologiques et fonctionnelles. Le problème est que son utilité n'est réellement reconnue qu'une fois que ses propriétés sont altérées et que son fonctionnement naturel doit être restauré par des moyens techniques approchants. Le sol, qui s'est constitué au fil des millénaires, ne peut pas être (ré)généralisé techniquement ni importé. Utiliser durablement le sol signifie donc avant tout prévoir et prévenir. Les mesures de réhabilitation et de protection s'avèrent toujours beaucoup plus onéreuses que les mesures de prévention.

1.2 Le sol, ses fonctions et ses services écosystémiques

Le sol est un mélange solide de matériaux organiques et inorganiques, comme l'argile, le limon, les pierres et l'humus, à travers lequel l'eau et les substances gazeuses peuvent circuler. C'est avant tout le système de pores du sol qui permet des échanges permanents d'eau, de gaz et de substances aussi bien sous terre qu'avec l'atmosphère. Celui-ci régule en grande partie le cycle de la matière du sol et y rend la vie possible.

Les sols se développent sur des millénaires, sachant que ce sont les conditions environnementales et leurs utilisations qui induisent les plus importantes variations

spatiales en termes de structure, régime hydrique, profondeur, propriétés et autres caractéristiques pédologiques. Le sol présente donc une composition extrêmement variée et contient de nombreux organismes vivants. A l'inverse de milieux environnementaux constamment mélangés comme l'eau et l'air, qui sont de fait relativement homogènes, le sol peut adopter des profils pédologiques variés même sur de courtes distances, car structures et propriétés diffèrent en fonction de la profondeur. La qualité des sols et leur capacité à remplir différentes fonctions et services écosystémiques (SES) peuvent par conséquent se modifier sur une petite échelle. Une utilisation durable et respectueuse des conditions locales nécessite par conséquent de disposer d'informations spatiales fondées sur la qualité des sols.

La PIS-CH vise en principe à optimiser les mesures légales adoptées en matière de prévention environnementale. Au cours des dernières décennies, le système d'exécution s'est surtout attaché à réduire les menaces pesant sur le sol, par exemple en atténuant et en prévenant l'érosion, le compactage et les apports de polluants. A l'avenir, il devra néanmoins aussi être axé sur la multifonctionnalité de la ressource sol. Il conviendra pour ce faire de concilier les différentes utilisations spatiales et la préservation des fonctions et services écosystémiques (SES) du sol.

Fonctions et SES du sol constituent des concepts novateurs qui sont destinés à favoriser les échanges entre disciplines scientifiques et domaines politiques en vue d'une meilleure compréhension du sol, à mettre en évidence sa valeur ajoutée pour la société² et à améliorer ainsi globalement la protection du sol. Les SES sont entre autres dérivés de l'évaluation et de la quantification des fonctions du sol³ et

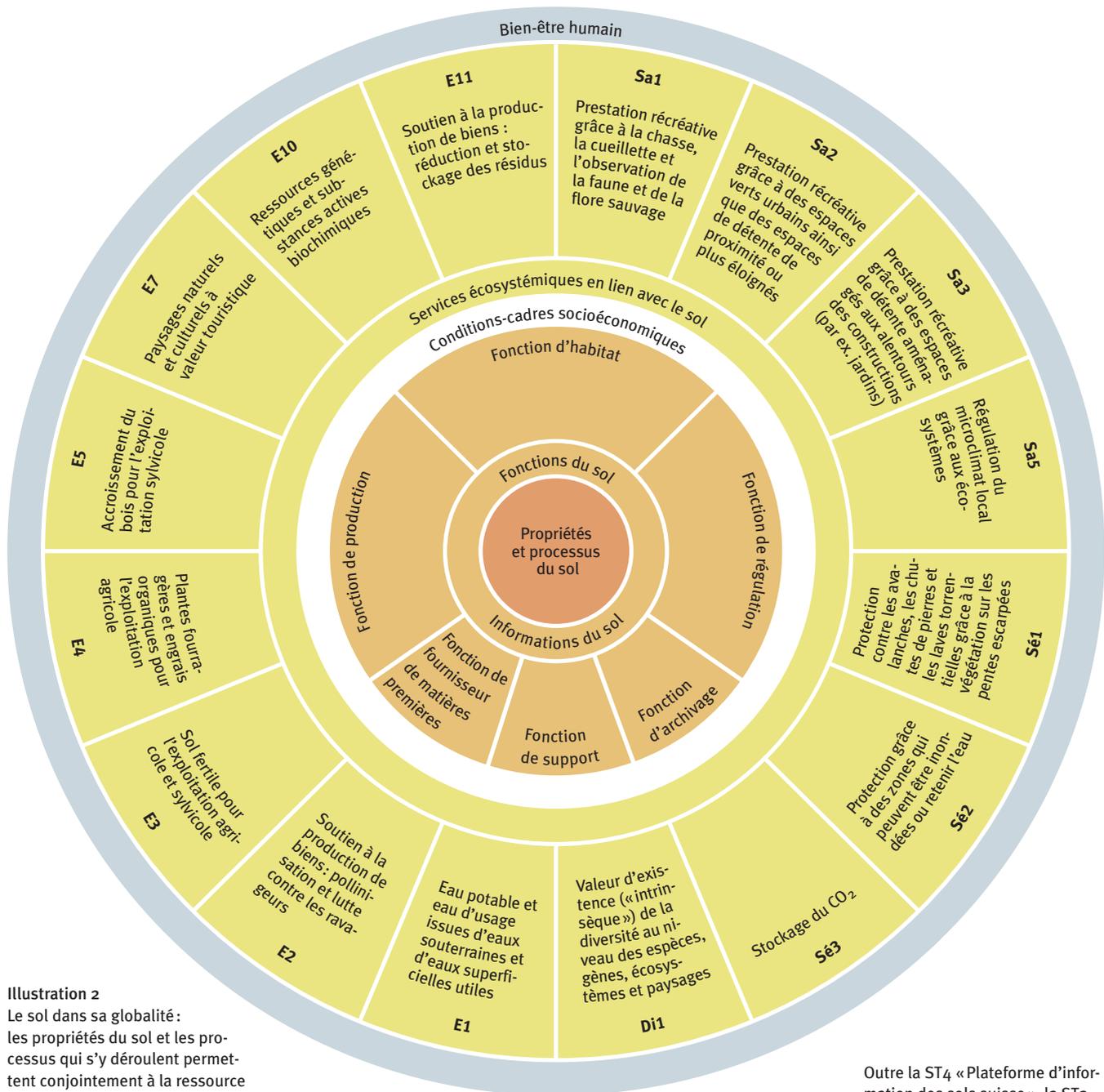


Illustration 2
 Le sol dans sa globalité : les propriétés du sol et les processus qui s’y déroulent permettent conjointement à la ressource sol de fournir les fonctions et les services pertinents pour la société et l’écosystème.

Adaptée selon¹⁴⁷

Outre la ST4 « Plateforme d’information des sols suisse », la ST3 « Un agenda du sol pour l’aménagement du territoire » recourt également à cette répartition des fonctions et des SES du sol.

représentent par conséquent les services fournis par le sol revêtant une importance centrale pour la société. Le projet de stratégie du sol élaboré par la Confédération⁴ mentionne six fonctions du sol (ill. 2, p. 17) qui doivent être protégées et qui contribuent directement ou indirectement à 16 SES au total⁵.

1.3 Des informations pédologiques pour utiliser et protéger la ressource sol

Il est uniquement possible d'établir des déclarations sur la qualité et les SES de sites spécifiques si des données pédologiques sont mises à disposition au moyen d'une grille de lecture spatiale adaptée. Il importe à cet égard que les propriétés et valeurs relevées sur le terrain – teneur en humus et en argile, constitution du sol, profondeur, pierrosité, structure de l'agrégat, volume des pores et régime hydrique – y soient intégrées. Ces informations permettent d'évaluer la multifonctionnalité des sols qui peut par suite être plus facilement prise en considération dans les différents domaines politiques. Le développement territorial est ainsi en mesure d'identifier les sols sur lesquels il convient de renoncer à construire et de mieux appréhender comment coordonner le développement du milieu bâti et des infrastructures afin de préserver les ressources. Pour l'instant, la qualité du sol n'est qu'à peine prise en compte dans l'aménagement du territoire. De son côté, l'agriculture aurait également fort besoin de disposer de connaissances supplémentaires: les informations du sol permettent, par exemple, d'orienter avec justesse le mode et l'intensité de l'exploitation – utilisation de machines, de pesticides et d'engrais de ferme ou minéraux – vers une utilisation durable.

1.4 Déficits en matière de sécurité alimentaire

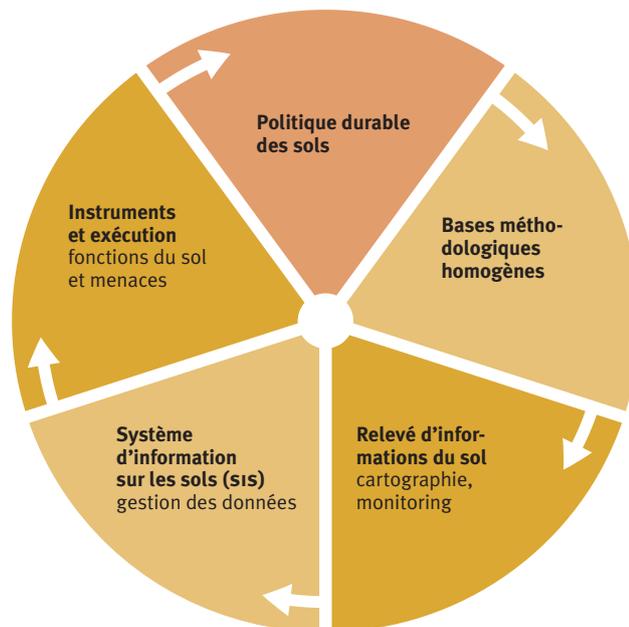
90% des denrées alimentaires proviennent directement ou indirectement du sol. Les performances des sols pour la production alimentaire se mesurent à l'indice de leur fertilité, qui est caractérisable au moyen d'informations pédologiques et doit être garantie par une utilisation durable et respectueuse de l'environnement. En Suisse, la production de denrées alimentaires et la ressource sol sont néanmoins soumises à une pression quantitative, car le taux d'autoapprovisionnement du pays est inférieur à la moyenne européenne et mondiale (ill. 3, p. 19). La Suisse ne dispose que de 350 m² de terres arables par habitant, et au total de seulement 1300 m² de terres utilisées à des fins agricoles⁶, ce qui la place loin derrière les autres pays européens. Du fait de la croissance démographique et du développement du milieu bâti, les surfaces disponibles par habitant pour les cultures ne cessent de régresser en Suisse⁷, et l'on enregistre une évolution similaire sur l'ensemble de la Planète^{8,9}.

Des conflits d'utilisation spatiale apparaissent non seulement à l'échelle régionale, mais aussi au niveau global. Sur le plan international, la lutte pour les droits fonciers s'intensifie. En 2016, près de 500 cas en provenance de 78 pays, dans lesquels des investisseurs privés ou des institutions étatiques ont acquis ou loué des terres agricoles à l'étranger, ont ainsi été enregistrés (Projets ACCAPAREMENT DES TERRES et DÉCISIONS QUANT À L'UTILISATION DES SOLS du PNR 68). Les surfaces faisant l'objet de ces négociations représentent 30 millions d'hectares de terres agricoles¹⁰.

1.5 Des surfaces d'assolement insuffisantes

Entre 400 000 et 555 000 hectares de terres arables fertiles sont nécessaires pour assurer l'approvisionnement de la Suisse¹¹. Cette superficie correspond approximativement aux près de 440 000 hectares qui sont définis dans le «Plan sectoriel des surfaces d'assolement (PS SDA) de la Confédération» et qui doivent être protégés par l'intermédiaire de contingents répartis entre les cantons. La surface protégée est ainsi équivalente à 700 m² de terres arables par personne. Diverses études démontrent cependant que, pour assurer l'alimentation d'un habitant d'Europe occidentale, il faut compter entre 1400 et 2100 m² de terres agricoles. Du fait de leurs habitudes alimentaires, les Suisses accaparent à titre individuel près de 1800 m² de terres agricoles¹², soit une surface presque trois fois supérieure à celle protégée par le PS SDA.

Illustration 3
Informations du sol en tant qu'éléments du cycle de création de valeur d'une politique durable des sols. Seules les informations du sol intégrées à un cycle fermé peuvent être valorisées en vue de décisions politiques.



Le fait que tous les sols fertiles encore disponibles s'avèrent indispensables pour garantir la sécurité alimentaire de la Suisse constitue donc une évidence. L'utilisation de la ressource sol doit par conséquent faire l'objet d'une conception plus durable et le déficit en informations du sol relatives à des utilisations spécifiques doit être comblé. La nécessité de prendre des mesures a été reconnue par la Confédération. L'Office fédéral de l'agriculture (OFAG) constate dans un rapport consacré à la perte de terres agricoles que les sols les plus fertiles doivent être préservés pour les futures générations et exploités durablement⁶. Le rapport met parallèlement en exergue le manque de «bases pédologiques» nécessaires à la détermination des qualités du sol. Des connaissances lacunaires et un taux de couverture insuffisant des données pédologiques qualitatives sont également mentionnés dans le document de discussion «Agriculture et filière alimentaire 2025» élaboré par l'OFAG¹³.

1.6 Le cycle de création de valeur des informations du sol

La sécurité alimentaire et une politique durable des sols requièrent que les différentes exigences d'utilisation puissent être gérées et évaluées avec justesse au niveau politique. D'autres domaines, tant politiques que préventifs, comme la protection du climat, la prévention des crues, l'alimentation en eau, la foresterie et la biodiversité, entretiennent un rapport étroit et immédiat avec la ressource sol. Ces missions publiques ne sauraient être menées à bien de manière efficace et ciblée si des informations spécifiques sur les propriétés des sols et leur évolution temporelle ne sont pas mises à disposition à grande échelle.

Les informations du sol sont recueillies grâce à des relevés cartographiques. Ceux-ci s'effectuent généralement en une seule fois et fournissent des données sur la qualité présentée par les sols à différentes profondeurs (profils pédologiques verticaux et forages) ainsi que sur d'autres caractéristiques importantes nécessaires à une utilisation durable du sol. Les informations du sol englobent toutefois aussi des données résultant de campagnes d'analyse spécifiques (par ex. relevés des teneurs en éléments fertilisants ou en polluants) ou issues de réseaux de mesure des sols. En Suisse, les bases de données disponibles apparaissent néanmoins insuffisantes en ce qui concerne la majorité des sols agricoles. Seul approximativement un tiers des surfaces cultivées a pour l'instant bénéficié d'une cartographie pédologique (point 2.3, p. 39). La plupart des relevés réalisés datent par ailleurs de plusieurs décennies, si bien qu'une partie des informations du sol – comme la teneur en humus ou le régime hydrique – ne sont plus significatives. Par rapport aux autres pays européens, les informations du sol dont dispose la Suisse

sont lacunaires. En tant qu'éléments d'un cycle fermé de création de valeur et que base fondamentale d'une politique durable des sols, les informations du sol revêtent pourtant une utilité sociale élevée à long terme (ill. 3, p. 19).

Des bases méthodologiques communes constituent le point de départ du cycle de création de valeur. La collecte des données, la classification des sols et l'analyse de leurs propriétés doivent répondre à des normes et à des références uniformisées lorsque des relevés de l'état des sols sont effectués au plan national ou régional. Faute de bases méthodologiques homogènes, tel n'est actuellement pas le cas en Suisse. Lorsqu'elles sont relevées de manière uniforme, les informations spatio-temporelles recueillies s'inscrivent dans le cadre d'un système d'information sur les sols (sis) cantonal et national qui a pour but de les mettre à disposition de divers utilisateurs à des fins d'évaluation, d'application et d'interprétation ultérieures. Plaque tournante d'un échange efficient et standardisé, un sis garantit la qualité et la comparabilité des informations du

Illustration 4
Dimensions du cycle de création de valeur des informations du sol devant être coordonnées.



sol. D'un point de vue global, il convient de coordonner différentes dimensions et de les intégrer dans un cycle de création de valeur (ill. 4, p. 20), afin qu'il en résulte un cercle vertueux pour les domaines politiques et exécutifs.

Dans la plupart des domaines spécialisés, l'exécution du droit environnemental est organisée de manière fédéraliste et relève des cantons. En ce qui concerne la protection du sol, les cantons sont principalement responsables des mesures en lien avec son utilisation durable et sa préservation. A l'heure actuelle, seuls quelques cantons disposent de suffisamment d'informations du sol pour pouvoir s'acquitter de cette mission. Ce n'est que lorsque des informations du sol seront mises à disposition au plan national et complétées par des cartes fondamentales spécifiques que le cycle de création de valeur pourra être clos.

Des dispositifs auxiliaires permettant l'harmonisation, la gestion et le transfert des données pédologiques sont indispensables. La plaque tournante de données devient ainsi la pièce maîtresse du cycle de création de valeur, et sert tout autant à l'exécution qu'à des applications spécifiques: modélisations environnementales ou évaluations. Au final, il devient alors possible de formuler des recommandations d'action pour une politique du sol durable. Le cycle se réinitialise dès lors que se manifeste le besoin de disposer d'informations du sol complémentaires ou approfondies. Il encourage ainsi le jeu de l'offre et de la demande d'informations et améliore parallèlement la compréhension et la communication nécessaires aux processus décisionnels relevant de la politique du sol (ST5 du PNR 68 «Vers une politique durable du sol»⁷).

1.7 Protection du sol : état d'urgence en matière d'exécution

Une analyse approfondie réalisée par l'Office fédéral de l'environnement (OFEV) sur les déficits d'exécution observés dans le domaine environnemental révèle que le «sol» constitue, parmi les 19 secteurs examinés, celui qui présente les carences les plus importantes en matière d'exécution¹⁴. Pas moins de 15 cantons ont indiqué qu'ils n'étaient pas, ou seulement partiellement, en mesure de mener à bien les missions prescrites par la loi.

Ce manquement s'explique principalement par le manque de ressources (informations, finances, personnel) et par la résistance des groupes d'intérêts et des responsables politiques. Les ressources des services cantonaux de protection des sols sont très limitées et nombreux sont ceux qui ne disposent que d'un taux d'occupation inférieur à 50% pour mener à bien les tâches exigées par la protection du sol¹⁵. Au niveau de la Confédération, en particulier au sein de l'OFEV, les ressources humaines allouées au domaine thématique du «sol» sont également très limitées par rapport à d'autres thèmes environnementaux. L'étude de l'OFEV parvient à la conclusion que ce déficit d'exécution, qui concerne particulièrement le thème du «sol»¹⁶, résulte d'un manque d'instruments et de défauts d'organisation. Thème transversal par définition, son exécution exige que des efforts particuliers soient entrepris à l'échelon cantonal afin d'identifier les interfaces et d'assurer la coordination nécessaire. Quelques cantons ont par conséquent établi des plateformes d'échange entre les services compétents. Dans le canton de Berne, le service du sol est chargé de la coordination interoffices et des tâches d'exécution correspondantes¹⁷.

2.1 Demande en informations du sol et en instruments

Le cycle de création de valeur des informations du sol met en évidence que de nombreux intérêts d'utilisation et besoins de protection dépendent d'informations du sol fiables et que l'exploitation de ces mêmes données génère une importante valeur ajoutée en matière de décisions politiques¹⁸. Les constats suivants valent en principe pour toute pesée adéquate des intérêts : les conflits d'utilisation peuvent être évités et les conséquences négatives réduites lorsque des informations qualitatives et quantitatives pertinentes sont disponibles.

Le tableau 1 (p. 23) présente les principaux domaines thématiques dans lesquels des informations du sol sont relevées. La diversité des objectifs poursuivis et des méthodes utilisées reflète les intérêts très variés dont relève la collecte des données pédologiques. Le prélèvement et la préparation des échantillons, le choix des pro-

priétés analysées, les méthodes et les volumes de mesure s'avèrent par conséquent tout aussi hétérogènes. Si le relevé des informations du sol ne répond pas à des standards bien établis, l'évaluation des données entre différents relevés n'est plus réalisable que dans certaines conditions spécifiques, quand elle n'est pas tout bonnement impossible.

Différentes études ont permis d'appréhender la diversité des besoins et des intérêts des utilisateurs potentiels, des services des sols et des représentants de ces groupes²⁰⁻²². Une enquête réalisée auprès des responsables des projets de recherche du PNR 68 a par ailleurs permis de déterminer plus précisément les besoins en informations du sol et la valeur ajoutée que générerait la mise à disposition de données pédologiques étendues. Le tableau 2 (p. 24-25) offre un aperçu des principales parties prenantes souhaitant disposer d'informations du sol au plan national.

Les besoins spécifiques en informations pédologiques peuvent se négocier entre demandeurs et scientifiques. Les premiers n'ont souvent qu'une vision floue de la manière dont les informations du sol pourraient contribuer à la résolution de leurs problèmes et ne savent pas toujours quelles sont les cartes d'application axées sur les besoins des utilisateurs qui sont disponibles ou qu'ils pourraient générer par eux-mêmes. Les enquêtes effectuées auprès des groupes cibles ont mis en évidence qu'ils s'intéressaient dans l'ensemble beaucoup moins aux données primaires de la cartographie des sols qu'aux ouvrages cartographiques qui en sont dérivés. Ils souhaitent plutôt disposer de cartes thématiques compréhensibles, élaborées de manière à permettre une application interdisciplinaire, relatives à la capacité de rétention d'eau ou à l'aptitude culturale

Les informations du sol constituent l'ensemble des données pédologiques, des paramètres, des cartes et des supports d'information qui servent à relever, à évaluer et à interpréter les propriétés spatio-temporelles des sols.

Les données pédologiques sont des propriétés des sols qui peuvent être directement mesurées ou estimées (par ex. teneur en argile). Elles peuvent être utilisées telles quelles afin de décrire des propriétés des sols ou devoir être agrégées en caractéristiques pédologiques dérivées¹.

Les caractéristiques pédologiques constituent généralement des paramètres dérivés qui servent à décrire les propriétés des sols (par ex. profondeur utilisable par les plantes).

Les propriétés du sol décrivent la nature du sol. Elles sont généralement exprimées au moyen de caractéristiques pédologiques. La compacité ou la perméabilité à l'eau en constituent des exemples. Les propriétés du sol donnent des indications sur la manière dont certains processus s'y déroulent. La perméabilité indique ainsi la vitesse à laquelle l'eau peut s'infiltrer dans le sol¹.

Tableau 1
Domaines thématiques dans lesquels des informations du sol sont relevées (liste non exhaustive).

Domaine thématique	Informations du sol (sélection)
Cartographie des sols	Relevé de données pédologiques fondamentales, de superficies, de mesures destinées à l'évaluation des propriétés des sols en laboratoire, de données de profil et de cartes thématiques
Analyse des sols	Relevé de certaines propriétés chimiques, physiques ou biologiques d'une unité spatiale, par exemple, dans le cadre d'une analyse des polluants au sens de l'OSol ¹⁹
Evaluation des sols	Evaluation du rendement potentiel et, par suite, de la valeur (côte) des terrains agricoles
Monitoring	Relevé répété de propriétés des sols sur des sites d'observation sélectionnés afin de suivre leur évolution dans le temps
Recherche	Relevé de propriétés des sols spécifiques (par ex. teneur en éléments fertilisants ou en humus pour les cultures) et modélisation des processus pédologiques via des essais de terrain
Conseil agricole	Relevé des propriétés des sols et des concentrations en éléments fertilisants des parcelles utilisées dans l'agriculture
Sites pollués	Analyse locale des polluants sur certaines parcelles
Expertises pédologiques	Expertises, par exemple, pour les améliorations foncières, la réhabilitation des zones de tir, la compensation, les analyses EIE

des sols analysés, ou bien de cartes des risques mettant en lumière la sensibilité des sols à l'imperméabilisation (tab 2, p. 24–25)²⁰. Les cartes représentant les fonctions des sols respectivement évaluées comptent parmi les produits informatifs, et parfois novateurs, orientés vers les utilisateurs qui pourraient servir à la pesée des intérêts relevant de l'aménagement du territoire (point 2.6, p. 53).

Le dialogue entre les parties prenantes et les experts en pédologie revêt dans ce contexte une importance primordiale. Il permet en effet d'estimer les besoins en informations du sol et de mieux adapter à la demande l'offre de cartes pertinentes axées sur l'application. Toute une série d'évaluations et de caractéristiques pédologiques dérivées peuvent ainsi être prises en compte lors de l'élaboration de cartes des risques naturels ou de protection

contre les crues. En ce sens, un projet de cartographie ne s'achève pas sur la réalisation d'une carte des sols, mais constitue au contraire le point de départ à partir duquel les informations du sol pourront être traitées et mises activement à disposition de groupes cibles même non spécialisés.

Afin de soutenir l'utilisation durable du sol, il convient par conséquent d'instituer une instance supérieure qui chapeaute le dialogue engagé avec les différentes parties prenantes. Dans le domaine de la géologie, l'Office fédéral de topographie (swisstopo) se charge de la saisie, de l'analyse, de l'archivage et de la mise à disposition des données topographiques nationales et en dérive des bases décisionnelles importantes pour les parties prenantes en tant que centre de compétence de la Confédération. D'autres disciplines disposent également de plateformes centrali-

Intérêts d'utilisation	Besoin d'informations, questions sélectionnées en rapport avec les informations du sol
Société	Sécurité d'approvisionnement
Agriculture	Mise en œuvre des Objectifs environnementaux pour l'agriculture (OEA), exploitation durable des sols, fertilisation, travail du sol, choix des cultures, apport d'intrants adaptés au site, système de paiement direct et Prestations écologiques requises (PER), mise en œuvre des Données de base pour la fumure (DBF), programmes pour l'utilisation efficace des ressources naturelles, optimisation des moyens de production
Aménagement du territoire	Préservation des terres arables fertiles, bases de planification uniformes pour le PS SDA, prise en considération de la qualité du sol dans le développement territorial, conceptions d'évolution du paysage (CEP)
Exécution de la protection du sol	Protection du sol au sens de l'OSol ¹⁹ : prévention des atteintes portées aux sols, surveillance des sols, réseau de mesure de l'humidité du sol, compensation de SDA, protection du sol lors de la construction, dépôts et remblais, réhabilitations, améliorations foncières, sols anthropiques
Protection de la nature et biodiversité	Délimitation de surfaces dédiées à la protection de la nature et de zones tampons, préservation d'une flore et d'une faune diversifiées
Protection des eaux/ Approvisionnement en eau potable	Protection des eaux souterraines : délimitation de surfaces et de bassins versants dotés de sols qui filtrent et dégradent suffisamment les fertilisants et les polluants
Protection du climat/ Inventaire des gaz à effet de serre	Le sol en tant que puits et source de carbone et de gaz à effet climatique, devoir d'information conformément au Protocole de Kyoto, mesures dans le domaine de la foresterie et de l'utilisation des terres (LULUCF: Land Use, Land-Use Change and Forestry)
Risques naturels/ Protections contre les crues	Délimitation de zones à risques vis-à-vis des crues, glissements de terrain, laves torrentielles, etc., infiltration d'eau dans les sols, préservation des couloirs naturels, prévention des glissements de terrain
Foresterie	Choix des essences, planification des stocks, mesures sylvicoles, protection contre les atteintes des sols dues au compactage ou à l'acidification
Améliorations foncières et drainages	Optimisation des fonctions de production du sol, amélioration du régime hydrique et de la structure des sols, restauration et entretien des systèmes de drainage, techniques de culture, remaniements parcellaires et estimation des terres
Hydrologie	Régime hydrique : le sol dans le contexte des précipitations, neige et glaciers, évaporation, cours d'eau et lacs, régime hydrique des nappes phréatiques et modélisation des processus d'écoulement, réseaux de mesures hydrologiques
Génie hydraulique	Réhabilitation des cours d'eau, protection contre les inondations, bassins de rétention pour les fortes précipitations, barrages et changements climatiques, irrigation des cultures
Science et recherche/ Pédologie	Sol en tant qu'interface de l'écosystème, par exemple cycle de la matière dans l'environnement, modèles du système environnemental, de pronostics, d'utilisation des sols, connaissances pédologiques
Archéologie	Archives de l'histoire culturelle : préservation des sites, découvertes sur les événements historiques et les pièces archéologiques
Observation environnementale	Monitoring, élaboration de rapports environnementaux, collaboration internationale, données pédologiques, système d'information sur les sols, portail d'information, indicateurs de durabilité, information du public

Tableau 2
Intérêts d'utilisation, parties prenantes et questions sélectionnées en rapport avec les informations du sol.

Tiré de²⁰⁻²² ;
enquête auprès des responsables de projets du PNR 68, recherches propres.

Exemples de supports d'information et de cartes thématiques	Principales parties prenantes
Cartes des classes d'aptitude culturale des sols (CAC), de la capacité de rétention d'eau, de la profondeur, pour l'irrigation	– Exécution/Gestion : Office fédéral du développement territorial (ARE), services cantonaux pour le développement territorial et l'agriculture
Capacité de rétention de l'eau, teneur du sol en eau, cartes des risques d'érosion et de compaction, teneur en nutriment et lessivage, risques de rejets des pesticides dans les cours d'eau, cartes relatives à la filtration et à la dégradation des éléments fertilisants et des polluants, cartes des risques de rejets diffus de fertilisants et de polluants dans les cours d'eau	– Exécution/Gestion : OFAG, OFEV, offices cantonaux de l'agriculture et de la protection des eaux – Secteur privé/pratique : services de consultation et associations agricoles, agriculteurs – Science : universités, hautes écoles spécialisées, établissements et institutions de recherche
Carte des classes d'aptitude culturale (CAC) pour les plans directeurs cantonaux et les plans d'affectation	– Exécution/Gestion : ARE, services cantonaux pour le développement territorial, communes
Cartes des sols, cartes des CAC, cartes des sols anthropiques et dégradés, cartes des pollutions des sols et cartes des risques, cartes d'application pour une utilisation durable	– Exécution/Gestion : OFAG, OFEV, services cantonaux pour l'agriculture, la protection du sol et la protection de la nature
Cartes des sites secs et humides, cartes des sols organiques, superficiels ou pauvres en nutriments	– Exécution/Gestion : OFEV, services cantonaux pour la protection de la nature – Secteur privé/pratique : associations de protection de l'environnement, bureaux de planification – Recherche/Science : universités, établissements et institutions de recherche
Cartes des fonctions de régulation des sols, risques de rejet de polluants et de fertilisants dans les cours d'eau	– Exécution/Gestion : OFEV, OFAG, services cantonaux de protection des eaux – Secteur privé/pratique : Société Suisse de l'Industrie du Gaz et des Eaux (SSIGE), bureaux d'ingénierie et de planification
Carte des teneurs et réserves de carbone des sols, carte des sols organiques	– Exécution/Gestion : OFEV, OFAG – Secteur privé/pratique : associations professionnelles, bureaux d'ingénierie – Recherche/Science : universités, établissements et institutions de recherche
Cartes de la profondeur, de la texture, du taux d'infiltration, de la capacité de rétention d'eau, du taux d'humidité des sols	– Exécution/Gestion : OFEV, services cantonaux de génie hydraulique, Plateforme nationale Dangers naturels (PLANAT) – Secteur privé/pratique : bureaux d'ingénierie et de planification – Recherche/Science : universités, établissements et institutions de recherche
Cartes de la profondeur, de la capacité de rétention des nutriments et de l'eau, de la teneur en eau des sols, des formes d'humus et de la profondeur de la roche calcaire	– Exécution/Gestion : OFEV, services forestiers cantonaux – Secteur privé/pratique : Société forestière suisse, association des Entrepreneurs Forestiers Suisses – Recherche/Science : universités, établissements et institutions de recherche, Inventaire forestier national (IFN)
Cartes des groupes de régime hydrique, de la texture, des agrégats, de la teneur en eau, du volume des pores, de la profondeur, de la pierrosité des sols	– Exécution/Gestion : OFAG, OFEV, services cantonaux, communes – Secteur privé/pratique : syndicats d'amélioration foncière, agriculteurs, associations agricoles
Taux d'infiltration, teneur en eau et capacité de rétention d'eau des sols	– Exécution/Gestion : OFEV, services cantonaux, offices de protection des eaux – Secteur privé/pratique : SSIGE, bureaux d'ingénierie et de planification
Carte de la qualité, des aptitudes culturales, de la texture, du taux d'infiltration et de la capacité de rétention d'eau du sol	– Exécution/Gestion : OFEV, services cantonaux – Secteur privé/pratique : bureaux d'ingénierie et de planification – Recherche/Science : universités
Carte des propriétés du sol pour la modélisation du climat ou des pollutions diffuses des cours d'eau	– Exécution/Gestion : OFEV, services cantonaux – Secteur privé/pratique : bureaux d'ingénierie et de planification – Recherche/Science : universités, hautes écoles spécialisées, établissements et institutions de recherche
Carte des sites archéologiques	– Exécution/Gestion : services cantonaux, bureaux de communication – Secteur privé/pratique : public – Recherche/Science : universités, institutions de recherche
Indicateurs d'états et de tendances quant à la qualité	– Exécution/Gestion : OFEV, services cantonaux pour la protection du sol – Secteur privé/pratique : associations de protection de l'environnement, public

sées pour l'échange d'informations et de données. Tel est par exemple le cas pour ce qui est du climat (Center for Climate Systems Modeling, *C2SM*), des risques naturels (Plateforme nationale Dangers naturels, *PLANAT*) ou de la biodiversité (Système d'information sur la biodiversité en Suisse, *SIB*). Pour le moment, aucun service similaire n'existe pour le sol.

Traitement des informations adapté aux parties prenantes

Les informations du sol doivent être traitées par thème et diffusées activement au sein des groupes cibles non spécialisés. Une sensibilisation accrue et une demande plus élevée peuvent uniquement être escomptées lorsque les acteurs concernés ont pleinement conscience des évaluations thématiques qu'il est possible de générer à partir des données relevées. Même si elles étaient disponibles, il est probable que des cartes d'application trouveraient difficilement leur place dans la pratique professionnelle des ingénieurs, des architectes et des constructeurs si leur formation n'intégrait pas la transmission de connaissances pédologiques ainsi qu'une expérience pratique des thèmes relatifs au sol. Pour qu'une utilisation durable de la ressource sol puisse faire l'objet d'une mise en œuvre effective, il ne suffit donc pas de procéder à un traitement adéquat des informations du sol : il importe également que le savoir disponible soit transmis et activement transféré aux parties prenantes.

Ce point est d'autant plus important que le dialogue entretenu entre les spécialistes des sciences du sol et ceux des autres disciplines se heurte souvent à des difficultés de traduction et d'interprétation²¹. La pédologie n'est pas étrangère à cette situation, car l'on observe un manque de catalogues de traduction et d'information (catalogues de métadonnées) compréhensibles qui pourraient être utilisés par des groupes cibles élargis.

Activités de la Confédération en matière de politique du sol

L'échelon politique décisionnel, domaine dans lequel les besoins ont précisément progressé au cours des années passées, fait également partie intégrante du cycle de création de valeur précédemment mentionné. De nombreuses stratégies, interventions parlementaires, initiatives populaires et révisions législatives dont il a été débattu dépendaient directement ou indirectement de la disponibilité d'informations du sol étendues. Le sol n'est certes que rarement au centre des projets politiques nationaux ou cantonaux en lien avec la perte des terres agricoles, la préservation des *sDA* ou la protection contre les crues, mais sa multifonctionnalité en fait néanmoins un axe essentiel. Disposer d'informations du sol au plan national apparaît comme une nécessité évidente. La ST5 du PNR 68 «Vers une politique durable du sol» offre un aperçu global des activités politiques pertinentes en matière de sol.

La sécurité alimentaire et la protection des terres agricoles et des *sDA* constituent des thèmes importants de l'agenda politique actuel. Face aux efforts internationaux entrepris afin de sécuriser l'approvisionnement, la sauvegarde des terres agricoles indigènes devrait encore gagner en importance⁶. Suite à l'acceptation marquée de l'initiative populaire «Pour la sécurité alimentaire» en septembre 2017, l'article 104a de la Constitution fédérale (Cst.) sera modifié. Sa révision mentionne cinq domaines thématiques, dont deux se rapportent à l'utilisation durable du sol et à l'obligation de protéger les terres arables : la préservation des bases de la production agricole, notamment des

Sols adaptés à toutes les cultures



Sol brun calcaire alluvial
Sol sur dépôts limoneux dans d'anciennes zones inondables de fleuves



Sol brun
Sol sur moraine de fond dans une zone morainique faiblement vallonnée



Sol brun lessivé
Sol sur gravier en plaine



Sol brun
Sol sur loess (dépôts éoliens de la période post-glaciaire) dans une pente faiblement inclinée

Sols moyennement adaptés à la culture



Fluvisol
Sol sur dépôts sableux dans d'anciennes zones inondables de fleuves



Régosol
Sol sur couronne morainique



Sol brun
Sol sur calcaire dans le Jura



Sol brun lessivé
Sol sur gravier dans une plaine

Sols mal adaptés ou inadaptés à la culture

Illustration 5

Types de sols adaptés et inadaptés à la production de denrées alimentaires. Les sols fournissent plus de 90 % des denrées alimentaires et présentent des propriétés très variables. L'aptitude culturale des sols peut être déterminée au moyen d'informations du sol²⁶.

Source: U. Zihlmann, Agroscope.



Pseudogley
Sol sur terrasse marneuse dans le Jura



Pseudogley
Sol sur dépôt d'argile marine dans une plaine (ancien fond marin)



Gley coloré
Sol drainé sur alluvions argileux dans une vallée



Marais
Sol drainé sur tourbe sur moraine de fond imperméable dans une cuvette

Fertilité du sol et système d'alimentation durable

Une étude prospective de l'EPF Zurich²⁵ réalisée en 2015 et consacrée à la « Recherche pour un système alimentaire durable suisse » recense les tendances mondiales, leurs origines, mais aussi les défis majeurs qui seront posés au système alimentaire dans les vingt à trente prochaines années. Il a ainsi été possible de dégager les questions de recherche les plus importantes au niveau mondial en matière de sécurité alimentaire et nutritionnelle élevée, de qualité environnementale et de bien-être social. Les thèmes « santé et fertilité des sols dans les systèmes de production agricoles » suivis par « résistance aux antibiotiques », et « efficacité de l'utilisation de l'énergie dans les chaînes de valeur des produits alimentaires » arrivaient en tête du top ten des sujets de recherche. Selon cette étude, la « recherche sur l'utilisation efficiente des ressources naturelles telles que les terres agricoles, le sol, l'eau, les nutriments et la biodiversité à tous les niveaux (écosystèmes, espèces, ressources génétiques), mais aussi sur leur protection, leur valorisation et leur restauration » a été identifiée comme essentielle.

terres agricoles, et une production de denrées alimentaires adaptée aux conditions locales et utilisant les ressources de manière efficiente (art. 104a. al. a et b Cst.) (ill. 5, p. 27). Par terres agricoles, on entend les surfaces et les sols exploités dans l'agriculture. Le message du Conseil fédéral mentionne entre autres les « surfaces agricoles les plus productives »²³.

Les Objectifs environnementaux pour l'agriculture (OEA)²⁴ concrétisent les besoins d'intervention et formulent des directives quant aux apports de polluants (métaux lourds), à l'érosion et à la compaction des sols. A l'avenir, la préservation de la biodiversité doit également constituer un objectif à part entière²⁴. D'autres risques menaçant le sol, comme la perte d'humus ou les apports de polluants organiques persistants (par ex. pesticides, médicaments animaux), ne sont à l'inverse pas encore pris en compte dans les OEA. Comme le démontre leur état de réalisation, les besoins en informations du sol étendues sont extrêmement importants. Entre 2008 et 2016, soit les objectifs re-

latifs aux polluants, à la compaction et à l'érosion n'ont pas été atteints, soit le manque d'informations disponibles à ce sujet rend toute déclaration impossible²³. Dans les domaines politiques que constituent la sécurité alimentaire et l'agriculture, il est probable que le besoin d'informations continuera de progresser, tant en ce qui concerne la législation, que l'exécution ou la pratique.

Domaine politique « Protection des eaux » : le sol en tant que filtre et tampon

Les services des eaux régionaux souhaitent pouvoir mettre à disposition de la population une eau potable et saine sans devoir procéder à des traitements lourds. Les zones de protection des nappes phréatiques protègent par conséquent les sols qui filtrent naturellement et gratuitement les eaux souterraines et d'infiltration (ill. 6, p. 29). Un hectare de sol est en mesure de former plus d'un million de litres d'eau souterraine par an. Pour atteindre un tel effet de filtrage, de stockage et de dégradation, ces sols doivent néanmoins s'avérer très performants. Des fertilisants et des polluants comme l'azote (N) peuvent être apportés dans le sol par le biais des engrais de ferme. Les sols profonds présentant une bonne capacité d'absorption retiennent ces substances qui alimentent les plantes cultivées. Les eaux d'infiltration restent ainsi largement préservées des impuretés et des bactéries qui pourraient nuire à la santé humaine.

La nécessité que soient menées des actions politico-environnementales se fait également de plus en plus fortement sentir dans ce domaine. Les eaux souterraines et de surface sont trop souvent polluées par des nitrates et des pesticides²⁷⁻²⁹. Le lessivage et la lixiviation des fertilisants et des polluants (par ex. herbicides) des sols vers les cours et les nappes d'eau font

l'objet de nombreux projets de mesure et d'analyse de la Confédération (Observation nationale de la qualité des eaux de surface – NAWA, Observation nationale des eaux souterraines – NAQUA). Pour mieux appréhender les risques liés aux intrants, il serait néanmoins nécessaire de disposer d'informations étendues sur les caractéristiques pédologiques spécifiques de chaque site³⁰. Ces données permettraient d'identifier les sols présentant des capacités restreintes de régulation des fertilisants et des polluants et de limiter ainsi la contamination des eaux souterraines et de surface grâce à une exploitation agricole respectueuse des conditions locales.

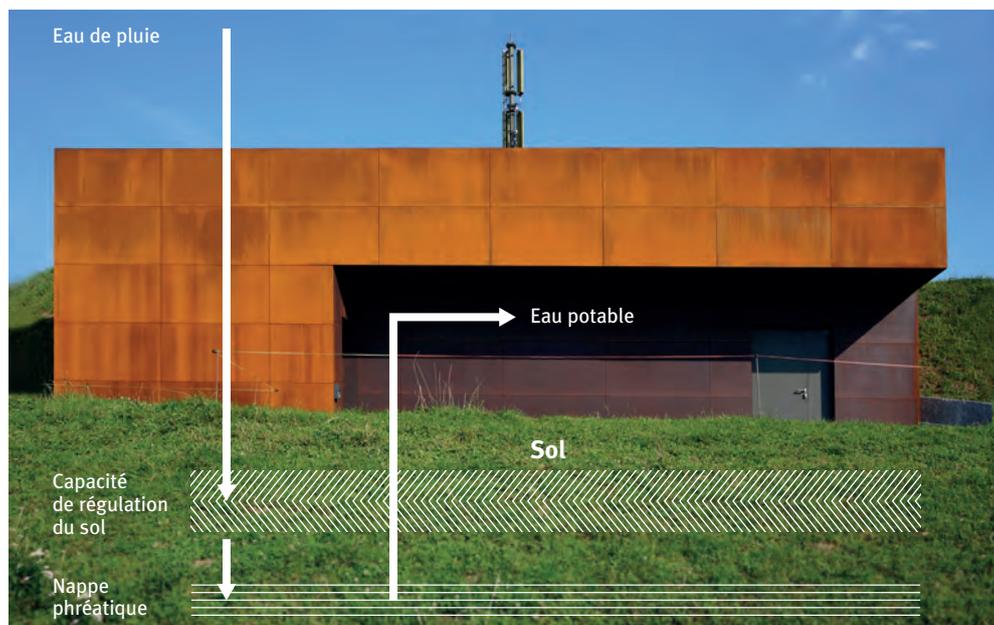
Dans le cadre des programmes mis en place, la loi sur la protection des eaux prévoit des mesures destinées à empêcher que les intrants agricoles ne viennent pol-

luer les eaux souterraines et de surface en raison du lessivage et du ruissellement. Les programmes initiés jusqu'à présent visent principalement à réduire la pollution de l'eau potable par les nitrates (état 2017: 31 projets). Les apports de produits phytosanitaires sont pour l'heure à l'origine de deux projets. Alors que de nombreuses analyses réalisées afin d'établir la teneur en pesticides des eaux, rares sont les études consacrées au rôle que joue le sol en tant que tampon, filtre et milieu de dégradation des pesticides³¹. Des informations exhaustives sur la fonction de régulation des sols apparaissent néanmoins essentielles pour qu'une solution complète et efficace puisse être trouvée aux problèmes que posent actuellement les fertilisants et les produits phytosanitaires pour la protection des eaux.

Illustration 6

Capacité de filtration des sols.
Les sols profonds et bien structurés retiennent les fertilisants et les polluants et permettent ainsi qu'une eau potable propre soit extraite des nappes phréatiques.

Source : A. Keller, Agroscope.



Domaine politique «Dangers naturels et protection contre les crues»: le sol en tant que réservoir d'eau

En matière de protection contre les crues, la prévention débute par la première mesure qui consiste à préserver les réservoirs d'eau naturels. Selon sa profondeur, un mètre carré de sol est en mesure de stocker plus de 300 litres d'eau. En cas de fortes précipitations, un sol bien structuré est capable d'absorber rapidement d'importantes quantités d'eau (infiltration) et de les retenir durant un certain laps de temps (rétention). Afin d'évaluer en détail les risques d'inondation et d'améliorer les mesures de protection, la pédologie est à même de fournir des modèles pronostiques sur le régime hydrique des sols et les paramètres hydrologiques pertinents, comme la perméabilité. A l'heure actuelle, de telles données ne sont que rarement modélisées afin d'évaluer les menaces de crues.

Domaine politique «Changement climatique»: le sol en tant que puits de carbone

Après les océans, les sols constituent le deuxième réservoir mondial de dioxyde de carbone. Ils en contiennent deux fois plus que l'atmosphère et presque cinq fois plus que la biomasse superficielle.

Dans sa stratégie d'adaptation au changement climatique, le Conseil fédéral souligne l'importance revêtue par la capacité de rétention et de stockage de l'eau du sol^{32, 33}. La «Stratégie Climat pour l'agriculture» de l'OFAG³⁴ estime actuellement que les changements climatiques influenceront sur les conditions de production agricole, en particulier en ce qui concerne l'assolement, la sélection des cultures et l'irrigation.

Sous l'effet du changement climatique, la capacité de rétention d'eau du sol joue

par conséquent un rôle tout aussi déterminant que la teneur en carbone de la substance organique du sol (sos, humus; ST2 du PNR 68 «Sol et environnement»). A l'échelle locale, le taux d'humidité du sol influence même de manière décisive la météorologie et le système climatique. Dans le cadre de l'inventaire des gaz à effet de serre (inventaire GES) de la Suisse, qui est intégré au rapport international annuel élaboré par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), des informations pédologiques sur la teneur en humus et les réserves de carbone des sols agricoles et forestiers sont relevées sur l'ensemble du territoire dans la catégorie «changement d'affectation des terres» (Land Use, Land-Use Change and Forestry, LULUCF).

Domaine politique «Biodiversité»: le sol en tant que pool génétique

La diversité biologique constitue une ressource essentielle pour la nature. Selon les estimations réalisées, un hectare de sol sain abrite plusieurs milliards de micro-organismes dont le poids vif représente jusqu'à 15 tonnes³⁵. Cette richesse bénéficie d'une reconnaissance croissante dans la pratique agricole – aussi bien en tant que facteur de production naturel qu'en tant qu'élément participant de l'équilibre écologique. D'innombrables organismes (faune du sol; ill. 7, p. 31) assurent la transformation des matières: la biomasse morte génère des nutriments qui viennent alimenter une nouvelle croissance. La «Stratégie Biodiversité Suisse»³⁶ et le plan d'action correspondant³⁷ visent également à préserver durablement la diversité du vivant abrité par le sol. La cartographie de sites particulièrement précieux écologiquement, comme les milieux humides ou les prairies sèches, pourrait dans ce contexte fournir des informations sur la fonction d'habitat des sols et leur bio-

diversité ainsi que des indications sur le futur développement de zones de biotopes proches de l'état naturel.

Domaine politique « Forêts »: enraciné dans le sol

Les surfaces boisées, qui couvrent près d'un tiers de la superficie de la Suisse, sont légalement protégées. Les exigences relatives à leur diversité fonctionnelle (fonctions protectrice, sociale et économique) sont également définies précisément dans la loi sur les forêts. Une gestion forestière optimisée de ces différentes fonctions englobe par conséquent tout aussi bien la sélection d'essences adaptées que la constitution d'un peuplement durablement stable et rentable. Les informations relatives au régime de l'eau et de la matière, à la profondeur ainsi qu'à la capacité de filtrage et au pouvoir tampon des sols forestiers constituent à ce titre d'import-

tantes bases de planification. La gestion, l'entretien et l'exploitation durable des forêts doivent également prendre en compte les informations du sol, entre autres afin d'estimer les risques de compactage lors de l'utilisation de machines d'un poids important. Par ailleurs, les émissions élevées d'azote entraînent une acidification des sols forestiers, mais les informations font aussi largement défaut dans ce domaine et seules quelques zones boisées ont jusqu'à présent été cartographiées (point 2.3, p. 39). Les profils de sol relevés par l'Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage (WSL) sur plus de 2000 sites permettent uniquement des affirmations ponctuelles. Ce déficit de connaissances concerne aussi les questions méthodologiques: les directives de cartographie des sols forestiers n'ont pas été actualisées depuis deux décennies.

Illustration 7

Exemples d'organismes vivant dans le sol, le milieu qui abrite la plus importante biodiversité. Cette faune constitue le moteur du cycle de la matière dans le sol³⁸. Entre 7,5 et 8 milliards d'organismes vivent dans une poignée de terre – autant que d'êtres humains sur la planète Terre.



Domaine politique «Protection préventive du sol»: éviter et réduire les risques

La protection préventive du sol englobe toutes les mesures directes et indirectes destinées à préserver les fonctions naturelles du sol dans leur intégralité et à long terme¹. La Confédération et les cantons ont élaboré à cette fin des principes directeurs et des concepts qui sont principalement destinés à protéger le sol de risques particuliers, mais qui traitent également de tâches diversifiées en lien avec le sol, qu'il s'agisse de projets d'aménagement du territoire (par ex. permis de construire, compensation des SDA, améliorations foncières), de constructions et de gestion des déchets (par ex. obligation de valorisation des déblais, dépôts, remblais et sols anthropiques) ou de pollution (par ex. sites contaminés ou susceptibles de l'être, aires de tir, jardins familiaux). Les nombreux rapports élaborés par les services cantonaux de protection du sol^{17, 39-42}, ainsi que les sites Internet très informatifs de la Conférence Suisse des chefs de services et offices cantonaux de protection de l'environnement (www.kvu.ch/fr) attestent de

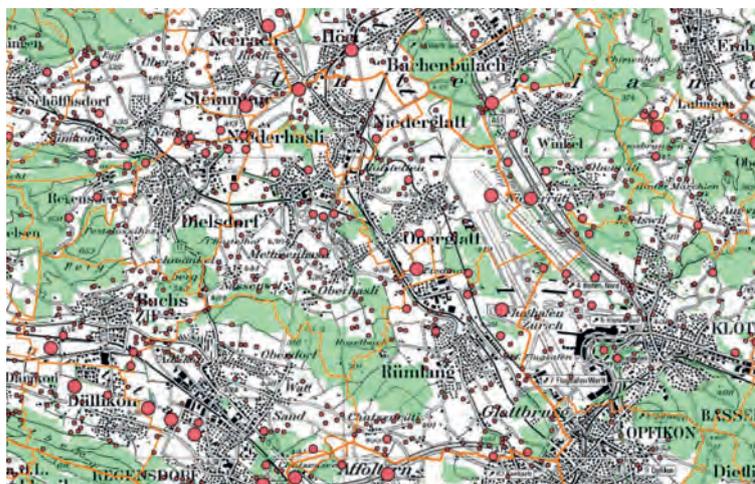
la diversité des thèmes pédologiques abordés au niveau de l'exécution cantonale. Les mesures de protection du sol concernent néanmoins différents domaines en matière de droit et d'exécution et induisent souvent des chevauchements et des contradictions¹⁴. De par leur nombre, les réglementations existantes représentent un défi pour les acteurs du sol comme pour les cantons chargés de leur mise en œuvre.

Les activités humaines modifient la constitution, la structure et la profondeur des sols dans les zones urbaines comme dans les espaces paysagers ouverts. Nombre d'entre eux ne sont plus en mesure de remplir toutes les fonctions qu'ils assumaient dans leur état naturel. Assurer la qualité de la gestion des déblais, de la réhabilitation ou de la revalorisation des terres agricoles destinées à compenser les SDA génère des besoins croissants en informations: il est nécessaire que la localisation et la superficie des sols soumis à une influence anthropique soient déterminées (ill. 8, p. 32).

Illustration 8

Extrait de la carte recensant les sols anthropiques dans le canton de Zurich. Les cercles rouges signalent les sites dont la structure, la constitution ou la profondeur ont vraisemblablement été fortement modifiées par rapport à l'état naturel sous l'effet d'interventions humaines⁴³.

Source: www.maps.zh.ch



Dans les cantons, la protection du sol est organisée en différents secteurs : agriculture, génie civil, énergie ou environnement. Tout comme l'OFEV ou l'OFAG, la plupart d'entre eux ne disposent que de ressources en personnel limitées par comparaison avec d'autres domaines environnementaux. Celles-ci s'avèrent même parfois insuffisantes pour répondre aux nombreux défis que pose ce thème transversal¹⁴. Les lacunes observées en matière d'exécution de la protection du sol à l'échelon fédéral et cantonal sont examinées plus en détail au point 2.9 (p. 21 et p. 69). Entre autres choses, ces derniers s'efforcent cependant visiblement et activement d'élaborer des rapports et de traiter les informations du sol. Plusieurs cantons ont désormais mis en place des systèmes d'information dans le cadre de la structure SIG afin de mettre à disposition les informations du sol qu'ils détiennent ou d'alimenter leurs propres systèmes d'information spécialisés et spécifiques. Les points 2.2 et 2.3 (p. 36 et p. 39) étudient de manière plus approfondie l'état toujours hétérogène ainsi que l'étendue et la qualité des informations du sol disponibles à l'échelon cantonal.

A l'échelon fédéral, la protection préventive du sol constitue également un thème d'actualité. En collaboration avec l'OFAG, l'ARE, SWISSTOPO, l'Office fédéral des routes (OFROU), l'Office fédéral de l'énergie (OFEN) et les cantons, l'OFEV élabore actuellement une stratégie du sol⁴ qui est centrée sur la préservation et l'utilisation durable des fonctions du sol. L'objectif principal est d'établir une vision fonctionnelle globale visant à intégrer les aspects qualitatifs et quantitatifs du sol dans les décisions relatives à son utilisation ou à sa consommation. En ce qui concerne les informations du sol, elle comprend les champs d'action suivants : normes et standards, rele-

vés, gestion, analyse et interprétation des données.

La stratégie du sol de la Confédération a été incluse en tant que synergie dans le « Plan d'action de la Stratégie Biodiversité »³⁷ et est étroitement liée à l'intervention parlementaire relative à la création d'un Centre national de compétences pédologiques (motion 12.4230 Müller-Altermatt), qui exige « la création d'un organe central indépendant devant gérer des informations sur les sols au plan tant quantitatif que qualitatif ; il doit en outre définir des normes contraignantes pour le relevé des données et leur interprétation, et actualiser lesdites normes ». La ST4 étudie de manière ciblée ces contenus.

Autres domaines politiques

Le sol joue un rôle important dans de nombreux autres domaines, comme dans la planification des transports, dont la ST5 du PNR 68 « Vers une politique durable des sols » livre un aperçu⁷. Les informations du sol sont également pertinentes pour d'autres stratégies de la Confédération telles que la « Stratégie pour le développement durable »⁴⁴, la stratégie « Sécurité contre les dangers naturels »⁴⁵ et la « Stratégie Biodiversité Suisse » (SBS)³⁷.

Comparaison des besoins d'informations du sol et des ensembles de données standard relevés selon la méthode de cartographie FAL+

Le tableau 3 (p. 34) compare les besoins en données relatives aux qualités et aux caractéristiques dérivées du sol et l'ensemble de données standard résultant des relevés cartographiques effectués d'après les directives de la méthode FAL+ présentement en vigueur (FAL⁴⁶ et extensions cantonales²⁰). Actuellement, les données pédologiques les plus fréquemment requises sont contenues dans l'en-

Tableau 3

Besoins en informations du sol relatives aux propriétés et caractéristiques pédologiques.

(Des attributs contenus dans l'ensemble de données standard FAL+ comme les coordonnées, le type d'utilisation ou la forme du terrain n'ont pas été pris en compte ; S/SS : sol et sous-sol.)

Synthèse élaborée à partir de^{22, 50} d'une enquête réalisée auprès des scientifiques participant aux projets du PNR 68 et de recherches complémentaires.

Propriétés du sol		Caractéristiques pédologiques et grandeurs taxonomiques	
Souvent mentionné	Plus rarement mentionné	Souvent mentionné	Plus rarement mentionné
Contenu dans l'ensemble de données standard d'après la méthode de cartographie FAL+			
Teneur en argile S/SS	Structure du sol (taille et forme) S/SS	Groupe de régime hydrique (y compris type et degré d'hydromorphie)	Profondeur de la roche calcaire
Teneur en limon S/SS	Couleur	Profondeur utilisable par les plantes	Points d'indice de qualité pédologique
Classe de teneur en carbonates S/SS	Forme de l'humus	Type de sol	
Valeur du pH S/SS		Sous-types de sol (par ex. hydromorphie)	
Teneur en humus S		Épaisseur des horizons, profondeur de profil examinée	
Classe granulométrique S/SS			
Classe de pierrosité S/SS			
Autres (non contenu dans l'ensemble de données standard)			
Poids spécifique (densité volumique effective)	Teneurs en polluants inorganiques (métaux lourds)	Capacité au champ utile (saturée), conductivité hydraulique, infiltration	Influences anthropiques et compactations
Volume des pores (fins, moyens et grossiers)	Teneurs en polluants organiques (produits phytosanitaires, antibiotiques)	Profondeur par horizon	Teneur en air
Teneur en éléments fertilisants (N, P, K)	Biologie du sol (biomasse microbienne, diversité)	Information si drainé/non drainé	Épaisseurs des sols organiques
Capacité d'échange cationique et taux de saturation en bases		Capacité de développement racinaire ou profondeur des racines	
Teneur en eau ou force de succion			

semble de données standard. Des lacunes sont néanmoins à noter, en particulier en ce qui concerne les propriétés physiques des sols (compacité, volume des pores, teneur en eau) et les indications concernant leur teneur en éléments fertilisants. Des données sur ces propriétés et paramètres biologiques disponibles au plan national ont été sollicitées de manière accrue dans le cadre de plusieurs projets de recherche du PNR 68.

Des propriétés pédologiques importantes, comme la teneur en argile, en limon et en humus et la pierrosité, sont évaluées dans

le cadre de la cartographie des sols. Pour des raisons le plus souvent financières, des échantillons des différents horizons ne sont en général prélevés que sur des sites sélectionnés avant d'être analysés en laboratoire selon les méthodes de référence. L'ensemble de données standard d'une carte du sol établie selon la méthode FAL+ comprend des indications sur les propriétés pédologiques du sol et du sous-sol de la surface concernée. La délimitation du sol et du sous-sol dépend néanmoins de la structure du sol et ne constitue pas une constante liée à la profondeur. Les parties prenantes demandent néanmoins surtout

Tableau 4
 Etapes du relevé des informations
 du sol pour l'établissement de
 cartes^{46, 54}.

I. Préparation du projet	
Définition d'objectifs	Formulation du projet, choix de la région à cartographier et de l'échelle
Elaboration de bases de travail	Acquisition et traitement des informations et des cartes disponibles (géologie, climat, végétation, modèle altimétrique, utilisation des terres, etc.), télédétection et photos aériennes, littérature et autres sources
Création d'une carte conceptuelle	Analyse de terrain, échantillons, hypothèses sur la distribution des types de sols
II. Travaux de terrain	
Profils de sol, forage, fosse	Choix des sites de profil, enregistrement du profil de sol, prélèvement d'échantillons pour analyse
Analyses de laboratoire	Analyse de propriétés du sol sélectionnées, archivage des échantillons
Cartographie	Délimitation d'unités de sol sur le terrain, légende de travail (forme du sol, formes principales et secondaires, niveaux de profondeur, particularités)
Carte du sol manuscrite (carte de terrain)	Première ébauche de la carte du sol, délimitation des unités cartographiques
III. Produits	
Carte du sol	Révision et correction de la carte de terrain, le cas échéant réitération de l'étape II, réalisation d'une carte du sol numérique et imprimée
Evaluations	Réalisation d'évaluations de la carte du sol pour des demandes et des profils d'utilisateur spécifiques
Données pédologiques	Mise à disposition des données pédologiques numériques faisant partie de la carte du sol sur une plateforme numérique

à disposer de données pédologiques sur les propriétés du sol en lien avec des profondeurs et des couches bien définies. L'étude conceptuelle d'un système d'information sur la teneur en eau des sols⁵⁰ propose par conséquent de réexaminer le modèle bicouche afin de le compléter le cas échéant (chapitre 3, p. 70). Pour les travaux de terrain comme de laboratoire, il est par ailleurs possible d'effectuer des analyses continues de certaines propriétés pédologiques sur l'ensemble du profil de sol grâce à de nouvelles méthodes de mesure spectroscopiques^{48, 49}.

Les caractéristiques des sites – déclivité, forme du versant, climat, utilisation et

exploitation – en lien avec les données pédologiques constituent d'autres informations importantes. Des indications de ce type peuvent certes être relevées sur le terrain par le cartographe, mais devraient de préférence être dérivées des cartes de base SIG déjà existantes: modèles altimétriques ou données issues de l'acquisition directe et de la télédétection.

La plupart des parties prenantes ont besoin d'informations du sol très détaillées spatialement afin de pouvoir répercuter autant que possible les conditions pédologiques à l'échelon parcellaire. Ceci signifie que beaucoup souhaitent disposer de cartes au 1:5000 ou à encore plus grande

échelle, en particulier en ce qui concerne le Plateau suisse²². Pour les régions montagneuses, les Préalpes, les régions d'estivage et certaines parties du Jura, les cartes à moyenne échelle (1:25000) permettent également d'atteindre les objectifs définis. Si les besoins en informations du sol fiables et à haute résolution sont aussi élevés, c'est aussi principalement parce que le sol est toujours synonyme de propriété – qu'elle soit publique ou privée. Les décisions correspondantes doivent être prises avec soin et s'appuyer sur une base solide, raison pour laquelle il s'avère indispensable de disposer d'informations du sol de qualité élevée et homogène à l'échelon parcellaire.

2.2 Etapes d'une cartographie des sols

Le tableau suivant résume les différentes étapes de la cartographie des sols et reflète l'état actuel afin qu'il serve de base de réflexion à de futurs développements (chapitre 3, p. 70). En Suisse, les origines de la cartographie s'appuient sur des travaux réalisés au début du siècle dernier⁴⁷. La méthodologie appliquée est généralement adaptée de façon spécifique en fonction des pays afin que de nouvelles technologies de relevé puissent y être intégrées ou que les données pédologiques recueillies répondent aux différentes exigences d'utilisation⁵¹. Les directives décrivent dans la mesure du possible la procédure systématique d'une cartographie des sols^{46, 52, 54} et sont complétées par la réglementation relative à leur classification⁵³. Les sols peuvent ainsi être identifiés de

Illustration 9

Feuille de relevé d'une cartographie des sols. La structure ainsi que d'importantes propriétés et caractéristiques pédologiques sont enregistrées au moyen d'une coupe de profil. Ces données de base s'avèreront ultérieurement très utiles pour évaluer la durabilité d'une utilisation⁵⁵.

Source : Office de l'environnement du Canton de Soleure, division Sol.

Situation		Topographie / Géologie		Standort		Titel																
				18	Höhe (m.ü.M)	425	Gemeinde		Wolfwil	Profilsnummer		2468-40	Exposition		N	Flurname		Aglishmatt	Prov. Profilsbezeichnung		P 19	
				59	Klimazone	N	SP-Gemeindenummer		2468	Datenschlüssel		6	60		Vegetation aktuell	KW	Kanton		SO	Profiliart		P
				61	Ausgangsmaterial	SC	LK-Blatt 1:25000		12	Koordinaten		2627301 / 1236630	62/63		Landschaftselement / Kleinallet	TS	Aufnahmedatum		2002-10-07			
				16/17		Bodenbezeichnung	Braunerde															
				18		Untertyp	(E2)1 schwach sauer; 5.1 - 6.1, schwach pseudogleyig															
				19/20		Skeletgehalt OB/UB	stkh	stkh	stark kieshaltig/ stark kieshaltig													
				21/22		Felderkategorie OB/UB	HS	HS	lehmricher Sand / lehmricher Sand													
				23		Wasserhaushaltsgruppe	C	C	Geslecht: durchwache Boden; Normal durchlässig; massig tiefgründig													
				24		Plin, Gründigkeit	3/64 cm		massig tiefgründig; 50 - 70 cm													
				25		Neigung [%]	4		ebens; 0 - 5%													
				26		Geländeform	a															
Foto		Profilskizze		28		Horizont	29/30	31/32		33/34	35/36	37/38	39/40	41	42	44/45	46/47	48-55	Bemerkung			
				Tiefe		Profilskizze	Tiefe	Gefüge	organ. Subst %	Ton %	Schluff %	Sand %	Kies %	Steine (0.2-5) Vol. %	Steine (>5cm) Vol. %	Kalk CaCO3 %	pH CaCl2	Farbe (Munsell)	KAK mes	Profilsansprache an linker Profilwand (Stirnwand gestört, durch Waldrodung?). Valse Regenwurmgänge, prof: 15 + 46 + 3 = 64 cm. Anmerkung zur Eingabe: Nahrumsprache Bewzn-Horizont: 60 cm u.T.		
				Tiefe		Bezeichnung	[m]													pot.	eff.	
				23			23.0	Sp3/Kr2	2.82	15.0	33.7	31.0	51.3	15.0	6.0	0	5.1	4.8	10	YR 4/3		
				40																		
				70			85.0	Sp4	-10.3	28.6	42.3	47.0	21.0	5.0	0	5.2	5.0	10	YR 5/4			
				100			100.0	Ku/EK	8.2	11.1	80.3	74.0	23.0	6.0	0	5.6	5.5	10	YR 4/6			
				110			115.0	Ko	15.0	15.0	70.0	25.0	7.0	0	6.0	6.0	10	YR 4/6				
				140			145.0	EK	8.0	10.0	82.0	29.0	8.0	0	6.3	6.3	10	YR 4/6				
				180																		
																					Bemerkung Erstfassung	
Nutzungsbeschränkungen / Meliorationen		Nutzungsbeschränkungen		Meliorationen		Düngersatz		Bewertung / Eignung Landwirtschaft		Bewertung / Eignung Wald												
Krumenzustand		Limitierungen		festgestellte		empfohlene		Stufe		Stufe		Humusform		Produktionsfähigkeit								
66		67		68		69		70		71		72		73		74		75		76		
1		C.5		1		1		1		1		1		1		1		1		111		

manière systématique et spécifique en fonction des caractéristiques respectives des profils et des sites de profil. La classification permet de réaliser des relevés comparatifs et évaluatifs.

La cartographie des sols peut être entendue comme un inventaire recensant la répartition spatiale des propriétés, des types et de la qualité des sols aussi bien en surface qu'en profondeur. Les relevés pédologiques peuvent s'effectuer selon différentes échelles, mais se doivent de respecter des standards homogènes. La cartographie des sols est tributaire de l'expérience des experts qui y participent⁵⁰. Malgré un système de classification standardisé, la diversité des sols et leur constitution hétérogène placent régulièrement les spécialistes devant des défis de taille.

Selon les standards actuels, la cartographie des sols s'effectue par principe suivant les étapes de travail décrites dans le tableau 4 (p. 35), dont les travaux de terrain constituent l'axe principal. Elles comprennent l'examen des profils pédologiques.

Pour ce faire, le sol est creusé verticalement sur des sites définis jusqu'à apparition du matériau géologique parental afin que tous les horizons (sol et sous-sol) soient accessibles. Les caractéristiques visibles apparaissant le long du profil sont enregistrées sous la forme de schémas et les différents horizons sont délimités les uns par rapport aux autres: pour chaque horizon, les caractéristiques visibles et les propriétés du sol évaluées sur le terrain sont saisies dans un formulaire séparé (ill. 9, p. 36).

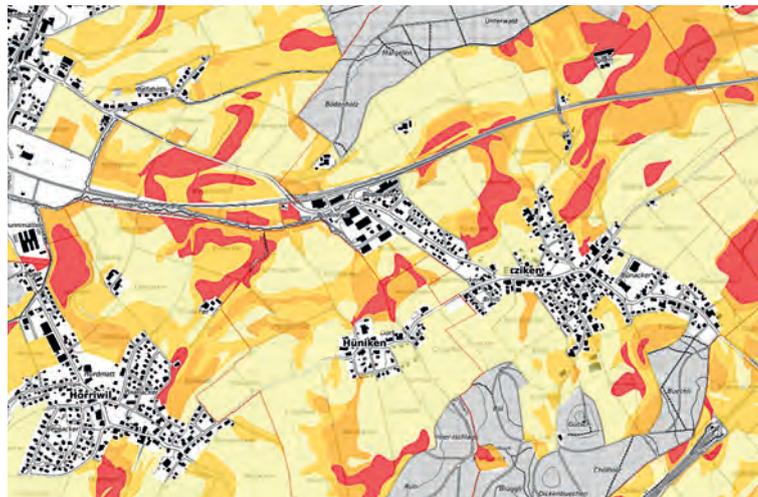
Une cartographie des sols peut fournir différentes qualités de données et divers supports d'information. Un forage, ou un profil de sol, isolé livre des données ponctuelles. Les données surfaciques restituent les propriétés du sol sous forme de polygones ou de grilles de données. De la cartographie résultent, outre la carte du sol qui en constitue le principal élément, de nombreux autres (sous-)produits: cartes de base et cartes conceptuelles, formulaires relatifs aux enregistrements des profils de sol (schémas et photos), protocoles

Illustration 10

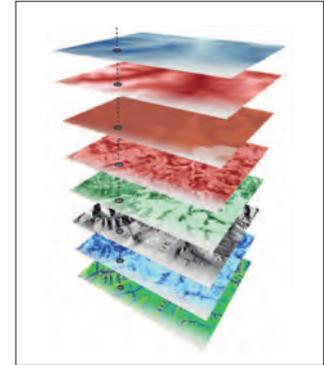
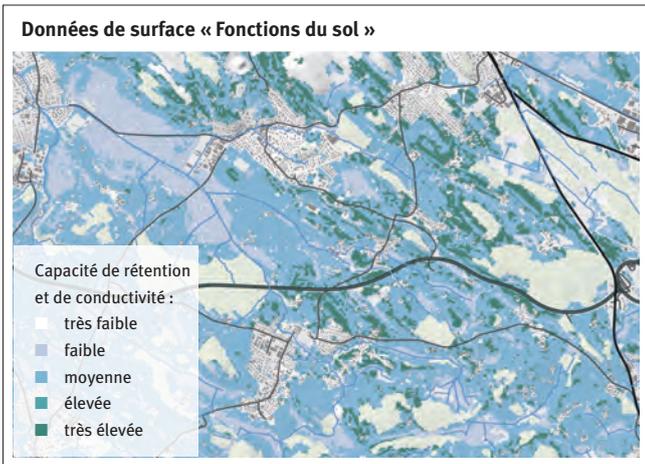
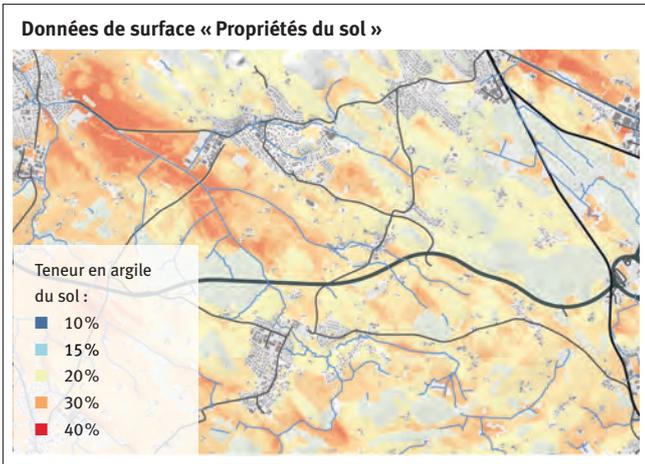
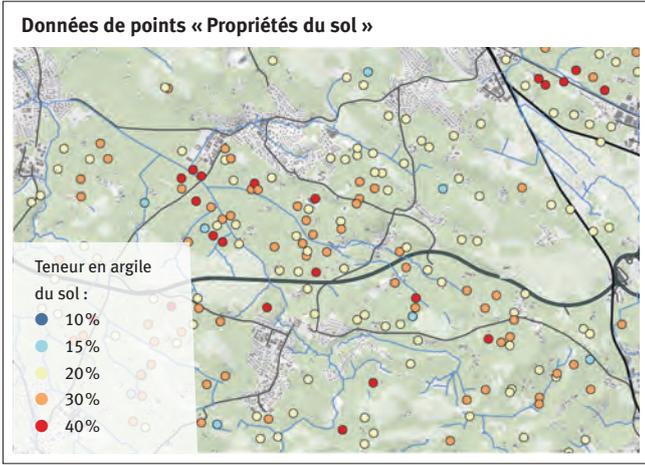
Exemple de carte d'utilisateur thématique pour la protection du sol dérivée de cartes du sol: sensibilité au compactage⁵⁵.

Sensibilité du sous-sol:

- faible
- moyenne: bonne résistance aux charges mécaniques après phase de séchage
- sensible: prudence accrue
- forte: résistance limitée aux charges mécaniques, attendre les périodes de sécheresse prolongées)
- extrême: renoncer autant que possible à une utilisation agricole



Source: geoweb.so.ch/maps/isboden



Archives de données pédologiques

Données géo-environnementales

Modèle
Méthode statistique pronostique

Propriétés
A différentes profondeurs

Evaluation
Règle de dérivation

Fonctions
Cartes des fonctions de production, de régulation et d'habitat du sol comme base de décision

Illustration 11

Procédure d'élaboration de cartes des propriétés (pour différentes profondeurs) et des fonctions du sol.

Projet CARTES DU SOL du PNR 68

Source : M. Nussbaum.

de forage, données de laboratoire (résultats des analyses des échantillons), cartes d'évaluation (par ex. cartes des risques d'érosion ou de compaction, aptitude culturale, régime hydrique; ill. 10, p. 37), rapports de suivi et documentations et ensemble des données ponctuelles et surfaciques, y compris la documentation relative à la structure des données.

La modélisation numérique des propriétés du sol et l'évaluation des fonctions en découlant relèvent d'une méthodologie bien établie au sein des cercles scientifiques internationaux. Dans le projet CARTES DU SOL du PNR 68, une approche similaire a été mise en œuvre dans deux régions suisses pour lesquelles des données pédologiques étaient d'ores et déjà disponibles (ill. 11, p. 38). A cette fin, l'équipe du projet a développé un outil qui est en mesure de fournir un modèle pronostique simple à partir de nombreuses géodonnées et covariables environnementales et d'établir des relations complexes entre propriétés du sol et données environnementales. Cette approche permet d'interpréter facilement les relations modélisées qui existent entre propriétés du sol et facteurs topographiques⁵⁶⁻⁵⁸.

Dans le cadre du projet CARTES DES SOLS du PNR 68, cinq modèles précédemment établis dans le domaine de la géostatistique et de l'apprentissage machine ont été mis sur le banc d'essai pour deux régions d'étude. Les résultats pronostiques des six méthodes divergent généralement très peu. La technique d'apprentissage basée sur des arborescences décisionnelles (Random Forest) a globalement livré les pronostics les plus probants. Relativement simple à utiliser, cette méthode permet par ailleurs d'élaborer des cartes à haute résolution des propriétés des sols pronostiquées⁵⁶.

2.3 Etat de la cartographie des sols en Suisse

La création d'une école de sylviculture au Polytechnicum fédéral, devenu l'Ecole polytechnique fédérale de Zurich, en 1855 avait marqué le début de la formation pédologique en Suisse. En 1925, de premières cartes des types de sols de la Suisse avaient été élaborées par Hans Jenny. Celles-ci furent révisées quelques années plus tard par Hans Pallmann et Hermann Gessner et firent l'objet d'une nouvelle édition en 1934⁴⁷. Au sein de la Station de recherches en agroécologie et agriculture de l'époque (FAP), aujourd'hui l'Agroscope de Zurich-Reckenholz, un service national de cartographie avait été établi à la fin des années 1950 et il avait développé durant quatre décennies des méthodes et des directives relatives à la cartographie des sols. Nombre d'entre elles avaient été développées sur mandat des communes et des cantons afin de procéder à des améliorations foncières. Une fois achevée la « cartographie des sols du canton de Zurich », le Service national de cartographie des sols a été dissous en 1996 suite à la réorganisation de la FAP et cette tâche a été confiée aux cantons. Les données n'ont été ni inventoriées systématiquement ni sauvegardées sous forme numérique, ce qui a rendu leur utilisation très difficile par la suite.

Inventaire et numérisation des informations du sol

Les précieuses données pédologiques du Service national de cartographie des sols sont longtemps restées conservées sous forme analogique dans l'inventaire de l'Agroscope. Au début des années 2000, le projet Infosol Suisse (IS-CH) a été à l'origine de la numérisation des anciennes données sur les sols: c'est en effet dans ce cadre que des outils et des codes cor-

respondants ont été développés et que le traitement numérique d'anciennes informations pédologiques a été entrepris^{59, 60}. Quelques années plus tard, les archives pédologiques de l'Agroscope ont été soumises à une inventurisation systématique et leur numérisation et leur traitement ont débuté en collaboration étroite entre les services cantonaux, les experts externes et la Société suisse de pédologie (ssp)⁶¹.

Les archives pédologiques de l'Agroscope ont ainsi livré un trésor de données issues de près de 400 projets de cartographie : sur la période 1953–1996, près de 13 000 profils de sol, 5 200 forages et environ 26 000 horizons de sol avec données d'analyse avaient été ainsi documentés. Une fois répertoriées, des données pédologiques analogiques doivent encore être scannées puis harmonisées avant de pouvoir être mises à disposition sous forme numérique⁶².

Etat des sols cartographiés en Suisse

Depuis la dissolution du Service national de cartographie des sols en 1996, un service de coordination à l'échelon fédéral fait défaut, si bien qu'il n'existe à ce jour aucun aperçu définitif des sols ayant jusqu'à présent été cartographiés en Suisse. Suite au regroupement et à l'harmonisation des données pédologiques cantonales au sein du NABODAT (voir ci-dessous), de nombreuses données de profil cartographiques y ont été transférées. Un premier inventaire harmonisé au plan national est librement accessible depuis 2016⁶³. Il rassemble actuellement les informations pédologiques de 16 cantons et couvre plus de 10 000 sites. A moyen terme, il est prévu qu'il soit complété par d'autres données cantonales.

Ces différentes informations permettent de se forger une image assez exhaustive

de l'état de la cartographie des sols suisses (tab. 5, p. 42). L'illustration 12 (p. 41) représente les régions cartographiées depuis les années 1950. Une cartographie approfondie et détaillée des sols agricoles n'existe pour l'instant que dans quelques cantons, ceux de Zurich, de Bâle-Ville et de Zoug. Des projets de cartographie à grande échelle sont mis en œuvre, ou en cours d'élaboration, dans les cantons d'Argovie, de Glaris, de Lucerne, de Soleure, de Saint-Gall, de Vaud et du Valais. En dehors des cantons de Soleure et de Zurich, les sols forestiers n'ont été pris en considération que dans le cadre du projet au 1:25 000⁶⁷.

Selon les estimations actuelles, près de 355 000 hectares de terres agricoles et 26 000 hectares de sols forestiers ont jusqu'à présent été cartographiés (tab. 5, p. 42). Ceci signifie que près d'un tiers des surfaces agricoles utiles ont pour le moment fait au moins une fois l'objet d'une étude pédologique. D'importantes divergences qualitatives subsistent néanmoins en ce qui concerne l'année, les codes (version du modèle de données qui définit comment les propriétés et les caractéristiques des sols sont enregistrées), le volume des informations relevées, l'état de la numérisation et l'échelle des cartes existantes.

Une image très différente apparaît si l'on prend globalement en compte les différentes qualités du sol : l'introduction de la classification des groupes de régimes hydriques au titre du code 5 au début des années 1980 a défini un nouveau standard, qui se différencie peu de l'actuel code 6.1⁵⁹. Il semble par contre peu probable que les données cartographiques relevées avant 1980 avec les codes 1 à 4 puissent répondre aux exigences qualitatives actuelles. Si l'on ne considère que les sites

répertoriés à partir de 1980 au moins avec le code 5, il s'avère que seuls 10 à 15% des surfaces agricoles utiles ont jusqu'alors été cartographiées. En Suisse, l'état de la cartographie apparaît ainsi en complète contradiction avec les besoins en informations du sol présentés dans le tableau 2 et le tableau 3 (p. 24–25 et p. 34).

A l'heure actuelle, quelques cantons mènent à bien des projets de cartographie d'envergure limitée. A l'échelon cantonal, il s'avère en effet généralement très difficile d'obtenir les moyens nécessaires pour procéder à une cartographie des sols, ou bien les projets sont ajournés ou revus à la baisse faute de financements adéquats. Une superficie de près de 2000 hectares est cartographiée chaque année en Suisse²². A titre de comparaison, environ 3000 hectares par an ont été imperméabilisés ou compactés au cours des dernières décennies.

La carte d'aptitude des sols au 1:200 000

La carte d'aptitude des sols de la Suisse au 1:200 000 (BEK200) a été élaborée dans les années 1970 dans le but d'avoir à disposition une base applicable à l'échelon suprarégional. Néanmoins, la BEK200 n'est pas une carte du sol, ce qui induit à nouveau des malentendus dans les discussions relatives aux besoins en informations du sol. Les contenus pédologiques sur lesquels s'appuie la BEK200 sont constitués d'analyses de prises de vue aériennes, de cartes géologiques et géotechniques et de relativement peu de profils de sol et de forages⁶⁴.

Les unités de cartographie de la BEK200 contiennent des informations relatives à six caractéristiques des sols qui ont été estimées et réparties en classes grossières: profondeur, capacité de rétention d'eau, capacité de rétention des nutriments, perméabilité à l'eau et hydromorphie. La per-

Illustration 12

Aperçu des cartographies du sol depuis les années 1950 en Suisse⁶⁷. Les projets de cartographie de quelques régions apparaissant dans le tableau 5 (p. 42) ne sont pas encore représentés.

Projets de cartographie:
■ au 1:5000 ou à plus grande échelle
■ au 1:10 000 ou à plus petite échelle

Limites de zones agricoles:
■ zone de plaine
■ zone des collines et de montagne I
■ zone de montagne II – IV

Source: U. Grob, Agroscope.



Tableau 5

Etat de la cartographie des sols en Suisse. Estimation sur la base de l'inventaire des sols de l'Agroscope^{61, 67}.

Canton	Surfaces agricoles utiles (SAU)					Forêt	
	Total surfaces (ha)	Surfaces d'assolement (ha)	Surfaces cartographiées ¹ (ha)	Autres surfaces cartographiées ² (ha)	SAU cartographiées (%)	productive Plateau suisse (ha)	Surfaces cartographiées (ha)
Zurich	73 681	44 400	76 043	0	100	48 887	6000
Berne	191 653	84 000	20 665	0	11	41 492	0
Lucerne	76 992	27 500	8298	2158	14	14 450	0
Uri	6728	260	1286	0	19	0	0
Schwytz	24 449	2500	1133	0	5	0	0
Obwald	7839	420	578	0	7	0	0
Nidwald	6023	370	45	0	1	0	0
Glaris	6842	200	0	1100	16	0	0
Zoug	10 628	3 000	10 980	0	100	1192	0
Fribourg	75 434	35 900	7151	0	9	17 009	0
Soleure	31 416	16 200	5832	8168	45	6915	6000
Bâle-Ville	419	240	380	0	91	0	325
Bâle-Campagne	21 523	8000	21 355	0	99	0	19 699
Schaffhouse	15 568	8900	3605	0	23	1211	0
Appenzell RE	11 966	790	3138	0	26	0	0
Appenzell RI	7168	330	2	0	0	0	0
Saint-Gall	71 609	12 500	14 092	45 106	83	11 253	0
Grisons	55 827	6300	5988	0	11	0	0
Argovie	60 978	40 000	14 747	0	24	29 964	0
Thurgovie	49 523	30 000	315	0	1	19 677	0
Tessin	14 681	3500	5835	0	40	0	0
Vaud	109 065	75 800	75 611	0	69	28 348	0
Valais	37 844	7350	12 018	0	32	0	0
Neuchâtel	31 966	6700	0	600	2	0	0
Genève	11 189	8400	0	400	4	2646	0
Jura	40 257	15 000	8573	0	21	0	0
Suisse	1 051 265	438 560	297 669	57 532	34	223 044	26 025

¹ Etat du catalogue de métadonnées au printemps 2017.

² Connu, mais pas encore inclus dans le catalogue de métadonnées.

tinance pédologique de cette carte à petite échelle est très limitée⁶⁴. Il manque des indications sur d'importantes propriétés du sol comme la valeur pH et la teneur en humus et en argile. Une carte du sol faisant défaut au plan national, la BEK200 continue d'être utilisée pour de nombreuses études, et la texture ou d'autres propriétés du sol sont estimées sur la base d'hypothèses. Les incertitudes découlant de l'utilisation de la BEK200 sont par suite conséquentes, également du fait de l'échelle utilisée, car un polygone de la BEK200 couvre en moyenne plusieurs kilomètres carrés et que ses indications ne sont pas suffisamment précises pour répondre aux besoins des utilisateurs d'informations du sol.

2.4 Gestion des données et système d'information sur les sols

Gestion des données

Pour les raisons précédemment citées, les sols ont de par le passé été examinés à l'aide de différentes méthodes de relevé. En règle générale, ces données pédologiques ne peuvent pas être regroupées facilement. La gestion des données décrit les processus mis en œuvre à titre préventif afin de leur conférer une forme qui garantisse à la fois leur comparabilité et leur interopérabilité et permette ainsi de regrouper et d'harmoniser des données pédologiques issues de différents relevés et de différentes époques. Il existe de nombreuses explications à l'inconsistance observée au niveau des ensembles de données. Les anciens relevés s'appuyaient souvent sur d'autres méthodes d'analyse, si bien que les propriétés des sols étudiées à différentes époques ne peuvent pas toujours être comparées. Certaines propriétés étaient évaluées sur le terrain tandis que d'autres étaient mesurées en laboratoire. Au fil du temps, les méthodes de cartographie ont continué d'évoluer :

d'autres codes ont été utilisés, la classification de diverses propriétés du sol a été modifiée et des caractéristiques supplémentaires ou de nouvelles règles de dérivation de ces paramètres ont été définies. En fin de compte, le maintien de différents formats de données limite l'utilisation efficace des informations pédologiques.

Transférer d'anciennes données pédologiques dans un système de codage actuel et uniformisé exige de nombreuses connaissances et compétences spécialisées afin de procéder à la préparation des bases de données relationnelles et à la programmation des règles de transfert⁵⁹. Pour mener cette tâche à bien, il peut être recouru à des auxiliaires de transfert⁶⁵. En Allemagne, l'Institut fédéral des Géosciences et des Ressources naturelles (BGR) propose par exemple des applications de bases de données ainsi que des codes de dérivation permettant de déterminer le type de sol en fonction de la classification internationale des sols « World Reference Base for Soil Resources (WRB) »⁶⁵.

Dans le cadre du projet CARTES DES SOLS du PNR 68, les informations du sol en provenance de sept sources différentes relatives à 16 000 sites situés dans deux régions d'étude des cantons de Berne et de Zurich ont été regroupées, harmonisées et rendues disponibles pour la modélisation. Au total, les valeurs de mesure et les propriétés évaluées sur le terrain de près de 36 000 horizons ont ainsi été réunies au sein d'une base de données et un schéma à dix échelons a été élaboré pour l'harmonisation des données pédologiques en Suisse⁶⁶. Une étape de travail consiste par exemple à comparer les teneurs en argile, en limon, en humus et les valeurs pH évaluées sur le terrain avec les mesures effectuées en laboratoire afin de les corriger. La révision de ces estimations permet

d'augmenter considérablement le volume des données pédologiques valides.

Catalogue de métadonnées de la cartographie des sols en Suisse

La gestion des données inclut outre la mise à disposition et la transmission de données pédologiques également la définition de tous les paramètres et la description exhaustive des ensembles de données (méta-informations). Au vu de la diversité des ensembles de données et des volumes impliqués, les « catalogues de métadonnées » revêtent une importance particulière, d'autant plus que leur disponibilité est jusqu'à présent plutôt limitée.

Un catalogue de métadonnées basé sur Internet, qui offrira un aperçu de relevés cartographiques des sols réalisés jusqu'à présent, est en cours d'élaboration pour la Suisse⁶⁷. Les utilisateurs auront accès en un clic aux méta-informations les plus importantes: année du relevé, code, volume, état du traitement numérique, disponibilité des données pédologiques et adresses de contact. Ce catalogue de métadonnées

représente une autre étape importante afin d'obtenir un meilleur aperçu des informations du sol existantes.

Système d'information pédologique NABODAT

En Suisse, le Système national d'information pédologique (NABODAT) constitue depuis 2012 une application spécialisée destinée aux offices fédéraux et cantonaux (www.nabodat.ch). Ce système d'information sur les sols (sis) gère aussi bien les données ponctuelles (par ex. données de profil, ill. 13, p. 44) que les données surfaciques (cartes). Les cantons sont libres de transférer leurs données pédologiques au NABODAT et de les y administrer. Le sis offre une protection des données spécifique aux mandants, ce qui signifie que chaque canton peut décider si ses ensembles de données sont consultables par d'autres. Grâce à des formats d'échange de données uniformes, le NABODAT facilite grandement l'utilisation des données pédologiques. Pour que celles-ci puissent être exploitées par différents acteurs, leur interopérabilité revêt en effet une importance essentielle.

Illustration 13
Extrait du Système national d'information pédologique (NABODAT): onglet présentant des informations relatives aux horizons des sols^{61, 63}.

Valeurs de référence / Matrice du sol / Valeurs mesurées						
N° d'horizon (27)	Profondeur (28) [cm]	Désignation des horizons (29/30)	Teneur d'humus (33) [%]	Carbonate CaCO ₃ (44)	pH "Hellige" (48)	Couleur (48-55)
1	0 - 27	Ah ₁ (g)	2.2	pas de CaCO ₃	0.58	10YR 4/3 (Matrix)
2	27 - 38		1.0	pas de CaCO ₃	5.2	10YR 5/4 (Matrix)
3	38 - 49		0.5	pas de CaCO ₃	5.8	10YR 4/4 (Matrix)
4	49 - 69		0.1	pas de CaCO ₃	5.8	10YR 5/2 (Matrix)
5	69 - 130		0.1	pas de CaCO ₃	6.2	10YR 5/4 (Matrix)
6	130 - 150		0.0	pas de CaCO ₃	6.3	2.5Y 6/1 (Matrix)

* Il existe plusieurs entrées

Le modèle de données conceptuel constitue le fondement d'un SIS. Il définit la structure de base, le contenu et les relations des éléments de données. Il doit permettre une documentation transparente et sans équivoque des données pédologiques, assurer une qualité et une harmonisation conséquentes et gérer les flux de données entre différents systèmes d'information. Le modèle de données du NABODAT est divisé en paquets : données de site, données de relevé, données de profil, données surfaciques ainsi qu'un paquet relatif à la gestion des données de base et des données utilisateurs⁶¹.

Le modèle de données entretient une relation directe avec le système de classification et les directives de cartographie. Lorsque ceux-ci sont élargis ou modifiés, le modèle de données doit être adapté de manière correspondante tout en assurant la cohérence vis-à-vis des données pédologiques existantes. Par conséquent, le futur développement des bases méthodologiques de la cartographie ne saurait uniquement être envisagé d'un point de vue pédologique : il devra également prendre en compte d'éventuelles répercussions pour la gestion des données et le modèle de données du NABODAT.

Si les offices fédéraux et les cantons ont accès aux informations du sol par l'intermédiaire du NABODAT, il n'existe toujours pas de plateforme d'information qui permettrait aux chercheuses et chercheurs ainsi qu'au grand public d'utiliser les informations du sol et les cartes mises à disposition par les cantons. L'ensemble des données de profil du NABODAT (point 2.3, p. 39) représente une première étape vers une meilleure disponibilité des informations du sol⁶⁷.

Réseaux de mesure de l'humidité du sol

Si de nombreuses propriétés du sol affichent un comportement relativement stable dans le temps, certaines d'entre elles, comme le taux d'humidité, varient fortement. La teneur en eau d'un sol – qui est également qualifiée d'humidité selon la méthode de mesure – constitue une information importante pour une utilisation durable des sols agricoles et forestiers (tab. 2, p. 24–25). Ces informations s'avèrent utiles à un travail responsable du sol dans le domaine de l'exploitation agricole et de la foresterie, mais aussi dans le secteur de la construction, et contribuent à prévenir les compactations⁶⁸.

Les informations relatives à l'humidité du sol servent également à la recherche climatologique, à l'établissement de pronostics quant à la pression exercée par les nuisibles sur les cultures ou à l'optimisation des mesures d'irrigation⁶⁹. Des données actualisées sur la teneur en eau des sols se révèlent également extrêmement utiles pour la prévention des crues⁷⁰.

La Suisse compte actuellement onze réseaux de mesure de l'humidité du sol (ill. 14, p. 46) qui regroupent 108 stations (état : fin 2015). Ils sont pour la plupart administrés par les services cantonaux⁶⁹ et les données de mesure en résultant sont généralement disponibles sur Internet (par ex. www.bodenmessnetz.ch/fr). Il convient de poursuivre le développement de ces réseaux et d'améliorer leur coordination⁶⁸. En dépit de l'utilité élevée de ce paramètre, il n'existe pour le moment aucune base légale réglant l'observation à long terme de l'humidité du sol.

Monitoring et autres analyses nationales des sols

Les modifications temporelles de la qualité des sols sont étudiées sur quelques sites

bien définis grâce au prélèvement périodique d'échantillons dans le cadre du monitoring de la qualité des sols. Les méthodes utilisées pour ce faire se différencient de celles appliquées à la cartographie des sols, mais leurs indications se complètent au niveau spatio-temporel. L'Observatoire national des sols (NABO; www.nabo.ch) surveille les atteintes des sols depuis le milieu des années 1980 grâce à un réseau de mesure de référence constitué d'une centaine de sites répartis dans l'ensemble de la Suisse (champs, prairies, forêts). Ce réseau de référence sert à identifier précocement les changements et à vérifier l'efficacité des mesures de protection du sol déjà appliquées. L'évolution dans le temps des nutriments et des polluants, de la teneur en carbone, de l'activité biologique, de la compaction et de l'acidification des sols est ainsi enregistrée⁷¹. En complément, quelques cantons (par ex. FR, ZH, SG, GE, AG, groupement des can-

tons de Suisse centrale) gèrent un réseau de surveillance du sol cantonal⁷².

Dans le cadre des Recherches à long terme sur les écosystèmes forestiers (LWF), l'Institut fédéral de recherches sur les forêts, la neige et le paysage (WSL) étudie l'état et les modifications des propriétés du sol ainsi que les régimes de l'eau et de la matière sur 18 sites permanents⁷³. Parallèlement au programme LWF, l'Institut de biologie végétale appliquée (IAP) de Schönenbuch gère⁷⁴ depuis près de trois décennies – sur mandat de l'OFEV et de huit cantons – un réseau de mesure regroupant plus d'une centaine de sites forestiers (www.observationforet.ch).

Analyses du sol pour les prestations écologiques requises (PER)

La teneur des sols en nutriments représente une information importante pour différents projets de recherche du PNR 68

Illustration 14

Aperçu des réseaux de mesure de l'humidité du sol, état 2015⁶⁹.

- Réseau de mesure Suisse NO
- OstBoden et canton ZH
- Canton BE
- Canton TI
- Canton UR
- zUDK (LU)
- ◆ inNET (pilote OFAG)
- ▼ SOMOMOUNT (Université FR)
- ★ SwissSMEX
- ▲ WSL

Source: B. Huegenin-Landl, Meteotest.



ainsi que d'autres parties prenantes. Dans l'agriculture, ces analyses constituent une base précieuse pour procéder à une fertilisation spécifique des parcelles. Dans le cadre des prestations écologiques requises, l'Ordonnance sur les paiements directs versés dans l'agriculture (OPD; RS 910.13) exige des exploitants agricoles que des analyses du sol de toutes les parcelles soient effectuées au moins tous les dix ans. La Suisse comptant près de 70000 exploitations, le nombre d'analyses du sol réalisées chaque année devrait osciller entre 50000 et 100000. Les laboratoires homologués pour les prestations PER sont dans l'obligation de transmettre ces résultats d'analyse à l'OFAG à des fins d'évaluation statistique. Néanmoins, cette évaluation ne relève pas d'une procédure standardisée et la gestion des données n'est soumise à aucun contrôle de qualité. De nombreuses analyses des éléments fertilisants ne peuvent par consé-

quent pas être exploitées⁷⁵. Une première évaluation de la teneur en P des horizons supérieurs des surfaces de cultures fourragères réalisée en 2014 (ill. 15, p. 47) a révélé que la qualité des données disponibles était insuffisante.

Une harmonisation des données relatives aux analyses des éléments fertilisants pourrait néanmoins être réalisée à peu de frais. Il suffirait pour ce faire d'établir des directives méthodologiques précises pour le prélèvement⁷⁶ et le géoréférencement des échantillons de sol et de définir les attributs, la structure et le format des ensembles de données à fournir.

2.5 Etat de la cartographie des sols dans l'Union européenne

Au cours des dernières années, de nombreuses plateformes mettant à disposition des cartes et des informations du sol

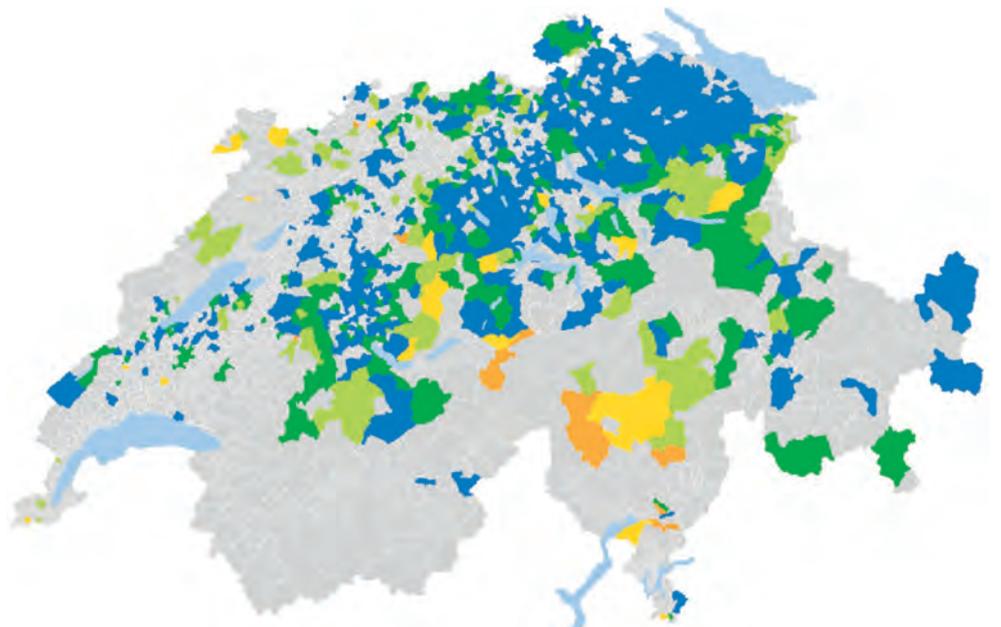
Illustration 15

Teneur en P des horizons supérieurs des surfaces de cultures fourragères. Première évaluation des analyses des éléments fertilisants des sols agricoles réalisée dans le cadre des prestations écologiques requises (PER) en 2014. A l'heure actuelle, ces données ne font pas l'objet d'un regroupement systématique et l'indication de la commune ne permet pas de géoréférencer de manière suffisamment précise les sites de prélèvement⁷⁵.

Cultures fourragères CO₂-P
(N = 33 779):

- apport déficitaire très fréquent
- apport déficitaire fréquent
- apport déficitaire occasionnel et apport excédentaire occasionnel
- apport excédentaire fréquent
- apport excédentaire très fréquent

Source : Rapport agricole 2014.



ont été mises en place à l'échelon international. Les portails de l'European Soil Data Center (ESDAC), du Centre commun de recherche (JRC) de la Commission européenne, du World Soil Information Service (ISRIC) et du Partenariat mondial sur les sols (GSP) de l'Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO). A l'échelon national et régional, il existe par ailleurs de nombreux portails dédiés aux informations du sol qui répondent pour certains de manière exhaustive aux besoins des utilisateurs. L'étude focalisée SYSTÈMES D'INFORMATION DU SOL du PNR 68 avait pour objectif d'établir un aperçu des informations disponibles au niveau européen.

Cartographie des sols

En Europe, les cartes du sol présentent des échelles très différentes (ill. 16, p. 50). Si certains pays ne disposent que de cartes très générales (échelle 1:1 mio), d'autres ont établi des cartes très détaillées (échelle 1:10000 ou plus précise) qui couvrent presque l'ensemble de leur territoire⁷⁷.

Les cartes les plus détaillées sont disponibles pour les pays de l'ancien bloc de l'Est, dans lesquels des cartes avaient principalement été établies entre 1950 et 1990 pour les structures agricoles de grande superficie⁷⁸. Des pays comme la Roumanie ou la Croatie disposent par exemple de cartes à moyenne échelle couvrant (presque) l'ensemble de leur territoire. Des cartes détaillées ont également été réalisées dans des pays de faible superficie comme la Lituanie (1:5000–1:10000). Au début des années 1970, les sols de l'ancienne Yougoslavie ont été cartographiés à l'échelle 1:50000. La Slovénie bénéficie de cartes plus précises à l'échelle 1:25000. En Europe occidentale, la Belgique et l'Autriche ont respectivement établi une cartographie

nationale à l'échelle 1:20000 et 1:25000. En dehors de ces pays, ainsi que de l'Allemagne et des Pays-Bas qui disposent de cartes au 1:50000, des cartes à moyenne ou à grande échelle de l'ensemble du territoire n'existent dans aucun autre pays. La Suède, la Norvège et l'Espagne ne disposent que de cartes nationales à petite échelle.

Une tout autre image se dessine au niveau des régions (Bundesländer)⁷⁷. Presque tous les pays disposant de cartes nationales à moyenne ou à petite échelle disposent de cartes plus précises à l'échelon régional ou pour certaines utilisations des sols, surtout en ce qui concerne les surfaces agricoles. En France, par exemple, des régions ont été sélectionnées de manière ciblée afin d'être cartographiées plus précisément (échelle 1:100000 à 1:25000). En Allemagne, certains Bundesländer, comme la Rhénanie-du-Nord-Westphalie ou la Bavière, ont établi des cartes plus détaillées (1:5000 et 1:25000). Les grands pays européens en particulier ont réalisé des cartographies à moyenne échelle de certaines régions, mais non de l'ensemble de leur territoire. Les pays de moindre superficie, comme le Danemark, les Pays-Bas, la Belgique et l'Autriche ou les régions (Bundesländer) à forte densité de population, dont les surfaces agricoles sont limitées, ont cartographié les sols affectés aux activités agricoles à moyenne ou grande échelle. La Suisse constitue par comparaison une exception dans la mesure où elle est loin de disposer d'informations d'un niveau similaire quant à la répartition géographique et aux propriétés de ses sols.

Près de douze des pays examinés ont mené au cours de la dernière décennie, ou poursuivent encore, des activités de cartographie. Les cartographies réalisées sont

fréquemment axées sur les besoins spécifiques des utilisateurs. La détermination des activités culturelles pourrait à ce titre avoir constitué l'objectif prioritaire de la plupart des pays. Néanmoins, d'autres objectifs sont également poursuivis: en Finlande, les sols acides contenant du soufre sont spécifiquement recensés, car ils génèrent des problèmes environnementaux. Les Pays-Bas ont procédé à une nouvelle cartographie des sols organiques dégradés afin que les relevés les plus récents leur permettent de mieux évaluer la dégradation progressive de la substance organique. L'Albanie élabore depuis 2003 une carte au 1:10000 de toutes ses surfaces agricoles.

Systèmes d'information sur les sols

Des systèmes d'information sur les sols (sis) ont été mis en place et développés en continu depuis les années 1990 (annexe 2). Ces sis ne concernant souvent que certains types d'informations du sol pour des raisons historiques et organisationnelles, ils peuvent être conçus de manière très différente. Dans la plupart des pays, il existe ainsi des systèmes d'information séparés, selon que les données pédologiques sont issues de systèmes de monitoring ou de cartographies. Ceci vaut généralement aussi pour les données relatives aux sols agricoles et forestiers. Indépendamment du fait que les informations du sol soient ou non disponibles au plan national, deux tiers des pays étudiés disposent d'un accès numérique aux cartes ou aux données pédologiques (ill. 17, p. 50). Dans près de 80% des pays, les données pédologiques sont en effet publiées sur des portails de géodonnées sur lesquels elles peuvent être consultées ou téléchargées à titre entièrement, ou partiellement, gratuit.

L'examen de la situation dans les pays voisins met en lumière l'étendue des lacunes existant en Suisse en matière de données. En Allemagne, Bundesanstalt für Geowissenschaft und Rohstoffe (BGR) élabore des cartes des sols et des cartes d'application au 1:200000 (BÜK200) ou à plus petite échelle et propose un « atlas des sols d'Allemagne » (www.bodenatlas.de) qui regroupe des cartes scientifiques destinées à couvrir les besoins en informations du public. Le système d'information sur les sols spécialisé « Pédologie » du BGR comprend outre des données surfaciques et de laboratoire également des données de profil ainsi qu'une base méthodologique pour leur évaluation (www.bgr.bund.de). Les systèmes d'information des Bundesländer proposent en règle générale des cartes au 1:50000 ou à plus grande échelle. Les sis établis à l'échelon des Bundesländer s'avèrent parfois très complets et très détaillés comme cela est, par exemple, le cas en Rhénanie-du-Nord-Westphalie, en Bavière, dans le Bade-Wurtemberg ou en Basse-Saxe. L'Office allemand de l'environnement a par ailleurs dressé un aperçu des principales activités de mesure et relevés des sols⁷⁹.

Le système informatisé BORIS avait été développé en Autriche dès la fin des années 1990 (www.umweltbundesamt.at). Les données pédologiques des Bundesländer et de l'Etat sont mises en ligne sous une forme similaire et validée par l'Office fédéral autrichien de l'environnement. Ce portail d'information du sol permet une sélection et une présentation individuelle des données au moyen d'une application WebSIG et offre différents calques et cartes de base à diverses échelles. En Allemagne comme en Autriche, quelques portails à l'échelon des Bundesländer proposent – en plus des informations standard (profils, propriétés et cartes

Illustration 16

Etat de la cartographie des sols dans l'UE. Représentation de la plus grande échelle des cartes nationales disponibles (couverture de plus de 70% de la surface du pays).

Etude focalisée SYSTÈMES D'INFORMATIONS du PNR 68.

Echelle carte nationale des sols:

- non existant
- 1 : 1 000 000
- 1 : 500 000
- 1 : 300 000 – 1 : 200 000
- 1 : 100 000
- 1 : 50 000
- 1 : 25 000 – 1 : 20 000
- 1 : 10 000
- 1 : 5 000
- ▼ Cartographies dernière décennie

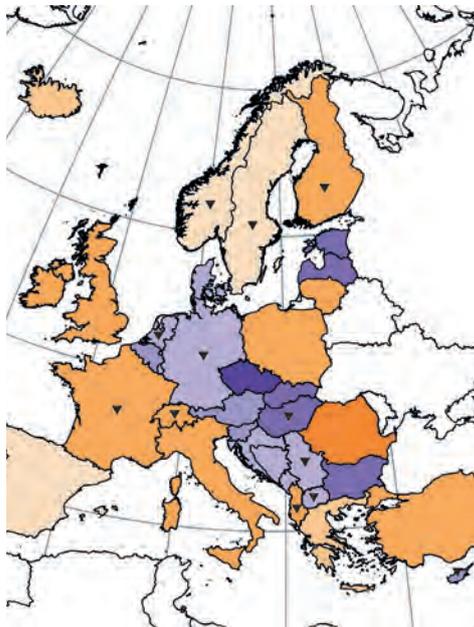


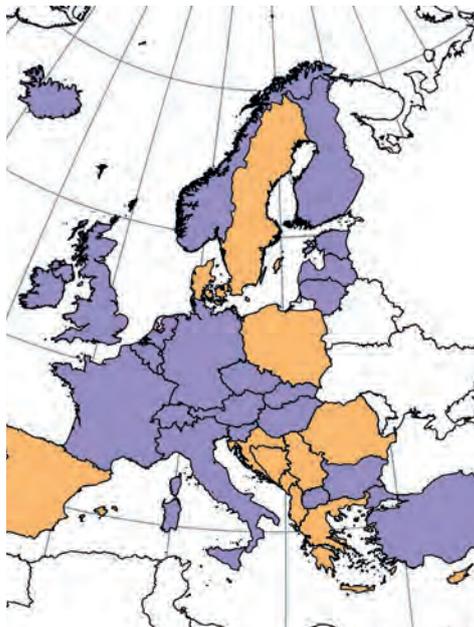
Illustration 17

Disponibilité des systèmes d'information sur les sols dans les pays de l'UE (critère : accès numérique aux cartes du sol).

Etude focalisée SYSTÈMES D'INFORMATIONS du PNR 68.

Système spatial d'information du sol:

- non existant
- existant
- données non recueillies



du sol) – des cartes d'application en lien avec la protection (par ex. cartes des risques d'érosion et de compaction) ou les propriétés du sol (par ex. cartes des fonctions de production et de régulation en Rhénanie-du-Nord-Westphalie, dans le Bade-Wurtemberg, dans la Hesse et la Rhénanie-Palatinat).

En France, l'Institut national de la recherche agronomique (INRA) a instauré au cours de la dernière décennie l'important portail d'information GIS SOL (www.gissol.fr). Par l'intermédiaire d'un service Internet, il permet au grand public comme aux spécialistes d'avoir accès à des données pédologiques et à des cartes exhaustives, à des informations cartographiques (profils, forages) et à un réseau de monitoring qui s'appuie sur une grille de plus de 2200 sites. Presque tous les pays étudiés visent à améliorer (préciser et actualiser) les informations du sol dont ils disposent en procédant au traitement des archives existantes, en élaborant des approches de modélisation ou en effectuant de nouveaux relevés. La plupart des pays européens s'attachent par ailleurs à mettre en place des SIS largement accessibles.

Activités internationales

Face aux défis posés par le changement climatique et l'alimentation future d'une population mondiale en expansion, diverses institutions s'efforcent actuellement de mieux recenser les sols et leurs propriétés au plan international. Bien que ces informations apparaissent absolument nécessaires, il n'existe pour l'instant aucune carte mondiale des sols dont l'échelle serait suffisamment significative. Une première tentative en ce sens avait été initiée par l'Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) en 1971⁸⁰. Celle-ci avait ensuite progressivement été élargie en y intégrant diffé-

Digression

La ressource sol dans le monde

En Suisse, une politique durable des ressources ne saurait être envisagée sans qu'il soit tenu compte des développements internationaux. Sur le plan mondial, les terres fertiles constituent en effet un bien à la disponibilité tout aussi limitée. La répartition spatiale des terres arables s'avère par ailleurs très inégale. Un aperçu global détaillé de la ressource sol fait toujours défaut^{79, 81}, même si des tentatives ont été effectuées afin d'évaluer la superficie totale des terres aptes à l'agriculture grâce à des systèmes d'information sur l'utilisation du sol et à des données de télédétection (ill. 18). Les résultats s'avèrent très différents en fonction des études réalisées: la FAO estime ainsi que les surfaces cultivables représentent près de 2130 millions d'hectares à l'échelle planétaire, ce qui correspondrait à 13% des terres émergées. Néanmoins, si seules les surfaces ne devant pas être irriguées car elles reçoivent suffisamment de précipitations sont comptabilisées, les terres arables disponibles (rainfed cropland) se réduisent à approximativement 1400 millions d'hectares⁸⁹.

Les surfaces cultivables existantes ne doivent cependant pas être considérées comme une grandeur statique dans la mesure où la dynamique temporelle à laquelle elles sont soumises est très forte. La FAO estime qu'environ 40% des terres qui étaient disponibles dans les années 1960 ne peuvent plus être exploitées aujourd'hui en raison des dommages entraînés par l'érosion des sols. Les terres arables vont par conséquent devoir être expansées partout dans le monde, principalement au détriment des forêts et des prairies^{80, 81}. Si de nouvelles surfaces n'ont cessé d'être mises à disposition de l'agriculture, beaucoup de terres agricoles ont parallèlement disparu du fait de la dégradation des sols. Ceux se prêtant à une future exploitation agricole étant néanmoins limités, il est essentiel d'assurer une utilisation durable des terres arables existantes.

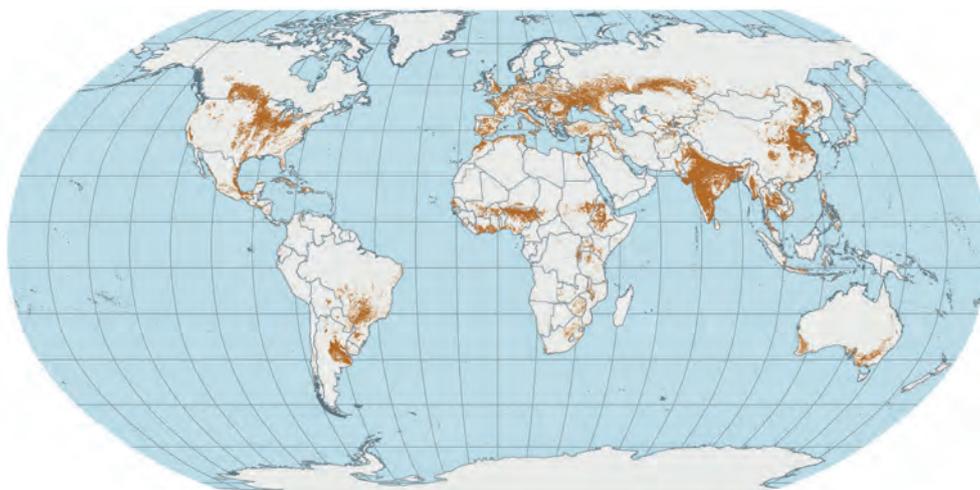
Les données de télédétection ne permettant qu'une évaluation approximative de l'ampleur des dégradations subies par des sols, les pertes mondiales annuelles dues à l'érosion, à la désertification et à la salinisation peuvent uniquement être estimées. Elles sont chiffrées à près de dix millions d'hectares par an rien que pour l'érosion des sols⁹⁰, soit une surface dix fois supérieure à la surface agricole utile de la Suisse.

Il est estimé qu'au moins 2000 millions d'hectares de terres arables et de prairies sont dégradés, soit près de 15% de la surface mondiale. Environ 300 millions d'hectares sont si fortement endommagés qu'ils ne peuvent

Illustration 18

Réserves mondiales de terres agricoles. Peu de pays disposent de sols aussi fertiles que la Suisse (estimation de la répartition des terres arables dans le monde⁸⁹).

Source: Global Land Cover Share, adapté par M. Nussbaum.



plus assurer leurs fonctions naturelles ni être exploités. Si ces estimations grossières datent déjà de plus de 25 ans, des chiffres actualisés n'offriraient pas une perspective plus optimiste⁹¹.

Du fait de leur superficie, les sols suisses ne jouent qu'un rôle subsidiaire dans la production mondiale de denrées alimentaires. Trois conclusions apparaissent toutefois essentielles en ce qui concerne les ressources en sol dont dispose la Suisse :

1. Les terres arables sont très inégalement réparties dans le monde et leur disponibilité est limitée. Agés de dix milliers d'années, les sols suisses se développent depuis la dernière période glaciaire : ils sont encore relativement jeunes, très fertiles et très précieux au vu du climat dont ils bénéficient.
2. Avec seulement 0,14 ha de terres arables par habitant, la Suisse dispose de très peu de terres fertiles par rapport à la moyenne internationale.
3. Face à la disparition des ressources naturelles observée partout dans le monde (sol, eau, biodiversité) et à l'expansion démographique mondiale, la préservation de ces ressources et la production de suffisamment de denrées alimentaires constituent pour la population actuelle, comme pour les prochaines générations, les plus importants défis à relever. Comme le prouvent les nombreuses acquisitions internationales (accaparement des terres ; par ex. www.grain.org) et la croissance exponentielle affichée par les fonds d'investissement dans les surfaces agricoles, la lutte globale pour les meilleurs sols s'est enflammée depuis longtemps.

rentes sources de données continentales. Le concept global du Partenariat mondial sur les sols (Global Soil Partnership, GSP) de la FAO (www.fao.org/global-soil-partnership/fr/) définit le relevé d'informations du sol et l'amélioration de la disponibilité des données pédologiques (informations et données) comme l'un des cinq piliers d'action pour une utilisation durable de la ressource sol (ill. 19, p. 53). Dans le cadre du GSP, le regroupement des SIS continentaux, ou des bases de données pédologiques correspondantes, est poursuivi à différents échelons^{81, 82}. L'International Network of Soil Information Institutions (INSII) a ainsi été fondé afin d'établir une plateforme permettant la coordination des SIS nationaux et une infrastructure européenne a été créée aux Pays-Bas au sein du Centre international de référence et d'information pédologique (World Soil Information Service, ISRIC; www.isric.org). L'ISRIC propose d'ores et déjà un service permettant de consulter des données mo-

délisées des propriétés des sols basées sur près de 110 000 profils de sol internationaux (www.soilgrids.org)⁸³.

Un des principaux objectifs du pilier d'action « Information et données » du GSP est constitué par le développement et la mise en œuvre d'un SIS international. Celui-ci doit contribuer à répondre à des questions en lien avec la production mondiale de denrées alimentaires ou à des problèmes d'environnement et de ressources tels ceux induits par le changement climatique, la sécurité alimentaire ou la perte de biodiversité. Librement accessible, la base de données harmonisée mondiale des sols (Harmonized World Soil Database, HWSD)⁸⁴ (annexe 2) est à ce jour celle qui est le plus fréquemment utilisée au plan international. Cette base de données globale offre une résolution spatiale de 1 × 1 kilomètre et comprend des indications relatives aux propriétés et aux types de sols qui sont conformes à la systématique pédologique

Illustration 19

Piliers d'action du Partenariat mondial sur les sols (Global Soil Partnership, GSP).

La mise à disposition d'informations du sol et la mise en place de SIS internationaux et globaux constituent l'un des cinq piliers d'action⁸¹.

1. Gestion des sols
2. Sensibilisation
3. Recherche
4. Information et données
5. Harmonisation



de la FAO. De par le passé, le SIS de l'ISRIC était élaboré sur des bases de données nationales – généralement des données de profil⁸⁵ – et comportait des informations sur les propriétés des sols à différentes profondeurs avec une résolution de 1 × 1 kilomètre ou encore plus élevée. L'ISRIC offre désormais un service accessible via une application pour smartphones (Soil-InfoApp). Des efforts sont parallèlement entrepris afin d'élaborer une carte des sols globale. Enfin, il convient de mentionner les nombreux travaux d'harmonisation et de regroupement des données pédologiques poursuivis en Europe qui sont coordonnés par l'ESDAC au sein des centres communs de recherche (CCR) de la Commission de l'UE⁸⁶⁻⁸⁸. L'ESDAC met à disposition d'importantes bases de données sur les cartes, les profils et les propriétés des sols.

2.6 Evaluation des fonctions du sol et des services écosystémiques

Instrument de prévention

Ces dernières années, la législation et les règlements d'exécution en matière de protection du sol visaient essentiellement à réduire ou à prévenir les risques encourus par les sols. A cette fin, des instruments d'évaluation ont été développés (et perfectionnés), y compris dans le cadre de plusieurs projets du PNR 68 (point 2.8, p. 64). Du fait de cette focalisation sur les risques, le sol tend à être considéré comme une source de problèmes plutôt qu'une ressource rare et précieuse, notamment dans les médias⁹².

En tant qu'instrument, l'évaluation des fonctions du sol met à l'inverse principalement l'accent sur le principe de précaution. La protection des fonctions du sol a pour objectif de les préserver dans la mesure du possible dans leur intégralité (multifonctionnalité) et de les concilier avec différentes utilisations dans un contexte pédologique donné. Reconnaître les services fournis par le sol contribue à améliorer la perception de sa valeur. Cependant, la Suisse ne dispose à ce jour ni de méthodes standardisées permettant de quantifier et d'évaluer ces services ni d'un concept global de prévention susceptible de s'inscrire dans une démarche de gestion durable en termes quantitatifs et où les exigences d'utilisation concurrentes inhérentes à l'aménagement du territoire intégreraient le sol et sa multifonctionnalité¹⁵.

Les fonctions du sol désignent les capacités dont il dispose dans le cycle de la nature, mais aussi dans son contexte fonctionnel. Autrement dit, elles indiquent dans quelle mesure il remplit, ou plus généralement, est en mesure de remplir potentiellement une tâche ou un objectif donné. A ce jour, il n'existe aucune définition communément admise du terme « fonction du sol » à l'échelle internationale. La capacité d'un sol à remplir différentes fonctions dépend de ses propriétés et de l'interaction de divers processus chimiques, physiques et biologiques. La simultanéité de ces fonctions fait qu'elles sont causalement indissociables les unes des autres. Si on les considère au re-

Tableau 6
Exemples de critères d'évaluation pour quelques sous-fonctions du sol^{3, 104}.

Sous-fonction du sol		Critères d'évaluation
Fonction de production		
Agricole		Productivité naturelle ¹⁰⁹ Approvisionnement suffisant en nutriments et conditions pédologiques appropriées à la croissance des plantes ¹¹⁰ Müncheberg Soil Quality Rating ¹¹¹ Aptitude à la production agricole ¹¹²
Forestière		Productivité naturelle du sol ¹¹³ Capacité de production des sites forestiers ¹¹⁴
Fonction de régulation		
Régime hydrique		Variable d'ajustement dans le cycle de l'eau ¹¹⁵ Capacité du sol à absorber l'eau ¹¹⁶ Capacité de l'humus à absorber l'eau ¹¹³ Taux d'infiltration de l'eau : contribution au renouvellement des eaux souterraines ¹⁰⁸
Cycle de la matière		Capacité du sol à libérer des nutriments pour la végétation ¹¹³ Approvisionnement en nutriments (capacité du sol à libérer les nutriments requis dans le cadre du cycle écologique) ¹¹⁰ Réserves mobilisables en nutriments ¹¹⁰ Capacité du sol à retenir les substances hydrosolubles comme le nitrate ; fréquence d'échange avec les eaux souterraines selon la capacité au champ ^{108, 116}
Filtre et tampon pour les substances inorganiques		Force de liaison relative des métaux lourds présents dans le sol jusqu'à une profondeur de profil d'un mètre ¹¹⁶ Force de liaison des métaux lourds ¹¹⁷ Capacité de rétention des métaux lourds ¹¹⁰
Filtre et tampon pour les substances organiques		Liaison et dégradation des polluants organiques ¹¹⁸ Liaison et dégradation des substances chimiques présentes dans les sols ¹¹⁹ Capacité des microorganismes à transformer les polluants organiques ¹¹⁰
Tampon pour les apports acides		Réserves de bases et de carbonates échangeables dans le sol jusqu'à une profondeur de profil d'un mètre ¹¹⁶ Force de liaison des polluants ¹¹⁵

Sous-fonction du sol		Critères d'évaluation
Fonction d'habitat		
Plantes		Conditions nécessaires au développement de communautés végétales dans des milieux aux conditions extrêmes ¹¹⁶ Propriétés particulières du milieu nécessaires au développement de biotopes ¹²⁰ Rareté des paramètres du sol pertinents et de l'état naturel ¹¹⁰ Fertilité naturelle du sol ¹¹⁵
Organismes du sol		Espace vital potentiel pour certaines biocénoses du sol ¹²¹
Réservoir génétique et biodiversité		Jusqu'à présent, il n'existe aucune méthode d'évaluation transposable dans la pratique ¹²³

gard de l'utilité qu'elles représentent pour les êtres humains, en tenant notamment compte des conditions-cadres socioéconomiques, on parle alors de services écosystémiques^{93,94}. Ces services représentent les contributions directes et indirectes apportées par les écosystèmes au bien-être humain⁹⁵ et découlent dès lors d'une perspective anthropocentrique. Jusqu'à présent, la contribution exacte des fonctions du sol n'a que rarement été analysée dans les études de quantification des services écosystémiques³. Il serait toutefois essentiel de mener une réflexion en ce sens afin de démontrer le rôle joué par les fonctions du sol dans la fourniture des services écosystémiques^{2,96}.

Sur le fond, l'approche consistant à étudier les fonctions du sol est étroitement liée au concept de qualité du sol^{97,98}, lequel définit la capacité d'un sol à remplir certaines fonctions précises⁹⁹. Les fonctions du sol sont également abordées lorsqu'il est question de fertilité du sol (soil ferti-

ty), de santé du sol (soil health), de garantie des ressources du sol¹⁰⁰ (soil security) et d'indicateurs du sol (soil indicators).

Fonctions du sol et fertilité

Selon l'article 2 de l'OSol¹⁹, un sol est considéré comme fertile si, outre sa fonction de production, il assure également les fonctions d'habitat et de régulation. Néanmoins, la définition de la fertilité du sol est controversée. Relevant davantage du concept, elle est difficile à appréhender au moyen de méthodes scientifiques. La fertilité ne constitue qu'un aspect de la multifonctionnalité des sols et pourrait être subsumée à la notion plus large de «qualité du sol»¹⁰¹. Dans le document de référence «Wegleitung zur Beurteilung der Bodenfruchtbarkeit»¹⁰² (uniquement en allemand), la fertilité du sol est conçue comme le résultat de l'interaction entre différentes fonctions du sol. Sur le fond, un sol doit remplir simultanément plusieurs fonctions pour être fertile.

Clôturé en 1991, le Programme national de recherche «UTILISATION DU SOL EN SUISSE» (PNR 22) a abordé les multiples fonctions du sol et les a considérées comme un produit des conditions naturelles et des utilisations projetées¹⁰³. Le PNR 22 a complété la perspective anthropocentrique, qui étudie comment les êtres humains doivent utiliser les fonctions du sol, par le concept d'une utilisation mesurée du sol: «[...] gérer le sol – qui est une ressource à la fois rare et précieuse – dans l'espace et dans le temps de manière à garantir durablement ses multiples propriétés et fonctions». Dans cette perspective, le programme a défini six principes – notamment le respect de la multifonctionnalité du sol – sans toutefois développer des instruments permettant de mesurer lesdites fonctions.

Méthodes d'évaluation des fonctions du sol
Voici les quatre fonctions (principales) du sol qui sont généralement prises en compte:

- **Fonction d'habitat:** Capacité du sol à servir d'espace vital aux organismes et à contribuer à la préservation de la diversité des écosystèmes et des espèces ainsi qu'au maintien de leur diversité génétique.

- **Fonction de régulation:** Capacité du sol à réguler les cycles de la matière et de l'énergie, à assumer une fonction de filtre, de tampon et de stockage ainsi qu'à transformer les substances.

- **Fonction de production:** Capacité du sol à produire de la biomasse (aliments et fourrage, bois et fibres).

- **Fonction d'archivage:** Capacité du sol à conserver le patrimoine naturel et culturel.

Deux autres fonctions (principales) relèvent de la nature du sous-sol et sont peu pertinentes pour l'écologie:

- **Fonction de support:** Capacité du sol à servir de terrain pour une utilisation donnée.

- **Fonction de fournisseur de matières premières:** Capacité du sol à stocker les matières premières.

Fondamentalement, il existe trois niveaux d'évaluation des fonctions du sol¹⁰⁴, qui sont ensuite intégrés lors d'autres étapes de travail à la quantification des services écosystémiques²:

1. Evaluation simplifiée des fonctions du sol dans l'optique de l'aménagement du territoire (performances générales des sols indépendamment de l'utilisation du terrain).

2. Evaluation semi-dynamique dans le cadre des questions de protection de l'environnement (évaluation de l'incidence de l'utilisation du sol sur ses performances à l'aide de méthodes simplifiées).

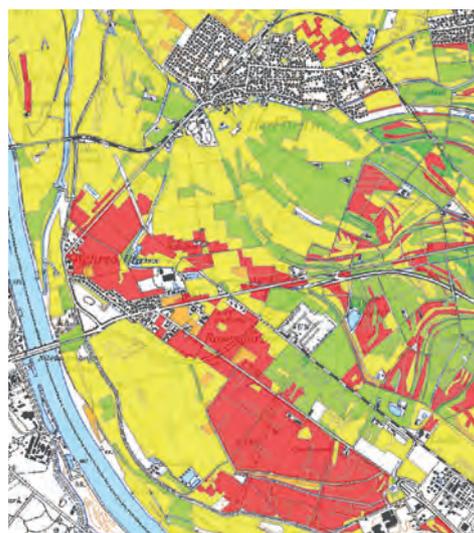
3. Evaluation dynamique comme base scientifique (modèles de processus en-

Illustration 20

Exemple d'une évaluation des fonctions du sol dans le Land de la Hesse (DE). Les sols offrant les meilleures performances sont représentés en rouge sur la carte.

- non évalué
- très faible
- faible
- moyen
- élevé
- très élevé

Source: <http://bodenviewer.hessen.de>



vironnementaux et prise en compte des changements d'affectation des terres).

Pour peser les intérêts entre différentes exigences d'utilisation concurrentes dans le cadre de l'aménagement du territoire, il est principalement nécessaire de recourir à des méthodes d'évaluation simplifiées relevant du niveau 1¹⁰⁵. Les évaluations dynamiques basées sur des modèles biophysiques de processus du sol sont, quant à elles, conçues pour évaluer des problématiques complexes relatives aux fonctions du sol en lien avec son utilisation, et établir des prévisions. Elles nécessitent toutefois un important travail de fond et de nombreuses données de base¹⁰⁶.

Pour que le concept de fonctions du sol et de services écosystémiques puisse être exploité dans la politique d'aménagement du territoire tout en étant utile à la protection du sol et de l'environnement ainsi qu'à la planification des ressources, il convient de privilégier des méthodes simples et transparentes qui permettent de déterminer la valeur du sol à partir d'informations pédologiques¹⁰⁷. Ces méthodes d'évaluation s'appuient sur des connaissances spécialisées et sur des données pédologiques re-

cueillies lors de relevés cartographiques. En conséquence, les méthodes d'évaluation des fonctions du sol sont étroitement liées à celles de la cartographie. Les fonctions du sol englobant généralement plusieurs sous-aspects, elles sont subdivisées en autant de sous-fonctions¹⁰⁸. Celles-ci peuvent être évaluées à l'aide de critères d'évaluation définis qui découlent à leur tour de caractéristiques pédologiques. Le tableau 6 (p. 54–55) présente une série d'exemples de sous-fonctions du sol et de critères d'évaluation correspondants. Certaines sous-fonctions du sol ont été évaluées dans le cadre du projet CARTES DES SOLS du PNR 68 pour deux régions d'étude.

Les méthodes d'évaluation doivent satisfaire un certain nombre d'exigences de qualité tout en étant compréhensibles et transparentes¹²⁴. Le résultat d'une évaluation est généralement représenté comme une grandeur adimensionnelle, le plus souvent au moyen de valeurs comprises entre 1 (degré de satisfaction très faible) et 5 (degré de satisfaction très élevé) (ill. 20, p. 56). L'Allemagne, qui évalue depuis longtemps les fonctions du sol, s'est dotée d'une base juridique pour la pro-

Illustration 21
Processus général d'évaluation des fonctions du sol³.

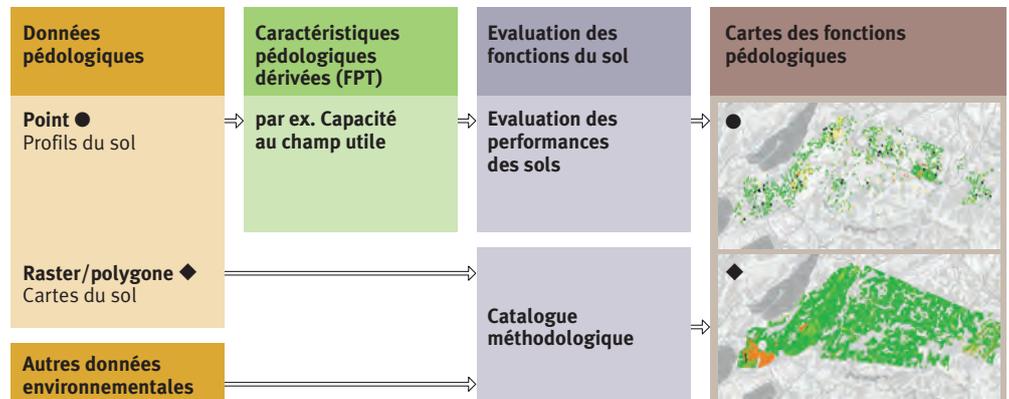
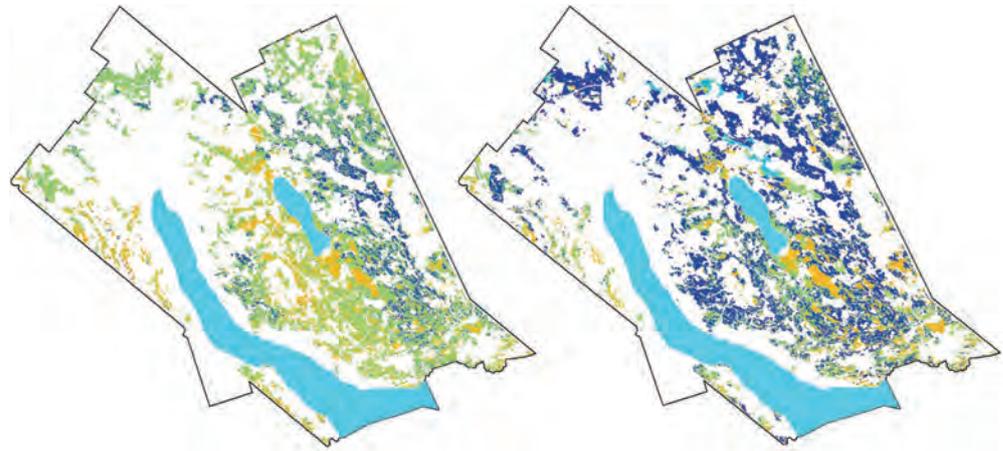


Illustration 22

Cartes des fonctions du sol pour la région d'étude du canton de Zurich¹⁴⁴.

Projet CARTES DES SOLS du PNR 68.

- non évaluées
- très élevées
- élevées
- moyennes
- faibles
- très faibles



Fonction de régulation : infiltration des précipitations et capacité de rétention d'eau

Fonction de régulation : capacité de rétention des nutriments

tection des fonctions du sol dès 1998, en édictant la loi fédérale sur la protection des sols (BBodSchG)¹²⁵. Cette loi a permis l'émergence de méthodes d'évaluation qui ont principalement été développées par les offices des Landesämter^{108,110,111}. Le groupe de travail national Ad-Hoc-AG Boden a par la suite dressé un catalogue des méthodes d'évaluation et formulé des recommandations quant à leur application¹⁰⁶. D'autres pays s'appuient aussi de plus en plus sur l'évaluation des fonctions du sol pour intégrer la question de la gestion durable de la ressource sol au débat politique¹²⁶⁻¹³³.

L'Autriche a, pour sa part, adopté une norme nationale pour l'évaluation des fonctions des sols¹³³. Diverses études de cas se sont même attachées à élaborer des cartes illustrant les fonctions du sol^{134,135} et à analyser des solutions pour adapter les méthodes d'évaluation allemandes au système de classification pédologique de l'Autriche¹³⁶. A ce jour, la Suisse possède des méthodes d'évaluation essentielle-

ment pour la fonction de production des sols agricoles^{46,137,138} et des sols forestiers¹¹⁴. Certains cantons mettent également à disposition sur leur portail Internet des cartes avec des paramètres dérivés. Pour les sols forestiers, il existe aussi d'autres méthodes adaptées à l'évaluation du régime hydrique¹³⁹ ainsi qu'à l'évaluation de l'état et de la dynamique de l'acidification du sol^{140,141}.

Le concept de fonctions du sol permet de jeter un pont entre la pédologie et d'autres disciplines spécialisées¹⁰⁴. Telle est d'ailleurs l'approche qui a été privilégiée dans les projets du PNR 68 CARTES DES SOLS, SYSTÈME D'ALERTE PRÉCOCE et PLATE-FORME DE DÉCISION (ill. 11, p. 38). Le projet SYSTÈME D'ALERTE PRÉCOCE a associé l'exploitation dynamique des sols agricoles avec leurs performances (point 2.8, p. 64). Dans le but d'élaborer des cartes des fonctions pédologiques, l'équipe de recherche du projet CARTES DES SOLS du PNR 68 a employé des méthodes d'évaluation pour dix sous-fonctions du sol dans deux ré-

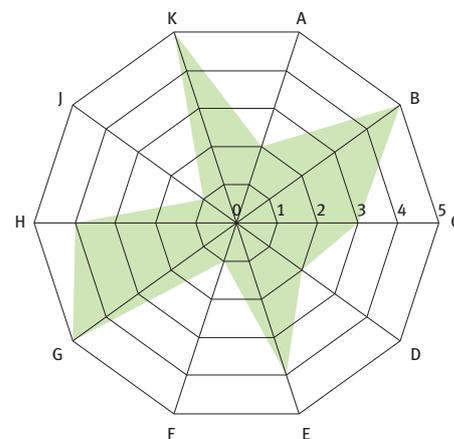
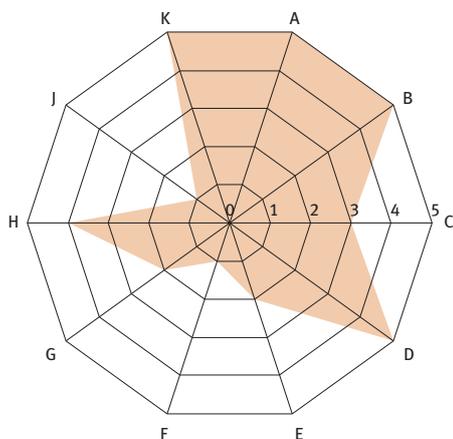
Illustration 23

Diagramme de représentation de la multifonctionnalité des sols et des performances spécifiques d'un sol¹⁴⁴.

Sol brun (à gauche)
Gley coloré (à droite)

Projet CARTES DES SOLS du PNR 68.

- A Régulation des nutriments 1
- B Régulation des nutriments 2
- C Régulation du régime hydrique
- D Production agricole
- E Habitat pour les micro-organismes
- F Habitat pour les plantes
- G Régulation du bilan carbone
- H Régulation des acides
- J Régulation des polluants organiques
- K Régulation des polluants inorganiques



gions d'étude. L'illustration 21 (p. 57) présente la démarche générale: tout d'abord, les informations du sol à disposition sont préparées puis harmonisées (point 2.2, p. 36). Pour de nombreuses sous-fonctions du sol, il est nécessaire de tenir compte d'autres caractéristiques pédologiques, notamment la capacité de rétention utilisable ou la conductivité hydraulique saturée. Bien que difficiles à mesurer directement, ces caractéristiques peuvent être estimées à l'aide des fonctions de pédotransfert (FPT)^{104, 143}. Néanmoins, elles ne sont transposables aux spécificités de la Suisse que de manière limitée ou au prix d'une importante charge de travail.

Les propriétés du sol et les caractéristiques enregistrées lors d'une cartographie des sols correspondent en grande partie aux informations pédologiques nécessaires à l'évaluation des fonctions du sol. L'évaluation des fonctions du sol livre sous forme de cartes des bases de planification pour certaines sous-fonctions du sol (ill. 22, p. 58). Si cela est souhaité, il est possible de procéder à une agrégation des fonctions du sol pour obtenir une évaluation globale^{124, 132}. L'éventail des fonctions des

différents sols étudiés (ill.23) offre une base solide pour une utilisation du sol adaptée et durable.

Agrégation des sous-fonctions pédologiques sous la forme d'un indice du sol

Les résultats de l'évaluation des différentes sous-fonctions du sol peuvent être agrégés à l'échelle de chaque fonction pédologique ou être synthétisés sous la forme d'un indice du sol de manière à disposer d'une évaluation globale incluant toutes les fonctions du sol. Une évaluation globale révèle tout son sens dès lors que plusieurs aspects relatifs à la protection du sol sont utilisés comme base de comparaison avec d'autres problématiques¹⁴⁵, ce qui est principalement le cas dans les politiques et décisions liées à l'aménagement du territoire. L'Autriche, dans le document «Wegleitung zur Bodenfunktionsbewertung»¹³³, ainsi que les Bundesländer de Rhénanie-Palatinat et de la Hesse en Allemagne¹³² délivrent des directives spécifiques sur les sous-fonctions pédologiques à évaluer et la pondération à privilégier pour leur agrégation. En effet, la ressource sol peut peser davantage dans les processus de décision, dès lors que l'on consi-

dère l'ensemble des fonctions pédologiques sous une forme agrégée. Dans cette perspective, un indice du sol constitue un indicateur combiné de quantité et de qualité que l'on peut obtenir par agrégation de certaines fonctions pédologiques. L'agrégation présente néanmoins le risque de voir éventuellement disparaître le modèle spatial inhérent à chaque sous-fonction du fait de la superposition et de la pondération intervenues. Dans son catalogue méthodologique, le groupe de travail Ad-Hoc-AG Boden en Allemagne¹⁰⁸ déconseille toute agrégation, car les informations relatives à chacune des sous-fonctions du sol devraient en principe être prises en compte individuellement dans les décisions politiques essentielles pour le sol. Le projet CARTES DES SOLS du PNR 68 a analysé plusieurs variantes d'agrégation pour dix sous-fonctions pédologiques. Les cartes d'indices pédologiques en résultant présentent en partie des différences importantes pour une même région¹⁴⁴. Par conséquent, d'autres débats et développements doivent encore être menés à bien avant que les sous-fonctions pédologiques puissent être pondérées et agrégées de manière à obtenir une évaluation globale sous la forme d'une carte des indices pédologiques.

Fonctions du sol et services écosystémiques
Déterminés à partir de l'évaluation et la quantification des fonctions du sol, les services écosystémiques intègrent également les conditions-cadres socioéconomiques et politiques² (ill. 2, p. 17). Le concept de services écosystémiques a pour but de rendre perceptibles la valeur des écosystèmes – y compris de la ressource sol – et leur utilité pour l'Homme. Bien que des instruments divers et variés aient été développés pour opérationnaliser le concept de services écosystémiques¹⁴⁶, la ressource sol n'a jusqu'à pré-

sent que rarement, ou insuffisamment, été prise en compte^{96,147-149}. Plusieurs projets du PNR 68 ont analysé le rôle du sol dans le contexte des services écosystémiques.

Issu de la mise au concours de la Joint Programming Initiative Agriculture, Food Security and Climate Change (FACCE-JPI), le projet TALE (Pour des paysages agricoles multifonctionnels en Europe) a analysé l'influence de différents scénarios d'utilisation du sol sur les services écosystémiques agricoles, comme la production de denrées alimentaires et la biodiversité, ainsi que sur les services écosystémiques relevant de la protection des sols et des eaux. Le recours à un modèle biophysique dans la région de la Broye (Neuchâtel) a permis de démontrer les effets de l'assolement, des cultures intermédiaires et de l'intensité de l'exploitation sur les services écosystémiques agricoles. Le projet a en particulier mis en lumière les compromis à opérer entre certains services écosystémiques dans le cas d'une utilisation donnée.

L'étude focalisée INDICATEURS DU SOL menée dans le cadre du PNR 68 présente des instruments de régulation qu'il serait possible d'utiliser afin de limiter à l'avenir l'imperméabilisation du sol et propose d'intégrer la qualité du sol dans la planification territoriale en utilisant des points d'indice pédologiques. Dans le cadre de l'étude focalisée, une enquête «Delphi» a été réalisée auprès d'experts qui ont évalué de manière pondérée l'importance des dix sous-fonctions pédologiques prises en compte dans le projet CARTES DES SOLS du PNR 68 pour 18 services écosystémiques. Leur évaluation a permis de générer des cartes des services écosystémiques à partir des cartes des fonctions pédologiques pour la région d'étude de Zurich⁷.

Egalement issu de la mise au concours FACCE-JPI, le projet DEVIL (Sécurité alimentaire sur les territoires limités) a analysé le rôle du sol dans la sécurité alimentaire sur des territoires limités. Ce projet de coopération internationale met en regard des modèles étudiant la demande de denrées alimentaires à l'échelle d'un territoire et l'offre correspondante en fonction des ressources naturelles et socioéconomiques à disposition. Dans cette perspective, la ressource sol joue un rôle essentiel dans les interactions existantes entre la gestion du sol, les changements dans cette gestion et la sécurité alimentaire.

Les deux projets STACCATO (Service écosystémiques dans les paysages agricoles) et BASIL (Biodiversité dans les systèmes agricoles) issus de la mise au concours FACCE-JPI se sont quant à eux intéressés aux mesures susceptibles de promouvoir certains services écosystémiques dans

les systèmes de production agricole. Ils se concentrent essentiellement sur les fonctions de production (nutriments et rendements), les fonctions de régulation (lutte biologique contre les ravageurs, agencement et densité des surfaces à haute valeur écologique), mais aussi sur la biodiversité des paysages soumis à une exploitation agricole intensive et extensive.

2.7 Cartographie des sols comme base pour délimiter les surfaces d'assolement

La densité de population sur le Plateau suisse est supérieure à la moyenne européenne. Conséquence: les surfaces productives et à haute valeur écologique sont soumises à une forte pression (ill. 24, p. 61). La croissance démographique et l'augmentation de la surface habitable par personne réduisent de plus en plus les surfaces disponibles. De 1983 à 2007, la surface agricole utile a diminué de 851

Illustration 24
Changement dans la gestion du sol dans la région de Bern-Westside entre 2002 (photos du haut) et 2008 (photos du bas).

Source: Bibliothèque de l'EPF de Zurich, Archives iconographiques/Fondation Documenta Natura.



kilomètres carrés sur le Plateau suisse et dans les régions de montagne – une surface comparable à celle du canton du Jura. Parmi tous les risques, c'est l'imperméabilisation des surfaces qui porte la plus grande atteinte à la ressource sol, car elle anéantit toutes les fonctions écologiques.

En l'absence d'informations pédologiques, la question de la qualité du sol risque d'être négligée dans les décisions relatives à l'aménagement du territoire. La synthèse thématique ST3 propose de prendre en compte la qualité du sol dans l'aménagement du territoire en utilisant des points d'indice pédologiques. Le PS SDA constitue à cet égard un outil essentiel du processus d'aménagement du territoire, même s'il prend seulement – mais tout de même – en compte la fonction de production du sol (denrées alimentaires). En vertu de la décision du Conseil fédéral du 8 avril 1992, quelque 438 560 hectares SDA

sont protégés en Suisse. Cependant, il est pour l'heure impossible de déterminer si cette protection porte ses fruits. Plusieurs cantons ont utilisé pratiquement l'intégralité du contingent qui leur a été attribué dans le cadre du PS SDA. La protection du territoire agricole fait dès lors également l'objet d'initiatives cantonales.

Ces dernières années, les cantons ont géré de manière autonome leur inventaire SDA. Toutefois, comme ils ont eu recours à des méthodes de relevé très différentes avec un souci de précision variable, il est pratiquement impossible de comparer les inventaires à l'échelle intercantonale¹⁵⁰. Cette irrégularité résulte principalement des lacunes observées en ce qui concerne les bases de planification pédologiques des cantons. Les principales caractéristiques utilisées pour délimiter les SDA sont la profondeur utile aux plantes, le régime hydrique, la pierrosité et la porosité (ill. 25,

Illustration 25

Schéma d'inventaire des surfaces d'assolement. De nombreuses propriétés du sol déterminent l'aptitude des terres à l'exploitation agricole. La cartographie permet de relever des propriétés pédologiques importantes sur la profondeur et de délimiter les surfaces d'assolement à l'aide de modèles d'évaluation.

Source : M. Zürrer, myx GmbH; A. Keller, Agroscope.

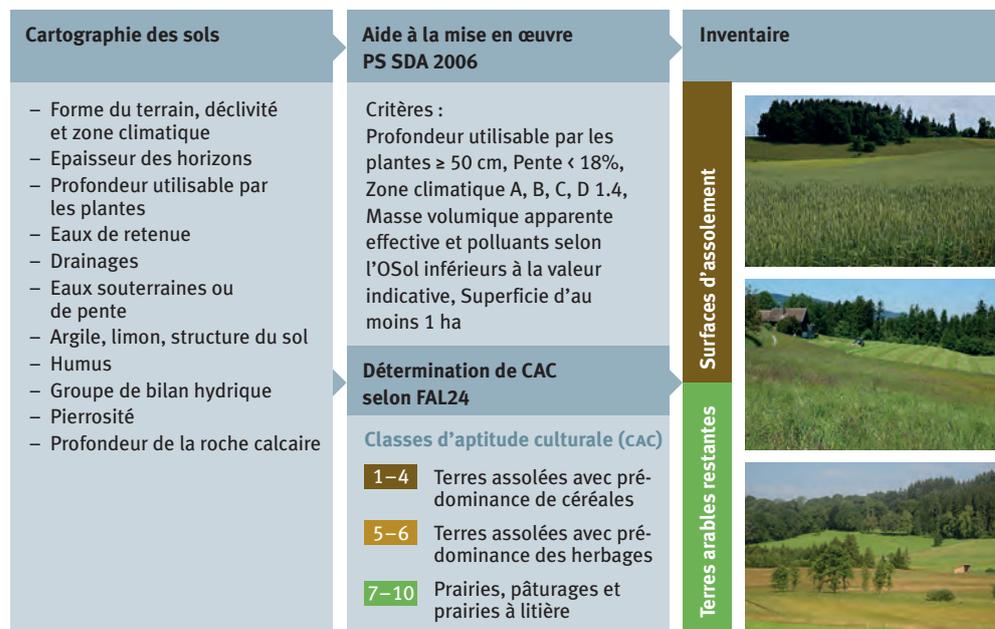


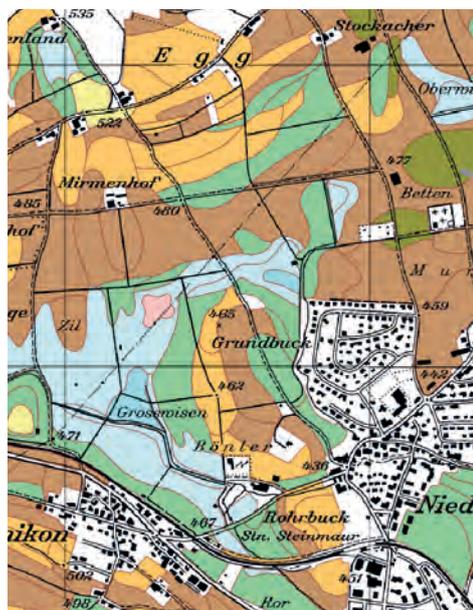
Illustration 26

Carte des sols comme base d'évaluation de l'aptitude culturelle (CAC) et la délimitation des SDA.

Exemple du canton de Zurich au 1:5000.

Les couleurs indiquent les différentes classes du régime hydrique.

Source : www.gis.zh.ch



p. 62)⁴⁶. En procédant à un relevé pédologique à l'échelle nationale, la Confédération et les cantons disposeraient de bases de données étayées et fiables pour appliquer le PS SDA.

En 2006, l'Office fédéral du développement territorial (ARE) a élaboré une Aide à la mise en œuvre du PS SDA¹⁵¹ pour évaluer les cas particuliers et délimiter les nouvelles SDA. Outre les facteurs propres au site, notamment la zone climatique, la taille des parcelles et la déclivité, la délimitation de nouvelles SDA exige une profondeur utile aux plantes d'au moins 50 centimètres et le respect d'autres critères relatifs à la compacité et à la teneur en polluants des sols. Tous ces critères ont valeur d'exigences minimales quant à la qualité du sol et du site. A l'heure actuelle, les cantons utilisent des méthodes différentes pour recenser les SDA et appliquent aussi différemment les critères Zprescrits¹⁵². Certains cantons limitent

l'aptitude climatique à 600 mètres au-dessus du niveau de la mer, d'autres à 900 mètres ; d'autres ne considèrent que partiellement comme SDA les surfaces, dont la déclivité est comprise entre 18 et 25 degrés. De même, la profondeur utile aux plantes est déterminée à partir de méthodes différentes selon les cantons¹⁵⁰. Aujourd'hui encore, pas moins de dix cantons déterminent les SDA uniquement en fonction de l'aptitude agricole au sens de la méthode FAL 24 (ill. 26). Les cantons restants s'appuient sur les bases de données issues de l'Aide à la mise en œuvre datant de 1983, qui repose elle-même sur des cartes très sommaires à l'échelle 1:200 000¹⁵⁰.

Les responsables politiques ont reconnu la nécessité d'harmoniser les pratiques et de préserver les terres cultivables disponibles. En 2015, le Contrôle parlementaire de l'administration (CPA) a réalisé une évaluation¹⁵³ à l'intention de la Commission de gestion du Conseil national (CDG-N)¹⁵⁴ dans le but de maintenir la superficie des terres cultivables en accordant une importance particulière aux surfaces d'assolement. La Commission déplore notamment les manquements précités et, entre autres, l'impossibilité de comparer les inventaires SDA. Elle regrette par ailleurs que de nombreux cantons n'aient pas recensé la qualité des sols sur l'ensemble de leur territoire. Dans le cadre des Aides à la mise en œuvre du PS SDA, l'Administration fédérale avait pourtant la possibilité d'imposer des exigences uniformes pour la délimitation des SDA¹⁵⁴. Un groupe d'experts a été chargé d'élaborer, des recommandations en vue de réviser et de renforcer le PS SDA. L'une des recommandations de ce groupe d'experts sera qu'une cartographie nationale des sols soit effectuée afin de garantir une délimitation fiable et uniforme des SDA.

Tableau 7
Instruments de calcul et d'évaluation des risques pour les sols (la problématique de l'imperméabilisation est approfondie dans la ST3).

Risques pour les sols	Instrument et projet
Compaction	Projet TASSEMENT DES SOLS du PNR 68 (T. Keller, Agroscope) TERRANIMO : modèle de calcul permettant de déterminer le risque de compaction du sol lors de l'utilisation de véhicules agricoles (T. Keller, Agroscope)
Erosion	Risque d'érosion potentiel des surfaces agricoles utiles (carte des risques d'érosion [CRE2], V. Prasuhn, Agroscope)
Perte d'humus	Projet ENTRÉES DE CARBONE du PNR 68 (J. Mayer, Agroscope) Projet SOLS MARÉCAGEUX du PNR 68 (J. Leifeld, Agroscope) Logiciel sur le bilan humique (P. Weisskopf, H. Oberholzer, Agroscope) Projet STRUDEL: teneur en humus pour une bonne structure de la terre arable (P. Boivin, HEPIA)
Apports de fertilisants et de polluants	Projet SYSTÈME D'ALERTE PRÉCOCE du PNR 68 (A. Keller, Agroscope) Projet MODÈLE D'EXPLOITATION DU SOL du PNR 68 (A. Keller, Agroscope) Projet SYSTÈME DE CULTURE AMÉLIORANT LE SOL du PNR 68 (R. Charles, Institut de recherche de l'agriculture biologique, FiBL) Projet COUVERTS VÉGÉTAUX du PNR 68 (B. Streit, Haute école bernoise des sciences agronomiques, forestières et alimentaires, HAFL) Projet RÉSISTANCE AUX ANTIBIOTIQUES du PNR 68 (B. Duffy, Haute école des sciences appliquées de Zurich, ZHAW) Modèle MODIFUSS: calcul des apports diffus de nutriments et de polluants dans les cours d'eau (V. Prasuhn, Agroscope) Projet FROSCH: identification précoce des polluants organiques dans les sols (T. Bucheli, Agroscope)
Acidification	Risque d'acidification des sols forestiers (S. Zimmermann, wsl)
Glissements de terrain	Projet STABILITÉ DES SOLS du PNR 68 (F. Graf, Institut pour l'étude de la neige et des avalanches, wsl-slf)

2.8 Instruments de protection des sols

L'imperméabilisation est loin d'être la seule menace qui pèse sur les sols. D'autres facteurs, comme les pollutions chimiques, l'érosion, la compaction, la perte de biodiversité et d'humus, risquent aussi d'altérer la qualité des sols ou de leur nuire considérablement. Certains dangers peuvent survenir en quelques minutes seulement (compaction, érosion) ou de manière insidieuse au fil des années ou des décennies, comme c'est le cas des

apports diffus de polluants ou de la perte d'humus. Il y a 25 ans, ces dangers faisaient déjà l'objet de plusieurs projets du PNR 22. De nombreux résultats et recommandations de l'époque sont toujours d'actualité aujourd'hui^{103,155}. Si diverses mesures ont effectivement permis de stabiliser la situation voire de réduire certains risques, la gestion de la ressource sol ne satisfait toujours pas aux principes de durabilité. C'est du moins ce qui ressort du « Rapport sur l'état des sols 2017 »¹⁵⁶ qui s'appuie principalement sur diverses

informations de la Confédération, des cantons et de projets de recherche – en l’absence d’une vue d’ensemble de l’ampleur et de la portée des risques menaçant les sols au plan national.

Dans l’agriculture, les objectifs écologiques visant à réduire les apports de polluants et à protéger les sols contre l’érosion et la compaction n’ont pas été atteints ou n’ont pas pu être évalués en raison d’informations lacunaires²⁴. En revanche, il existe en Suisse alémanique un inventaire complet des risques qui pèsent sur les sols du point de vue des acteurs de la pratique et de l’exécution de la protection des sols¹.

Ces dernières années, la législation et l’exécution en matière de protection du sol se sont principalement attachées à réduire ou à prévenir les risques tels que l’érosion, la compaction et les apports de polluants. Les synthèses thématiques ST1¹⁵⁷ et ST2¹⁵⁸ du PNR 68 ont approfondi les connaissances scientifiques concernant les risques induits par l’utilisation des sols et proposé des mesures appropriées pour promouvoir une gestion durable des sols. La présente synthèse thématique (ST4) a, quant à elle, pour objectif d’établir un récapitulatif des instruments pratiques pouvant être utilisés afin de mesurer et d’évaluer les risques qui sont susceptibles d’être significatifs en termes d’exécution. En ce sens, il s’agit principalement d’approches, de schémas d’évaluation ou de modèles écologiques qui permettent d’interpréter des paramètres pertinents pour l’exécution de la protection des sols à partir des informations pédologiques, des données d’exploitation et des autres facteurs locaux, et d’élaborer des mesures contribuant à une utilisation durable des sols (tab. 7, p. 64).

Compaction des sols

La compaction du sol influe sur la qualité de celui-ci. Les risques augmentent proportionnellement au poids des véhicules utilisés dans l’agriculture et la sylviculture. L’on craint principalement les conséquences à long terme de la compaction du sous-sol, étant donné que la régénération de la structure du sol dans les couches inférieures est un processus très long. Le modèle TERRANIMO (www.terranimo.ch) aide les utilisateurs à évaluer le risque actuel de compaction du sol par les véhicules agricoles en indiquant, outre les paramètres de la machine (charge à la roue et pression de gonflage), des données sur la teneur en argile et le degré d’humidité du sol (force de succion). Ce dernier paramètre est disponible sur le site du Réseau de mesure de l’humidité des sols (point 2.4, p. 43). Un instrument de prévention comme TERRANIMO s’avère d’autant plus important pour les acteurs de la pratique que la régénération des sols tassés peut s’échelonner sur plusieurs générations et occasionner des coûts élevés. Pour étudier la régénération des sols tassés en fonction de différents scénarios d’exploitation (utilisation, cultures) sur une longue période, l’essai à long terme « Soil Structure Observatory » (sso) a été mené sous la forme d’un projet conjoint dans le cadre du projet TASSEMENT DES SOLS du PNR 68¹⁵⁹.

Erosion du sol

Grâce à la carte du risque d’érosion offrant une résolution spatiale de 2 × 2 mètres (CRE2), la Suisse possède un instrument pertinent pour adopter des mesures ciblées de protection des sols contre l’érosion. Disponible sur le géoportail fédéral (www.geo.admin.ch), la CRE2 est actualisée en temps réel et devrait, par ailleurs, être dotée d’une interface plus conviviale à compter de 2018^{160,161}. Le risque d’érosion calculé est réparti entre différentes

classes de risque, auxquelles une couleur (vert, jaune, rouge) a été attribuée. Pour améliorer le calcul de la sensibilité du sol à l'érosion (facteur K) et, par là même, la qualité de la carte du risque d'érosion, il est nécessaire de disposer d'informations sur la teneur en argile et en limon des couches superficielles à l'échelle nationale.

Perte d'humus

La teneur en humus constitue un facteur clé de la qualité du sol. En effet, l'humus joue un rôle central dans la stabilité de la structure du sol et la répartition des pores et, par conséquent, dans le régime de l'eau et de l'air, l'activité des organismes du sol, le stockage et l'apport de nutriments. Les ST1 et ST2 abordent en détail les questions de la teneur en humus et de la gestion durable des sols. Le projet SOLS MARÉCAGEUX du PNR 68 a développé un instrument susceptible de soutenir efficacement l'exploitation des sols organiques, tels qu'on les trouve dans le Seeland bernois. L'un des principaux objectifs consistait à identifier les caractéristiques des sols organiques. Afin d'évaluer l'influence de la production agricole sur les sols marécageux, des indicateurs ont été développés à l'échelle des parcelles, des exploitations agricoles et de la région. Pour les utiliser, il est indispensable de recenser les sols organiques de la Suisse, comme il est question de le faire depuis plusieurs années pour les quelque 5000 hectares du Grand Marais situés entre les lacs de Biemme, de Neuchâtel et de Morat. Un relevé effectué à cette fin a fourni les bases indispensables pour élaborer un plan conceptuel dans le but de procéder aux valorisations et aux réaménagements exigés par les agriculteurs¹⁶².

Le bilan humique des sols agricoles (www.humusbilanz.ch), qui est mis à disposition gratuitement par l'Institut de recherche

Agroscope constitue un outil précieux pour améliorer l'utilisation durable des sols en préservant notamment leur teneur en humus. Il propose des informations permettant d'interpréter les résultats et recommande des mesures pour améliorer le bilan humique. Cet outil permet aux agriculteurs de déterminer si le mode d'exploitation actuel contribue à stabiliser ou à augmenter la teneur en humus, ou s'il induit un risque de perte d'humus. Le projet ENTRÉES DE CARBONE du PNR 68 a apporté une contribution majeure au calcul du bilan humique. Il a en effet analysé les répercussions de l'exploitation agricole sur la quantité de carbone entrant dans le sol par le biais des cultures. Les facteurs régissant les entrées de carbone ainsi identifiés améliorent la précision du bilan humique.

Une teneur en humus favorable influence positivement la stabilité de la structure du sol et constitue, avec la teneur en argile, un indicateur clé de la stabilité du sol¹⁶³. Le projet STRUDEL a analysé la contribution de différents teneurs en humus à la structure du sol, développé un indicateur illustrant le rapport entre la teneur en dioxyde de carbone et la teneur en argile du sol et mis au point un schéma d'évaluation. Un rapport supérieur ou égal à 1:8 révèle une teneur idéale en humus, tandis qu'un rapport inférieur ou égal à 1:13 appelle des mesures pour améliorer la teneur en humus des sols agricoles¹⁶⁴. Cet indicateur est d'ores et déjà employé dans le canton de Genève.

Apports de fertilisants et de polluants

Les engrais et les matières auxiliaires utilisés dans l'agriculture apportent, en plus des éléments fertilisants souhaités, des substances polluantes qui s'accumulent durablement dans le sol. En cas d'apport excessif, les substances introduites inten-

tionnellement ou involontairement dans le sol peuvent non seulement porter atteinte à sa qualité, mais aussi le transformer en une source de pollution pour d'autres domaines environnementaux et, en fin de compte, pour la santé humaine. La situation est en particulier critique lorsque des nitrates, des pesticides, des médicaments ou toutes autres substances très actives sur le plan biologique atteignent les nappes d'eau souterraine. Le projet SYSTÈME D'ALERTE PRÉCOCE du PNR 68 a développé un outil régional de monitoring des sols qui permet d'équilibrer les cycles de la matière dans les sols agricoles à l'échelle régionale, dans le but de prévenir les apports de polluants dans les sols (ill. 27, ci-dessous)^{165, 166}. Cet outil permet de détecter de manière précoce les développements non durables au sein d'une région et de déterminer, à l'aide des scénarios proposés, des mesures adaptées à l'échelle régionale.

Les risques qui pèsent sur les sols étant étroitement liés à l'utilisation agricole, il est primordial de disposer d'informations spatio-temporelles détaillées sur le mode

d'exploitation pour pouvoir les localiser et évaluer leur ampleur. Parmi les sols utilisés à des fins agricoles, il convient de distinguer les terres cultivées des prairies. Le projet MODÈLE D'EXPLOITATION DU SOL du PNR 68 a développé un modèle permettant de recenser sur l'ensemble du territoire l'utilisation des sols cultivés et des prairies au fil des années sur la base de séries chronologiques de données de télédétection (ill. 28, p. 68)¹⁶⁷.

Près de la moitié des surfaces agricoles du Plateau suisse ont fait l'objet d'au moins un changement d'exploitation, autrement dit d'une rotation entre terres cultivées et prairies, entre 2000 et 2015. Il apparaît également que seuls 38% et 17% des surfaces agricoles ont respectivement été utilisés en permanence comme prairies et terres cultivées¹⁶⁷, ce qui permet de constater l'importance revêtue par le changement d'affectation des sols pour l'agriculture suisse.

Le modèle de flux de matières MODIFFUS (modèle d'estimation des apports de polluants diffus dans les cours d'eau) permet

Illustration 27
Outil régional de monitoring des sols pour équilibrer les cycles des matières : bilans moyens du phosphore entre 2010 et 2014 pour les régions d'étude du Seeland bernois¹⁶⁵.

Projet SYSTÈME D'ALERTE PRÉCOCE du PNR 68.

Bilan phosphore en kg par hectare et par an :

- < -20
- -20 à -5
- -5 à 5
- 5 à 20
- > 20
- bilan non établi



de calculer les flux d'azote et de phosphore en provenance de sources diffuses (écoulements de surface, érosion et lessivage) dans les cours d'eau¹⁶⁸. Cet instrument empirique a permis de modéliser le lessivage diffus de l'azote et du phosphore dans les cours d'eau à l'échelle de la Suisse et d'analyser des bouquets de mesures destinés à réduire les apports diffus d'éléments fertilisants dans les cours d'eau suisses sur la période 2010 à 2025¹⁶⁹. Ce modèle est notamment tributaire de données pédologiques, comme la teneur en nutriments, et d'informations à large échelle

relatives aux propriétés du sol. Les informations du sol faisant défaut au plan national, les propriétés du sol intégrées aux études réalisées jusqu'à présent ont été déduites d'une compilation de plusieurs cartes pédologiques cantonales et de la carte d'aptitude des sols (BEK200).

2.9 Conclusion

Les informations du sol livrent des éléments de décision importants pour de nombreux domaines politiques. L'exploitation des informations pédologiques pré-

Illustration 28

Catégories d'utilisation du sol et rotations entre terres cultivées et prairies pour les surfaces agricoles du Plateau suisse de 2000 à 2015. Base : classifications annuelles des données de télédétection Landsat. Les coupes sur la droite montrent certaines régions en détail¹⁶⁷.

Projet MODÈLE D'EXPLOITATION DU SOL du PNR 68.

Utilisation permanente:

- Prairies/pâturages
- Champs

Utilisation prairies dominants:

- Prairies/pâturages +
- Prairies/pâturages -

Utilisation pâturages dominants:

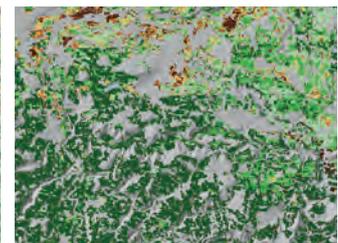
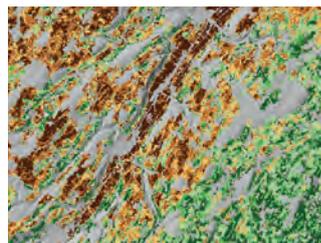
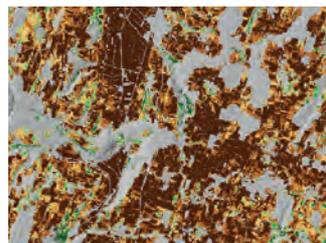
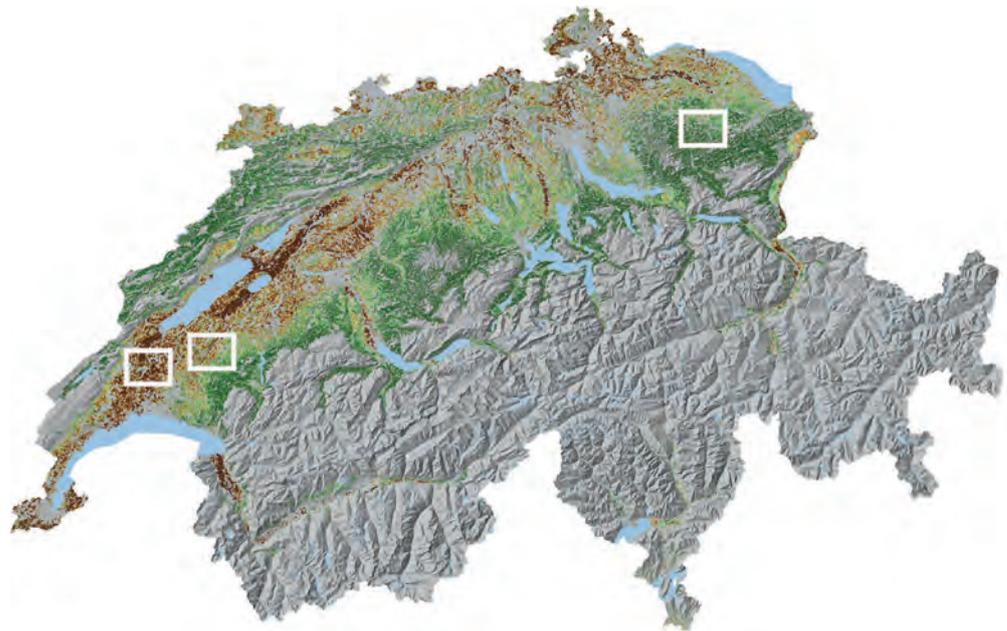
- Champs +
- Champs -

+ / -

augmentation ou diminution combinée du nombre de rotations, de la durée d'utilisation des sols et de l'actualité de l'utilisation.

Résolution spatiale:

30 x 30 mètres.



sente dès lors des intérêts multiples et variés. Il existe, en particulier, une forte demande de produits interprétés, à savoir les cartes des risques pour les sols ou des caractéristiques pédologiques qui ont pu être établies à partir de la cartographie des sols. Le besoin important d'informations pédologiques se heurte toutefois à des lacunes considérables en matière de données ainsi qu'à un manque crucial de coordination à l'échelle nationale. Des informations du sol d'une qualité suffisante ne sont disponibles que pour 10 à 15% de la surface agricole utile.

Le cycle de création de valeur des informations du sol est interrompu à l'échelle nationale et dans de nombreux cantons. Comme en témoignent les très nombreuses initiatives politiques (annexe 1)¹⁹⁰, la nécessité d'agir est grande. En Suisse, il existe un vide quant à l'application de méthodes homogènes et à leur coordination. En conséquence, les offices fédéraux et les cantons se trouvent dans une position délicate. La cartographie des sols ayant été mise en œuvre et développée différemment au gré des projets cantonaux, le référentiel national a disparu et très peu d'innovations techniques ont enrichi la pratique. Le chapitre 3 s'intéresse précisément au perfectionnement de la méthode actuelle de cartographie et propose des pistes de mise en œuvre.

Les informations pédologiques nationales sont valorisées au moyen d'instruments permettant d'évaluer les risques encourus par les sols à partir d'informations du sol, de données d'exploitation et d'autres facteurs locaux. De plus, des instruments ont été développés afin de quantifier les performances du sol (fonctions du sol) et d'en déduire des paramètres interprétés pour l'exécution de la protection des sols. Cela étant, les ressources en personnel consti-

tuent, elles aussi, un levier essentiel de la création de valeur. L'état d'urgence en matière d'exécution de la protection des sols est avéré¹⁴. Toutefois, la mise en œuvre de la protection des sols se heurte, à l'échelle cantonale comme fédérale, à un manque de ressources en personnel, de sorte qu'il n'est en pratique pas possible de garantir une gestion durable de la ressource sol.

3.1 Objectifs et portée

Les informations du sol constituent la pierre angulaire du cycle de création de valeur appelé à garantir une politique nationale des sols à la fois performante et respectueuse des ressources. En se fondant sur l'analyse des lacunes à combler en matière d'informations pédologiques, sur l'état actuel de la cartographie des sols en Suisse et au sein de l'Union européenne, sur les instruments à disposition et les carences en matière d'exécution de la protection des sols, la présente ST4 prône le développement d'une plateforme d'information des sols suisse (PIS-CH), proposant à la fois des informations et des services. La PIS-CH s'affirme comme une plaque tournante pour les informations du sol et les produits dérivés qui répondent aux besoins aussi importants que variés des différentes parties prenantes. La PIS-CH a pour vocation de jouer un rôle moteur dans le cycle de création de valeur des informations du sol.

Le point 2.1 (p. 22) met clairement en évidence la nécessité d'une PIS-CH tant pour la mise en œuvre de la protection des sols que pour les nombreux domaines politiques et la recherche. Sont en priorité requises des informations pédologiques sur le Plateau suisse d'une haute résolution spatiale (au 1:5000 au moins), ainsi que des cartes d'application interprétées permettant de formuler des recommandations sur l'utilisation et la protection des sols à l'échelle de la parcelle et à différentes profondeurs. Il est également nécessaire de disposer d'informations pédologiques supplémentaires sur les sols des Préalpes et des régions d'estivage. Pour répondre à ces différents besoins, la PIS-CH doit fournir des informations exhaustives sur les propriétés et les caractéristiques du sol – avec une résolution spatiale variable selon

les régions retenues. Elle doit également proposer des informations du sol spécifiques et interprétées par thème pour permettre l'évaluation des fonctions pédologiques et des risques pour les sols. Plutôt que de relever uniquement les données pertinentes pour l'exploitation agricole et forestière, comme ce fut souvent le cas jusqu'à présent, il convient de placer l'accent sur la multifonctionnalité des sols.

La création d'une PIS-CH constitue un projet ambitieux et de longue haleine. La ST4 en définit simplement les grandes lignes. Les aspects organisationnels et techniques liés à sa mise en œuvre restent à préciser. En se basant sur les études et travaux préliminaires réalisés jusqu'à présent^{20,50,170} et les expériences tirées du projet CARTES DES SOLS du PNR 68, la ST4 esquisse une vision quant aux principaux axes de développement d'une telle plateforme pour la Suisse.

Analyse des besoins et instruments

Quels sont les besoins des utilisateurs en matière de données pédologiques? Quelles sont les données requises pour générer des informations du sol spécifiques et faciles à interpréter pour un public aussi large que possible? Quels instruments permettent de combiner les données pédologiques et les caractéristiques du sol à une évaluation des risques pour les sols et des fonctions du sol, dans le but de mettre en œuvre la protection des sols et une politique de durabilité?

Méthode de cartographie des sols et infrastructure

Quelle méthode privilégier à l'avenir pour relever les données pédologiques? Quels sont les variantes, les infrastructures et les développements nécessaires sur le plan technique pour améliorer la méthode actuelle de cartographie des sols?

Echelle et régions prioritaires

Quelle résolution spatiale faut-il retenir pour générer des informations du sol pour les différentes régions de Suisse et les différentes utilisations des sols? Pour quelles régions faut-il mettre en priorité à disposition des informations du sol? Quel calendrier privilégier pour la cartographie des sols?

Plateforme d'information

Sous quelle forme les informations pédologiques ainsi générées doivent-elles être mises à la disposition des utilisateurs? Dans quelles structures organisationnelles et institutionnelles faut-il intégrer la PIS-CH?

3.2 Eventail minimal d'informations du sol

Le tableau 3 (p. 34) met en évidence les besoins en informations sur les propriétés et caractéristiques du sol ainsi que les lacunes à combler compte tenu de l'état actuel des informations pédologiques obtenues au moyen de la méthode de cartographie FAL24+^{20,46}. Si la méthode actuellement employée pour les relevés fournit la plupart des informations pédologiques requises, ces dernières doivent néanmoins être complétées: c'est principalement le cas pour les propriétés et caractéristiques physiques du sol, la biologie du sol et la teneur en nutriments. A ce jour, les compléments proposés (par ex. épaisseur, macroporosité, biodiversité) sont encore très limités⁵⁰. La principale critique envers la méthode actuelle porte sur la caractérisation insuffisante de la répartition des propriétés et caractéristiques du sol aux différentes profondeurs: il est recommandé de procéder à des estimations métriques¹⁷⁰. Si les données relatives aux propriétés pédologiques de la couche supérieure et du sous-sol s'avèrent certes suffisantes pour alimenter certains instru-

ments destinés à la protection contre les risques menaçant les sols, il serait nécessaire de disposer de données plus précises sur la répartition des propriétés des sols à différentes profondeurs pour aborder de nombreuses autres problématiques. La question d'un élargissement à de telles mesures est étroitement liée à l'application des méthodes d'analyse utilisées sur le terrain et en laboratoire.

En mettant l'accent sur l'évaluation des fonctions du sol, le projet CARTES DES SOLS du PNR 68 a défini un éventail minimal d'informations du sol. Pour ce faire, l'équipe de recherche s'est appuyée sur plus d'une trentaine de méthodes d'évaluation employées en Allemagne, en Autriche et en Suisse. Pour disposer d'un éventail minimal d'informations du sol, il convient de prendre également en compte les aspects suivants:

1. Des données sur la porosité et la densité des sols sont prises en compte dans presque toutes les méthodes d'évaluation.
2. Pour obtenir des caractéristiques pédologiques dérivées, les fonctions de pédotransfert développées pour les sols allemands (directives allemandes relatives à la cartographie des sols) ont été utilisées. Il convient toutefois de vérifier dans quelle mesure celles-ci sont transposables à la Suisse et, le cas échéant, de les adapter.
3. L'engorgement des sols constitue une donnée importante pour évaluer ses fonctions. En combinant des informations sur la localisation exacte et l'épaisseur des horizons aux propriétés d'engorgement, l'évaluation des fonctions des sols pourrait encore être améliorée.
4. Les informations extensives sur la couche supérieure et le sous-sol ne sont que

partiellement adaptées à une évaluation des fonctions pédologiques. Une telle évaluation exige en effet de connaître la répartition des propriétés du sol sur une profondeur d'au moins un mètre (couches profondes).

En conclusion, la création d'une PIS-CH nécessite de compléter la liste des caractéristiques du sol selon la méthode FAL24+. Il est recommandé que des études de cas soient réalisées afin d'évaluer parmi les propriétés et caractéristiques pédologiques proposées celles qu'il convient désormais de relever et comment le faire à moindre coût.

3.3 Cartographie des sols de demain

Jusqu'au tournant du millénaire, les cartes des sols étaient en premier lieu utilisées pour l'exploitation agricole. Les informations pédologiques relevées à cette fin étaient suffisantes pour évaluer les terrains agricoles au moyen du pointage du sol et planifier des mesures de drainage. Elles permettaient également de mener à bien les tâches relatives à la mise en œuvre de la protection du sol (point 2.2, p. 36). Le canton de Soleure a poursuivi le développement de la méthode de cartographie FAL24¹²⁰. La méthode FAL24+²⁰, aujourd'hui employée dans les projets de cartographie des sols, a d'ores et déjà fait ses preuves dans les conditions-cadres actuelles.

Au cours des deux dernières décennies, de nouvelles techniques scientifiques d'étude des sols ont aussi été développées pour certains domaines de la pédologie. La technique Digital Soil Mapping (DSM), autrement dit l'évaluation des relations mathématiques et statistiques entre les propriétés pédologiques et les données géographiques et

environnementales (par ex. géologie, relief, climat), permet de générer des cartes retraçant les propriétés des sols¹⁷¹⁻¹⁷³. Les méthodes DSM peuvent constituer des « boîtes à outils » pour traiter les problématiques spécifiques inhérentes à la cartographie des sols¹⁷⁴. Les méthodes DSM comprennent une large palette d'instruments, notamment des échantillonnages, le traitement des données géographiques et environnementales, l'exploitation des données issues de l'acquisition directe et de la télédétection, les fonctions de pédotransfert pour obtenir des caractéristiques pédologiques dérivées, des modélisations numériques du relief (caractéristiques provenant du modèle altimétrique), des prévisions spatiales, des procédés de mesure géophysiques pour la saisie des propriétés physiques et chimiques (par ex. géoradar, procédés de mesures électromagnétiques, spectroscopie GAMMA ou NIR) ou le calcul des facteurs de profondeur déterminants pour les propriétés du sol¹⁷². Contrairement à ce qui est d'usage dans d'autres pays, les outils DSM ont rarement été appliqués en Suisse. Il reste donc encore à déterminer comment ces technologies peuvent être exploitées pour développer la méthodologie de cartographie des sols. Le projet CARTES DES SOLS du PNR 68 a employé certaines méthodes DSM et obtenu les résultats présentés ci-après.

Utilisation des données environnementales

Plus de 400 ensembles de données géographiques et environnementales ont été compilés et évalués pour modéliser les schémas spatiaux des propriétés du sol^{175,176}. L'investissement nécessaire à la compilation et à l'analyse d'un tel volume de données est trop lourd pour les projets de cartographie de faible envergure qui constituent aujourd'hui la norme. Le projet CARTES DES SOLS du PNR 68 a démontré que la préparation des données en-

vironnementales pour plusieurs régions ou pour des régions plus vastes n'occasionnait pour ainsi dire aucun surcoût. Dès lors, pourquoi ne pas réaliser les travaux de préparation de manière coordonnée pour des régions de plus grande envergure ?

Utilisation de données pédologiques historiques

Les données pédologiques provenant de projets antérieurs doivent impérativement être harmonisées avant d'être intégrées dans des projets de cartographie numérique des sols. Particulièrement exigeante sur le plan méthodologique, cette démarche appelle une collaboration étroite entre experts en pédologie et scientifiques. Il convient toutefois de mettre en balance les investissements nécessaires à l'harmonisation des anciennes données pédologiques et les coûts engagés pour en relever de nouvelles.

Relevé des données pédologiques dans le cadre de projets cartographiques

Il est essentiel de passer au crible les techniques nouvelles et, le cas échéant, de les mettre en œuvre. Lors des projets de cartographie des sols, les données pédologiques de cinq à dix profils maximum sont relevées par zone de 100 hectares. Pour des raisons de coûts, les nombreux forages réalisés sur le terrain afin d'établir une carte ne sont pas documentés et aucune analyse pédologique n'est réalisée. Disposer de ces informations serait pourtant extrêmement utile pour établir des prévisions sur les propriétés des sols. En dépit du surcoût que cela représente, il conviendrait donc de documenter les forages et de procéder également à des analyses du sol, idéalement en employant de nouvelles méthodes d'analyse.

Envergure des projets cartographiques

Le projet CARTES DES SOLS du PNR 68 formule également une recommandation sur l'approche géographique et le déroulement des étapes de cartographie. Les mesures d'amélioration infrastructurelles s'avèrent particulièrement rentables lorsque de vastes régions de plusieurs milliers d'hectares sont cartographiées. La préparation des données pédologiques et environnementales et la mise en œuvre d'innovations techniques pour définir le plan des relevés modifient le déroulement et l'organisation d'une cartographie des sols. Le rapport coûts/bénéfices d'une telle adaptation devrait au moins être évalué dans le cadre d'un test pratique.

Collaboration interdisciplinaire

Pour exécuter les différentes étapes d'une cartographie des sols, et procéder à l'analyse des informations pédologiques, différentes disciplines spécialisées doivent collaborer.

- L'utilisation de méthodes DSM transparentes et bien documentées permet d'obtenir des informations pédologiques spatiales reproductibles.
- Il existe des approches basées sur modèle pour la modélisation spatiale des propriétés du sol.
- Le volume et la disponibilité des informations géographiques et environnementales ainsi que des informations issues de l'acquisition directe et de la télédétection augmentent très rapidement.
- L'utilisation de méthodes DSM permet d'évaluer la fiabilité des propriétés du sol modélisées, alors qu'il n'existe pour l'heure aucun contrôle systématique de la fiabilité des cartes du sol.
- Les propriétés du sol varient constamment dans l'espace, fait que les grilles modélisées reflètent de manière appropriée pour les diverses caractéristiques et pro-

propriétés pédologiques. En revanche, la méthodologie de cartographie actuelle fondée sur des polygones délimite rigoureusement les unités spatiales pour toutes les propriétés du sol, ce qui ne correspond guère à la réalité.

- Les nouveaux appareils et méthodes permettant de procéder à moindre coût au prélèvement et à l'analyse des propriétés du sol sont d'ores et déjà utilisés à l'étranger.

Lors de la conception de la PIS-CH, il convient de considérer, outre ces innovations technologiques, les conditions-cadres en vigueur dans la pratique :

- Les informations du sol sont en fin de compte toujours liées à la propriété et doivent satisfaire à des exigences extrêmement élevées.

- La Suisse possède une méthode de terrain bien rodée pour relever, analyser et représenter les informations pédologiques sous diverses formes. Certaines adaptations sont toutefois nécessaires pour les régions de montagne.

En Suisse, la majorité des experts en cartographie considèrent actuellement qu'il est « extrêmement fastidieux » voire impossible de réaliser des modèles des propriétés du sol à haute résolution spatiale et à l'échelle de la parcelle, autrement dit à une échelle supérieure au 1:5000^{50,170}. Concrètement, il faudrait procéder à de nombreux relevés de terrain pour créer un modèle à l'échelle de la parcelle au moyen des méthodes DSM, si bien que la valeur ajoutée en découlant serait péjorée par le surcoût induit par rapport à la méthode de cartographie actuelle. Pourtant, un tel procédé n'a pas encore été testé en pratique et des méthodes d'analyse nouvelles et peu coûteuses n'ont pas non plus été mises en œuvre.

La réticence dont les praticiens font preuve vis-à-vis des méthodes DSM s'explique notamment par le fait que les projets de cartographie des sols sont généralement menés à petite échelle. Une région d'étude s'étend habituellement sur environ 300 hectares. Pour des surfaces de cet ordre de grandeur, il est plus pragmatique d'employer des méthodes éprouvées et de s'appuyer entièrement sur des relevés empiriques. Les fastidieuses étapes de préparation des données et de modélisation nécessaires à l'application des méthodes DSM pour des régions aussi peu étendues ainsi que les relevés de terrain et analyses pédologiques supplémentaires entraînent un surcoût que les mandants ne sont pas disposés à financer. A l'heure actuelle, les propriétés du sol ne sont pas relevées pour tous les horizons, même si les profils du sol sont déjà creusés. La taille de la région à cartographier et le recours à de nouvelles méthodes d'analyse jouent dès lors un rôle central dans l'utilisation des nouvelles techniques.

La PIS-CH est un projet intergénérationnel qui offre l'opportunité de promouvoir les innovations tout en évaluant exhaustivement leur utilité. La partie suivante détaille comment développer la procédure de cartographie des sols sur la base des principes actuels (point 2.2, p. 36) et présente les étapes de travail dont la complétion ou l'optimisation par des innovations techniques est à examiner (ill. 29, p. 77).

Préparation des données de base

L'analyse de l'ensemble des données géographiques et écologiques géoréférencées qui contiennent potentiellement des informations sur les facteurs de formation des sols de la région d'étude constitue le point de départ d'un projet de cartographie des sols. Ces informations sont essentielles pour l'établissement de la carte

conceptuelle qui fait l'objet d'une deuxième étape (ill. 29, p. 77). Il est également possible d'intégrer des données issues de l'acquisition directe et de la télédétection, notamment des données satellites multispectrales (Landsat, MODIS, Sentinel, etc.)¹⁷⁷. Celles-ci fournissent directement des informations sur la surface des sols en jachère ainsi que des indications temporelles différenciées sur l'exploitation des surfaces recouvertes par la végétation¹⁷⁸. Des expériences avec des procédés de mesure géophysiques, notamment la spectrométrie GAMMA, ont par ailleurs été réalisées à l'étranger¹⁷⁹: ceux-ci permettent de recenser au sol ou par avion les propriétés physico-chimiques des couches supérieures sur toute la région d'étude. Ces procédés permettent, par exemple, d'identifier des différences dans le matériau géologique parental. De telles informations à haute résolution sont très utiles pour l'élaboration de la carte conceptuelle.

Elaboration de la carte conceptuelle : interaction entre pédologie de terrain et stratégie d'échantillonnage basée sur modèle

Durant cette étape de travail, des spécialistes de la cartographie des sols élaboreront une carte qui illustre l'incidence des principaux facteurs de formation des sols et les conditions pédologiques prévisibles dans la région définie à partir des informations environnementales disponibles et des premières informations du sol dont ils disposent. Cette carte est utilisée pour sélectionner les sites dont les sols doivent être étudiés de manière détaillée. Le recours à un procédé de classification (partitionnement) des données environnementales permet de subdiviser la région d'étude en sous-régions dans lesquelles l'on peut s'attendre à trouver des conditions environnementales «relativement homogènes»¹⁷².

Dans le cadre d'analyses de régression ou de procédés de classification sous contrôle, les données pédologiques – dès lors qu'elles sont disponibles en quantité suffisante et présentent la qualité requise – sont combinées à des données géographiques et environnementales dans le but de générer des cartes pronostiques des propriétés pédologiques et des caractéristiques de classification. Les cartographes disposent ainsi des informations nécessaires pour élaborer la carte conceptuelle et déterminer les sites où seront réalisés les forages et les études de profils. Il est, par ailleurs, possible de définir la précision des pronostics établis au moyen de méthodes statistiques et de la représenter sous forme de cartes. Grâce à ces cartes de la qualité pronostique, les spécialistes de la cartographie peuvent sélectionner les sites d'étude en fonction des objectifs poursuivis.

Les informations du sol doivent être relevées en priorité sur les sites pour lesquels les pronostics sont incertains. En ce sens, il peut être envisagé de recourir à une démarche itérative afin de déterminer progressivement les sous-régions pour lesquelles l'on dispose déjà de nombreuses données fiables sur la répartition spatiale des sols et celles pour lesquelles des relevés de profils supplémentaires sont nécessaires (flèches d'ill. 29, p. 77).

Choix des sites de forage

Les spécialistes de la cartographie s'appuient sur des méthodes statistiques d'échantillonnage pour déterminer les sites sur lesquels des forages doivent être réalisés. Celles-ci garantissent qu'un nombre minimal de sites permettra de couvrir la fourchette de variation des unités de sol «homogènes» définies à partir de la carte conceptuelle. Selon la taille de la région de cartographie et la précision requise, il peut

Illustration 29
Etapes de travail de la méthode de cartographie actuelle et développements techniques proposés¹⁷⁴.

s'avérer judicieux d'appliquer à nouveau une démarche itérative en étudiant le cas échéant d'autres sites, jusqu'à disposer de suffisamment de données environnementales pour garantir la couverture de l'ensemble de la région (ill. 29, p. 77).

Echantillonnage et analyse des propriétés et caractéristiques du sol : innovations techniques

Le prélèvement et la préparation des échantillons de sols ainsi que l'analyse des propriétés pédologiques représentent l'une des étapes les plus coûteuses d'une démarche de cartographie des sols. En plus des estimations faites sur le terrain par les cartographes, les propriétés du sol sont aujourd'hui encore principalement déterminées en laboratoire au moyen de méthodes coûteuses de chimie par voie humide. Au cours de la dernière décennie, les innovations techniques ont aussi révolutionné ce domaine. A l'étranger, des méthodes d'analyse peu coûteuses sont appliquées aussi bien sur le terrain qu'en laboratoire pour déterminer les propriétés du sol les plus diverses. Les méthodes spectroscopiques qui enregistrent la réflexion du spectre lumineux dans le domaine visible et infrarouge ont en particulier été développées en vue d'une application pratique¹⁸⁰. Une fois étalonnées en laboratoire, les méthodes de spectroscopie des sols permettent de réaliser – rapidement et à moindre coût – un nombre considérable d'analyses. L'investissement initial nécessaire à la constitution de bibliothèques (nationales) de spectres est rapidement rentabilisé dès lors que le nombre d'échantillons traités est élevé. A l'échelle de l'Union européenne et du monde, de nombreux pays se sont déjà dotés de bibliothèques de spectres ou sont en passe de le faire^{48,49}. D'autres procédés de mesures spectroscopiques, comme la spectrométrie de fluorescence

des rayons X (sfx), permettent de mesurer certaines propriétés spécifiques du sol¹⁸¹. Grâce à ces méthodes d'analyse, il est possible de recenser de manière presque continue les propriétés pédologiques à différentes profondeurs. Le perfectionnement de la méthode de cartographie ouvre la voie à l'évaluation et à la mise en pratique des méthodes d'analyse citées ainsi que d'autres techniques novatrices.

Parallèlement au perfectionnement des méthodes d'analyse, se pose également la question d'une adaptation de l'infrastructure pour la cartographie de régions plus étendues. Les véhicules équipés d'un dispositif de forage intégré, qui facilitent le prélèvement de carottes de forage et augmentent le nombre de forages par unité de temps, ont déjà été utilisés lors de précédentes démarches de cartographie des sols. Pour améliorer l'efficacité générale, il est néanmoins également nécessaire de se doter d'une infrastructure nationale dédiée à la logistique, à la préparation, aux analyses et à l'archivage centralisé des échantillons de sols – dans la perspective d'analyses ultérieures et de l'application de nouvelles méthodes d'analyses – afin de rationaliser au mieux ces étapes de travail et de les rentabiliser pour un nombre important d'échantillons de sol.

Analyse des profils pédologiques et cartographie

L'optimisation de la qualité des relevés de terrain passe par la possibilité d'analyser de manière ciblée des échantillons composés en laboratoire ou de les étudier in situ au moyen de méthodes novatrices. Une telle approche permettrait d'étalonner et de contrôler les relevés de terrain. Jusqu'à présent, les propriétés pédologiques estimées (valeurs de terrain estimées) étaient généralement enregistrées comme valeurs de classe (par ex.

Etapas de travail d'une cartographie des sols selon la méthode FAL24+	Perfectionnements	
<ul style="list-style-type: none"> - Définition du projet - Mise en place de l'organisation et du financement - Associations, propriétaires fonciers, exploitants agricoles, communes 	<p>1. Préparation du projet</p> <ul style="list-style-type: none"> Définir les objectifs S'assurer la participation des parties prenantes 	<ul style="list-style-type: none"> - Compléter l'ensemble de données standard selon la méthode FAL24+ → Chapitre 3.2, p. 71
<ul style="list-style-type: none"> - Recueillir et évaluer des informations sur les facteurs de formation des sols - Dans quelles sous-régions s'attend-t-on à trouver quels types de sols? Dans quelle mesure les propriétés du sol sont-elles connues? Où subsiste-t-il des lacunes? - Choix des sites de profil en plusieurs étapes, selon les lacunes identifiées en matière de connaissances - Relevé et description des profils de sol, échantillonnage et analyses, documentation iconographique 	<p>2. Elaboration des bases</p> <ul style="list-style-type: none"> Préparer les données géographiques et environnementales à disposition Elaborer la carte conceptuelle Inspecter les lieux et évaluer les sites de profil Documenter les profils de sol 	<ul style="list-style-type: none"> - Traitement de l'ensemble des données géographiques et environnementales, y compris celles provenant de l'acquisition directe et de la télédétection, recours éventuel à un procédé de mesure géographique - Procédé de classification surveillé (partitionnement) des données environnementales dans les sous-régions - Cartes de pronostics des propriétés du sol - Concept d'échantillonnage itératif : méthode statistique d'échantillonnage pour le choix des sites
<ul style="list-style-type: none"> - Mettre à disposition les données cartographiques selon l'avancement des travaux - Choix de sites ciblés et représentatifs sur la base des données cartographiques - Situation, propriétés du sol et caractéristiques, indications concernant la variabilité - Délimitation des surfaces présentant des propriétés comparables (polygones) - Etalonnage continu des relevés de terrain et analyses en laboratoire 	<p>3. Cartographie</p> <ul style="list-style-type: none"> Elaborer les bases de la cartographie (carte de terrain) Evaluer les sites de forage Documenter les emplacements de forage Procéder aux relevés de surface 	<ul style="list-style-type: none"> - Application de nouvelles méthodes d'analyse sur le terrain et en laboratoire - Infrastructure : véhicules de forage, logistique et préparation des échantillons de sol - Concept d'échantillonnage itératif : méthode statistique d'échantillonnage pour le choix des sites - Modèles géographiques, modélisation de la répartition des propriétés du sol aux différentes profondeurs
<ul style="list-style-type: none"> - Produits de base: Enregistrer au format numérique les informations du sol relevées sur le terrain - Assurance qualité des informations du sol - Exactitude de la classification et des codes - Plausibilité des informations du sol et de leur rapport spatial aux unités de cartographie - Vérification du contexte technique et spatial, contrôle de qualité final 	<p>4. Assurance qualité</p> <ul style="list-style-type: none"> Numérisation Contrôle des données Contrôle de plausibilité Contrôle final 	<ul style="list-style-type: none"> - Masques de saisie standardisés en vue de l'enregistrement numérique - Contrôle automatisé des règles - Règlement relatif au contrôle de plausibilité - Contrôle automatisé selon modèle de données de référence au niveau national
<ul style="list-style-type: none"> - Evaluation des cartes d'application relatives aux dangers menaçant le sol (exécution), et utilisation durable de cartes avec fonctions du sol, cartes avec caractéristiques interprétées, selon les intérêts des utilisateurs 	<p>5. Evaluation</p> <ul style="list-style-type: none"> Elaboration de produits adaptés aux besoins 	<ul style="list-style-type: none"> - Produits raster supplémentaires adaptés aux besoins des utilisateurs, qui peuvent être différenciés selon les propriétés et les caractéristiques du sol ; démonstration de la fiabilité des estimations basées sur des modèles

« faiblement pierreux ») et non pas comme valeurs métriques. Ce type de codification comporte un risque de perte d'information et rend difficile l'évaluation de séries chronologiques lorsque des schémas de codage sont modifiés. C'est la raison pour laquelle les valeurs estimées de terrain devraient à l'avenir être codifiées sous forme de valeurs métriques et assorties d'une indication concernant leur degré de précision⁵⁰. Il est par ailleurs important que toutes les données provenant des cartographies de terrain soient documentées et enregistrées au format numérique.

Le processus effectif de cartographie se déroule encore directement sur le terrain – toutefois sur une base élargie. Des cartes illustrant des propriétés du sol en évolution constante peuvent être élaborées a posteriori au moyen de modèles de régression statistiques établis à partir d'un ensemble exhaustif de données de forage et de données environnementales. Du fait des interactions itératives précitées entre la pédologie de terrain et une stratégie d'échantillonnage basée sur modèle, il faut s'attendre à ce que le projet soit à la fois plus long et plus onéreux qu'aujourd'hui pour les régions de petite envergure. En revanche, pour les régions de plusieurs milliers d'hectares, une approche itérative peut s'avérer très efficace et minimiser le coût total par surface cartographiée.

Produits de base

La carte du sol fondée sur des polygones et les informations pédologiques recueillies à partir des profils étudiés constituent les produits de base généralement obtenus dans le cadre d'une cartographie des sols. Ils servent de référence pour différentes analyses axées sur les besoins des utilisateurs. Grâce à la modélisation des propriétés du sol, il est également possible de

générer des cartes raster afin de représenter des propriétés pédologiques continues dans l'espace. De même, des valeurs limites et des produits cartographiques adaptés peuvent être sélectionnés selon la problématique étudiée et le groupe de besoins défini. Par ailleurs, les pronostics relatifs à une propriété du sol peuvent être complétés par une indication sur la fiabilité de l'estimation. Les cartes raster sont reproductibles et peuvent être aisément actualisées si de nouvelles informations du sol sont disponibles ultérieurement.

Études de cas axées sur le perfectionnement de la méthodologie de cartographie

Parmi les modifications et développements de la méthodologie de cartographie proposés, certains sont déjà très avancés sur le plan technique. Il demeure cependant indispensable qu'ils soient mis en pratique avant de pouvoir être intégrés à un projet cartographique. Dans cette perspective, ce n'est pas tant la poursuite des recherches qui prime, mais davantage la mise en œuvre des applications techniques sur le terrain ou en laboratoire ainsi que le contrôle des démarches itératives précédemment décrites. Si des appareils recourant à des méthodes d'analyse spectroscopique sont d'ores et déjà disponibles sur le marché, les instruments destinés à équiper les véhicules de forage ou à numériser automatiquement les profils de forage en laboratoire sont en revanche encore rares. C'est pourquoi il est primordial de réaliser des études de cas régionales pour évaluer en détail la mise en œuvre technique ainsi que le rapport coût/utilité de cet éventuel perfectionnement de la cartographie des sols. Dans cette perspective, il convient de privilégier des régions d'étude suffisamment étendues pour pouvoir évaluer de manière fiable les effets d'échelle et les facteurs de coûts y afférents. Dans le sillage des étu-

des existantes^{50,170}, il est proposé que les options techniques suivantes s’offrant à la cartographie des sols soient testées dans le cadre d’une ou de plusieurs études de cas régionales menées en parallèle :

Analyse des besoins et recours à un ensemble minimal de données pédologiques

Définition de l’ensemble de données requis pour une future cartographie du sol sur la base des principes élaborés dans la ST4 (points 2.1, p. 22, et 3.2, p. 71). Le but est de contrôler et de corriger l’ensemble de données retenu en intégrant divers groupes de besoins.

Développement de la méthode d’analyse et de l’infrastructure

Il y a lieu de tester de nouvelles méthodes d’analyse en vue de leur application sur le terrain et en laboratoire et de déterminer leur potentiel pour la cartographie des sols. Cette démarche s’inscrit dans le même cadre que les options d’amélioration de l’infrastructure (échantillonnage, logistique, appareils et laboratoire). Le recours aux méthodes traditionnelles ne donnant pas toujours entière satisfaction pour certaines caractéristiques du sol, il convient d’évaluer des solutions alternatives à la méthode actuelle de prélèvement, de préparation et d’analyse des échantillons ainsi que d’élaborer des fonctions de pédotransfert pour les sols suisses.

Modification de la procédure : établissement d’une carte conceptuelle et choix des sites d’analyse

L’intégration et le traitement des données géographiques et environnementales ainsi que des données provenant de la télédétection et des travaux de terrain ouvrent de nouvelles perspectives qu’il y a lieu d’analyser pour l’établissement d’une carte conceptuelle. Par ailleurs, les coûts d’une telle procédure doivent être évalués, en déter-

minant pour plusieurs régions le rapport coût/utilité d’une démarche itérative lors de l’élaboration de la carte conceptuelle et de la sélection des sites à retenir pour les profils pédologiques et les forages.

Intégration des éléments jugés pertinents d’une méthodologie améliorée de cartographie des sols

Il convient d’élaborer une étude de faisabilité afin de tester l’application pratique à grande échelle des améliorations apportées à la méthodologie de cartographie. Dans le cadre de l’étude de cas, l’organisation de projet doit prévoir une collaboration interdisciplinaire. En raison des enjeux financiers en présence, la PIS-CH doit être fondée sur une méthode éprouvée et aussi récente que possible. La collecte et l’évaluation des données de base occasionnent à elles seules des coûts fixes importants – de l’ordre de 400 francs par hectare pour une cartographie à grande échelle – qui risquent de faire rapidement exploser le budget des projets cartographiques qui sont généralement relativement modestes⁵⁰. Par suite, il est recommandé de sélectionner des régions nettement plus étendues qu’actuellement. L’allongement probable de la durée de traitement, la réalisation d’analyses du sol complémentaires pendant le processus de cartographie et l’adoption éventuelle d’une démarche itérative pour les travaux de terrain peuvent également accroître les coûts. En contrepartie, la mise en œuvre d’une telle procédure ouvre la voie à certaines économies.

- Economies d’échelle dans la préparation des données de base : les coûts fixes grèvent moins le budget global lorsqu’il s’agit de traiter des régions étendues.
- Economies grâce à l’application de nouvelles méthodes d’analyse, à l’optimisa-

tion de l'infrastructure et aux économies d'échelle lors de l'analyse (à budget égal, il est possible d'analyser un plus grand nombre d'échantillons de sol).

■ Précision variable de la cartographie dans des régions présentant une faible ou une forte variabilité, et économies possibles grâce à l'utilisation de modèles pour le choix des sites d'échantillonnage.

3.4 Régions prioritaires et échelle

Les objectifs ou problématiques susceptibles d'entrer en ligne de compte au plan national et cantonal en ce qui concerne les régions à cartographier en priorité varient au gré des priorités politiques. Quoi qu'il en soit, les régions prioritaires doivent être définies dans le cadre d'une démarche participative impliquant l'ensemble des parties prenantes. L'illustration 30 (p. 80) présente, par exemple, des surfaces situées dans des paysages do-

minés par les zones urbaines qui sont très exposées à un risque d'urbanisation. Le tableau 8 (p. 81) offre une vue d'ensemble des autres problématiques et intérêts pouvant être considérés dans la définition des régions prioritaires.

La question de l'échelle est pour ainsi dire indissociable de la région à cartographier. De nombreux utilisateurs se sont habitués à la précision des cartes détaillées du sol réalisées au 1:5000. Plus grande est l'échelle, plus la résolution des informations du sol et leur référence spatiale le sont aussi. Si l'on s'en tient aux intérêts des utilisateurs, c'est ce degré de précision qui est en principe souhaité à l'échelle du territoire (point 2.1, p. 22). Par ailleurs, les informations géographiques devraient idéalement présenter la même résolution – en effet, l'interprétation des données s'avère compliquée si l'on se réfère à une mosaïque d'échelles différentes. Des cartes

Illustration 30
Régions prioritaires possibles pour la cartographie des sols : sols situés aux abords des paysages dominés par les zones urbaines (critère : « pression urbaine »).

- paysages dominés par des zones urbaines et villes
- zones tampons aux abords des zones urbaines

Source : A. Keller, Agroscope.



Tableau 8
Définitions possibles de régions prioritaires, selon les problématiques propres à différents groupes de besoins.

Question/Thème	Région prioritaire
Surfaces d'assolement	Plateau suisse : la priorité est donnée aux régions soumises à une forte pression urbaine et présentant une déclivité inférieure à 18 %
Améliorations foncières et renouvellement des drainages	Régions drainées et sols saturés d'eau
Acidification des sols forestiers	Plateau suisse, Alpes et Préalpes présentant des matériaux parentaux de nature siliceuse
Apports de fertilisants et de polluants dans les eaux	Bassins versants des lacs intérieurs, zones tampons aux abords des lacs qui sont aérés, zones tampons aux abords des cours d'eau, principalement sur le Plateau suisse
Exploitation forestière et choix des essences respectueux du sol	Plateau suisse, Jura, Préalpes
Changement climatique : risque de sécheresse	Bassins versants ayant tendance à s'assécher, zones d'irrigation, Jura, Valais
Utilisation de matériaux d'excavation pour améliorer des sols altérés	Sols anthropiques
Changement climatique : ressource en eau	Alpes, Préalpes
Gestion des sols marécageux altérés	Anciens marais, aujourd'hui remis en eau
Risques naturels	Alpes, Préalpes

détaillées du sol au 1:5000 existent principalement pour des régions du Plateau suisse. Pour les régions alpines ou le Jura, les cartes détaillées, et même les cartes réalisées à des échelles allant jusqu'au 1:50 000, sont rares. Les terrains raides et impraticables présentent généralement des propriétés extrêmement variables, ce qui rend les investissements nécessaires à l'établissement de cartes détaillées très élevés. En outre, il est presque impossible d'y mener à bien des travaux de terrain sur une superficie étendue comme requis dans la méthode de cartographie détaillée. C'est pourquoi il convient d'envisager d'autres échelles voire d'autres méthodes pour certaines régions et/ou utilisations. Ces conclusions corroborent celles d'autres études^{22, 50, 170}.

3.5 Calendrier

La mise en place d'une PIS-CH doit raisonnablement s'effectuer par étapes. Dans l'optique du perfectionnement méthodologique, les études de cas précitées doivent être menées parallèlement aux projets de cartographie en cours. Afin de ne pas perdre un temps précieux, il est indispensable que la collecte continue d'informations du sol se poursuive dans les années à venir à l'aide de la méthode de cartographie actuelle (FAL24+²⁰) et qu'il soit recouru en temps opportun à des innovations techniques transposables dans la pratique et éprouvées sur le terrain. Préserver le savoir-faire pratique des cartographes au fil des différentes étapes et promouvoir le transfert de connaissances à l'intention des générations futures

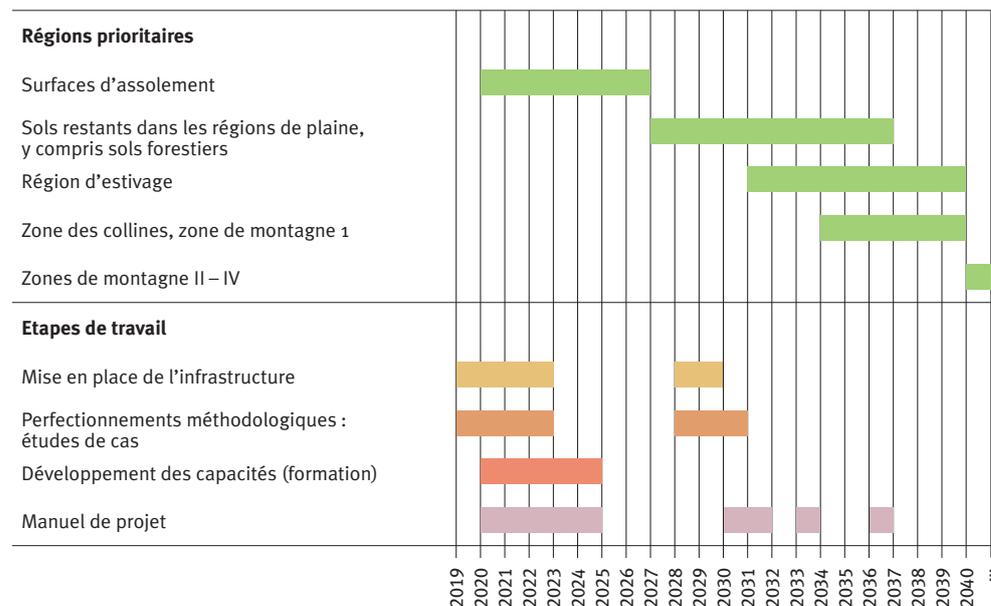
constituent des enjeux tout aussi primordiaux. Pour l'heure, il est encore difficile d'apprécier l'impact des développements techniques proposés sur la durée et les coûts de la cartographie. Si l'on tient compte des recommandations formulées et d'une augmentation des capacités cartographiques à la faveur de conditions-cadres fiables pour le secteur privé, la durée nécessaire à la cartographie des sols dans les régions de plaine est estimée à une vingtaine d'années (ill. 31, p. 82).

Les développements techniques proposés dans le cadre des études de cas (parallèlement aux projets de cartographie en cours) prendront environ cinq ans. Des directives méthodologiques spécifiques aux régions de Suisse dans lesquelles peu d'expériences ont été menées (par ex. régions d'estivage) ainsi que d'autres innovations techniques pourront par ailleurs être intégrées dans un manuel de projet (gestion

des différentes versions des méthodes) selon un calendrier prédéfini.

La mise en place d'une PIS-CH nécessite l'implication de nombreux experts justifiant d'une expérience en cartographie ainsi que de spécialistes des outils DSM et d'autres disciplines. Avec la méthodologie de cartographie actuelle, les capacités à disposition en Suisse permettent de cartographier environ 10000 hectares par an. Réaliser une cartographie des sols à l'échelle du territoire (plus d'un million d'hectares) sur une vingtaine d'années requiert pratiquement de décupler ces capacités. Outre l'infrastructure, des capacités doivent également être progressivement développées afin de former de nouveaux spécialistes. Le secteur privé peut être rapidement en mesure de le faire, dès lors qu'il dispose d'un volume de commandes bien défini et d'une sécurité de planification. Dans l'histoire ré-

Illustration 31
Calendrier possible pour la réalisation d'une PIS-CH.



cente, la gestion des sites pollués et du fonds ORAS qui participe au financement de l'assainissement des sites contaminés peuvent être cités à titre d'exemple. Parallèlement à l'expérimentation pratique des développements méthodologiques, il est indispensable d'élaborer l'infrastructure requise (point 3.3, p. 72) dans le secteur public ou privé. En effet, celle-ci ne doit pas obligatoirement être mise à disposition par les organes responsables de la PIS-CH.

Selon les estimations actuelles, l'une des tâches les plus urgentes consiste à délimiter de manière uniforme les SDA sur la base d'une carte des sols. Dès lors, il apparaît judicieux de cartographier les SDA potentielles lors d'une première étape (ill. 31, p. 82). Pour mettre à disposition des données pédologiques étendues, il est recommandé que les autres sols des régions de plaine, y compris les sols forestiers, soient cartographiés lors d'une deuxième étape. En raison de l'intensité de l'exploitation agricole et forestière desdits sols, il est opportun que la zone des collines et la zone de montagne 1 fassent l'objet d'une troisième étape et les zones de montagne 2 à 4 d'une quatrième. La cinquième étape sera consacrée à la cartographie de la zone d'estivage. Du fait de sa taille importante et du peu de temps concédé pour l'étudier en raison des contraintes liées à l'altitude, il est recommandé de commencer cette étape au plus vite même si celle-ci doit se chevaucher avec les étapes deux à quatre. Du reste, ce chevauchement s'avère également judicieux du point de vue des ressources en personnel dans la mesure où il peut contribuer à fidéliser les spécialistes sur le long terme. En effet, si ceux-ci peuvent uniquement travailler sur le terrain pendant l'été durant plusieurs années, il faut s'attendre à une forte fluctuation du personnel et donc à une perte importante de savoir-faire et d'efficacité.

3.6 Plateforme d'information

En tant que plateforme d'information et de services, la PIS-CH constitue une plaque tournante pour les informations du sol et les produits interprétés. Elle a pour objectif de couvrir les besoins en informations des différentes parties prenantes. Le système d'information spécialisée NABODAT, destiné aux autorités fédérales et cantonales, qui offre un accès limité aux équipes de recherche et au public, constitue un élément central de la gestion et du regroupement des données pédologiques. En complément, il y a lieu de concevoir une plateforme Internet permettant aux utilisateurs d'informations du sol de consulter – sans restriction d'accès – les informations du sol disponibles et les principales méta-informations. Une telle plateforme d'information peut être régulièrement enrichie par certaines informations du sol provenant de NABODAT. La PIS-CH doit être placée sous l'égide d'un organe central qui assure la coordination spécialisée et le transfert de connaissances tout en prodiguant des prestations de formation et de conseil en Suisse.

L'ISRIC (point 2.5, p. 47) et l'initiative de recherche «BonaRes» (le sol comme ressource durable pour la bioéconomie, www.bonares.de, en allemand) lancée par le ministère allemand de la Formation et de la Recherche (BMBWF) peuvent à cet égard être cités en référence. «BonaRes» a pour objectif d'élargir les connaissances scientifiques relatives aux écosystèmes du sol, d'améliorer la productivité des sols et leurs autres fonctions et de développer de nouvelles stratégies pour leur utilisation et leur exploitation durables. Ce portail a pour vocation d'aider les chercheuses et chercheurs, les propriétaires fonciers et les responsables politiques à mieux évaluer les répercussions des déci-

sions déjà adoptées ou devant l'être. Dans la perspective de la création d'une PIS-CH, l'exemple offert par « BonaRes » démontre clairement qu'une telle plateforme est bien plus qu'une simple plaque tournante pour les données pédologiques et que des instruments d'évaluation des risques pour le sol et des fonctions du sol ainsi que des services appropriés y trouvent parfaitement leur place.

3.7 Conclusion

La mise en place d'une PIS-CH telle qu'elle est ici recommandée joue un rôle déterminant dans le bon fonctionnement du cycle de création de valeur des informations du sol. Plaque tournante pour les données pédologiques et les produits interprétés qui en découlent, elle a pour but de répondre aux besoins en informations des différentes parties prenantes. La PIS-CH doit pouvoir fournir des renseignements exhaustifs sur les propriétés et les caractéristiques du sol offrant différents niveaux de résolution spatiale. Elle doit en outre mettre à disposition – tant pour les sols agricoles que forestiers – des informations spécifiques et interprétées par thème permettant d'évaluer les fonctions du sol (y compris les SDA) et les risques qu'il encourt.

Bien que la PIS-CH soit un projet intergénérationnel, elle devrait se traduire par une nette plus-value en l'espace de quelques années. Elle offre l'opportunité de promouvoir des innovations tout en évaluant exhaustivement leur utilité. La Suisse dispose d'une méthode évoluée et largement éprouvée pour relever, analyser et représenter sous diverses formes les informations du sol. Au cours des deux dernières décennies, de nouvelles méthodes scientifiques et techniques ont néanmoins été développées dans certains domaines

de la pédologie. Sur la base des quatre piliers (analyse des besoins et instruments, méthode de cartographie des sols et infrastructure, régions prioritaires et échelles, plateforme d'information) qui ont été définis pour la mise en œuvre d'une PIS-CH, il est recommandé de poursuivre le développement des techniques cartographiques et de les évaluer sur le terrain au moyen d'études de cas régionales. Pour que ces améliorations puissent porter leurs fruits en termes d'économies, la taille des régions à cartographier devra être soigneusement étudiée. Il est estimé que la cartographie nationale des sols de plaine nécessitera une vingtaine d'années. Au-delà de la mise en œuvre des innovations techniques, il importe donc également d'accroître les ressources en personnel grâce à une formation ciblée et de promouvoir la coordination et la collaboration entre les différentes disciplines spécialisées.

Plateforme d'information des sols suisse (PIS-CH) – un investissement rentable

4.1 Analyse approximative des coûts et bénéfices

La valeur ajoutée d'une cartographie nationale des sols n'apparaît pas immédiatement, mais peut être estimée à partir des scénarios établis afin de réduire les risques menaçant le sol et d'optimiser son utilisation durable, ainsi que des réflexions engagées autour des coûts de prévention ou de réhabilitation⁹⁵. Les cartes des sols et des applications offrent, par exemple, la possibilité de mettre en œuvre une fertilisation optimisée et adaptée aux conditions locales et permettent de réduire la contamination des cours d'eau due aux intrants et aux polluants et, par voie de conséquence, les coûts liés au traitement de l'eau potable. Faute d'informations du sol disponibles au plan national, cette utilité indirecte des fonctions du sol demeure difficile à évaluer, et c'est donc l'utilité directe du sol qui est généralement

prise en considération (ill. 32). Une procédure d'évaluation économique vise dans la mesure du possible à intégrer toutes les valeurs des fonctions du sol ou leur contribution aux Services écosystémiques (SES). Ceci implique de prendre en compte non seulement les biens résultant de l'exploitation du sol, comme le rendement des cultures agricoles, mais aussi ceux qui sont librement utilisables et pour lesquels il n'existe aucun marché^{95,182}. Les procédures d'évaluation économique des SES ne font pas l'unanimité et les avantages et inconvénients qu'elles présentent sont soumis à controverse¹⁸²⁻¹⁸⁴. Les évaluations économiques s'articulant autour des SES et quantifiant les coûts inhérents à l'évitement des risques permettent expressément à la société d'appréhender la valeur du sol en termes monétaires¹⁸⁵⁻¹⁸⁷.

Illustration 32
Utilité directe du sol (sélection, données par hectare et par an).

Photos : Observatoire national des sols de la Suisse.



Champs cultivés

Céréales :	65 dt/ha
ou colza :	35 dt/ha
ou betteraves sucrières :	900 dt/ha
ou pommes de terre :	450 dt/ha

Prairies

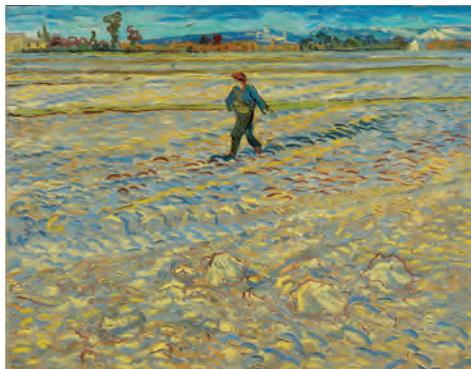
Lait :	6500 l/a
ou fromage :	310 kg/a
ou viande :	560 kg/a

Forêts

Recettes du bois d'environ CHF 70

Illustration 33
Culture du sol : « Le semeur »,
Vincent van Gogh, 1888,
huile sur toile.

Source : Fondation Hahnloser/Jaeggli,
Musée des beaux-arts de Berne.



De telles considérations peuvent compléter les arguments éthiques¹⁸⁸ et culturels^{103, 189} quant à la signification du sol en tant que base d'existence pour les hommes, la faune et la flore. Le PNR 22 mettait déjà en exergue le fait que les « hommes de la société moderne ont besoin que leur gestion du sol soit orientée »¹⁸⁸, et qu'il était nécessaire qu'une nouvelle relation au sol, au sens d'un développement durable, soit établie¹⁰³. « Le semeur » de Vincent van Gogh constitue aussi une représentation symbolique des liens étroits existants entre les hommes, les denrées alimentaires et le sol, et illustre leur dépendance vis-à-vis de ces derniers. La société de services actuelle et les rayons toujours plus remplis des supermarchés semblent avoir occulté ce rapport conscient à la terre. Le bilan coûts/bénéfices d'une cartographie nationale des sols proposé ci-après vise en premier lieu à mettre en lumière les multiples utilités des sols pour la société et leur importance en tant que base d'existence pour l'humanité. Les valeurs monétaires des scénarios d'évaluation ne revêtent qu'une importance secondaire.

4.2 Exemple de valeur ajoutée générée par les informations du sol

La corrélation existant entre les bénéfices d'une cartographie des sols et la valeur ajoutée qui s'en dégage a été analysée à l'aune de dix domaines thématiques. L'estimation de ces bénéfices s'appuie sur des hypothèses très conservatrices quant aux variables clés des domaines concernés. Cette approche permet d'apprécier la valeur ajoutée minimale qu'une cartographie nationale des sols générerait approximativement pour la société. Les différents scénarios retenus pour effectuer un calcul simplifié sont également décrits ci-après¹⁹⁰. Au-delà des domaines étudiés, les bénéfices d'une cartographie des sols rejaillissent aussi sur d'autres thèmes en lien avec l'environnement (tab. 2, p. 24–25). C'est en mettant en évidence les bénéfices supplémentaires en résultant dans d'autres domaines environnementaux que l'on révélera l'ampleur de la valeur ajoutée financière apportée par une cartographie des sols.

Economies sur le traitement de l'eau potable grâce à la fonction de filtration du sol

En Suisse, grâce à la qualité du sol et à sa fonction de filtration, une grande partie des eaux de source et des nappes souterraines peuvent venir alimenter le réseau d'eau potable sans avoir à subir de traitement préalable. Cependant, des quantités excessives de fertilisants et/ou de polluants peuvent altérer la fonction de filtre et de tampon du sol au point qu'il soit impossible de renoncer à un traitement préalable. C'est principalement dans les régions où l'on pratique une agriculture intensive que les eaux de profondeur dépassent les valeurs limites en nitrates et pesticides^{191, 192}. Une cartographie des sols à l'échelle du territoire contribuerait à préserver la capacité de filtration natu-

relle du sol et permettrait dès lors son utilisation sur des sites spécifiques.

A partir des cartes du sol, il est possible de dériver des cartes d'application tenant compte de la fonction de filtre et de tampon de chaque type de sol et pouvant servir de bases de planification pour une exploitation agricole respectueuse des conditions locales. Ces informations permettraient de réduire les apports de fertilisants et de polluants dans les eaux de source et/ou les eaux souterraines et, ce faisant, de diminuer d'au moins 10 à 15% les coûts de traitement de l'eau potable en Suisse. Si l'on part du principe que les coûts de traitement de l'eau potable seraient approximativement divisés par deux sur le Plateau suisse, les économies réalisées atteindraient de 7 à 10 millions de francs par an selon les hypothèses formulées¹⁹⁰.

Réservoir d'eau pour une irrigation performante

Les précipitations n'étant pas en mesure de couvrir les besoins en eau des cultures agricoles, près de 55 000 hectares de terrain sont irrigués en Suisse, principalement dans certaines régions du Plateau suisse, de Suisse romande et dans quelques val-lées alpines. La quantité d'eau nécessaire à l'irrigation s'élève à près de 144 millions de mètres cubes par an¹⁹³. Sous l'effet du changement climatique, il est à présumer que ces quantités continueront à l'avenir de progresser. Pour mieux cibler ces besoins et améliorer l'efficacité de l'irrigation, il est indispensable de disposer de connaissances étendues et détaillées sur le sol et ses propriétés à différentes profondeurs.

En supposant que les cartes de base des propriétés du sol permettent de privilégier des cultures et un travail du sol mieux

adaptés aux conditions locales et d'optimiser ainsi l'irrigation sur 20 à 30% des surfaces actuellement irriguées, l'on économiserait une quantité d'eau de l'ordre de 3 ou 4% de la consommation annuelle en eau potable de la Suisse. Selon les hypothèses formulées¹⁹⁰, la cartographie des sols permettrait ainsi d'économiser environ 2 à 5 millions de francs par an.

Base de planification et de renouvellement des drainages

Des années 1880 jusqu'au tournant du millénaire, la Suisse a mené à bien des projets de drainage et d'améliorations foncières de grande envergure. Au total, près de 192 000 hectares de surfaces agricoles ont ainsi été drainés. Nombre de ces systèmes de drainage devront être renouvelés dans les dix à quinze prochaines années. Les coûts de ce renouvellement sont estimés à quelque 25 000 francs par hectare¹⁹⁴. Des connaissances étendues et détaillées

Illustration 34

Signe de compaction du sol après de fortes précipitations sur des terres arables en Suisse.

Source : T. Keller, Agroscope.



sur le sol et ses propriétés permettront de renouveler les systèmes de drainage et d'en planifier de nouveaux de manière ciblée, ou éventuellement de renoncer à de tels équipements si les conditions pédologiques ne s'y prêtent pas. La cartographie des sols livre des informations essentielles pour réaliser cette démarche.

Sur la base d'une analyse des surfaces pour le canton de Zurich, il est estimé que les informations issues de la cartographie des sols permettront d'optimiser les projets de renouvellement et d'installation de systèmes de drainage. Concrètement, il sera possible de renoncer au renouvellement des systèmes de drainage, ou de planifier plus efficacement les nouvelles installations grâce à des cartes du sol, sur environ 10 à 30% des surfaces actuellement drainées. Selon les hypothèses formulées¹⁹⁰, les économies réalisées dans le cadre de la planification de projets, et donc les avantages financiers apportés par la cartographie des sols, sont estimées à près de 11 à 34 millions de francs par an.

Aération des lacs rendue superflue par la fonction de régulation des sols

Les lacs entretiennent des relations étroites avec leur environnement. Sous l'effet de l'exploitation agricole, des quantités importantes d'éléments fertilisants peuvent polluer les eaux, entraîner une sur-fertilisation voire, dans le pire des cas, une sous-oxygénation et porter ainsi atteinte à l'autorégulation naturelle et à la diversité des espèces propres aux milieux lacustres. L'équilibre écologique d'un lac ne peut être restauré qu'au prix de mesures aussi fastidieuses qu'onéreuses. Dans le cas du lac de Baldegg et du lac de Hallwill sur le Plateau suisse, il a fallu combiner des mesures internes (par ex. aération artificielle) et des mesures externes au niveau du bassin versant (adapta-

tion de la fertilisation et du travail du sol). Pour une mise en œuvre ciblée, il est indispensable de disposer de connaissances détaillées sur les sols des bassins versants situés aux abords des lacs.

Si l'on utilisait des cartes de base des propriétés du sol afin d'adapter pendant dix ans l'exploitation agricole aux conditions locales dans les bassins versants des lacs de Baldegg et de Hallwill et si l'on procédait à une fertilisation tenant compte de la fonction de régulation des sols, les coûts d'aération des lacs pourraient être réduits de 10 à 30%. Selon les hypothèses formulées¹⁹⁰, il est estimé que la cartographie des sols se traduirait par des économies atteignant entre 2 et 5 millions de francs sur dix ans.

Diminution des dommages dus à l'érosion des sols

Selon les modèles de calcul, les terres arables perdent en moyenne près de 2 tonnes de terre fine par hectare et par an. Des connaissances détaillées sur les sols pourraient contribuer à minimiser le risque d'érosion en adaptant à la fois les cultures, la fertilisation et le travail du sol aux conditions locales (point 2.8, p. 64).

Si la mise à disposition de cartes d'application permet d'adapter le mode d'exploitation et le travail du sol aux conditions locales et de minimiser ou de prévenir l'érosion du sol sur près de 20 à 30% des terres arables menacées par l'érosion en Suisse, les gains financiers résultant d'une cartographie des sols pourraient, selon les hypothèses formulées¹⁹⁰, se chiffrer à près de 10 à 15 millions de francs par an.

Diminution des dommages dus à la compaction des sols

La compaction altère la qualité du sol et implique des conséquences à long ter-

me particulièrement dramatiques pour le sous-sol (point 2.8, p. 64). Les sols compactés peuvent notamment augmenter le risque d'érosion lié au ruissellement accru des eaux de surfaces, réduire la production végétale et restreindre la recharge des nappes phréatiques (ill. 34, p. 87), ce qui amoindrit le rendement et limite le choix de cultures.

En Suisse centrale, près d'un tiers des sols agricoles sont compactés¹⁹⁵. La situation est probablement similaire dans d'autres régions suisses. Aux baisses de rendement s'ajoutent encore les coûts inhérents à la hausse de la consommation d'énergie nécessaire au traitement et à l'exploitation des sols compactés ainsi que d'autres coûts induits^{190,196}. Si l'on estime à seulement 5% les pertes de rendement sur un tiers des surfaces dédiées aux céréales et aux cultures sarclées, les dommages annuels se chiffrent entre 6,6 millions (céréales) et 11,3 millions de francs (céréales et cultures sarclées). Cependant, si le recours à des informations du sol plus fiables et à

des données sur l'humidité du sol (instrument TERRANIMO; point 3.7, p. 84) permettrait de diviser, ne serait-ce que par deux les surfaces compactées, le montant des dommages pourrait diminuer d'environ 4 à 6 millions de francs par an.

Capacité de rétention des nutriments : utilisation optimisée des engrais minéraux
Chaque année, l'agriculture suisse épand près de 50 000 tonnes d'azote (N) et 10 000 tonnes de phosphore (P) sous forme d'engrais minéraux⁷⁵. Le surplus d'azote peut entraîner des émissions d'ammoniac dans l'air et une pollution des nappes phréatiques par les nitrates. Le surplus de phosphore peut contribuer à la prolifération des algues et des plantes dans les lacs.

Les cartes d'application mettent en évidence la capacité de rétention des nutriments des sols et fournissent des indications précieuses pour la sélection de cultures adaptées aux conditions locales. La mise à disposition de telles bases de planification et d'informations sur la teneur en nutriments des sols permet d'optimiser la fertilisation selon les conditions du milieu et de réduire encore le recours aux engrais minéraux. En supposant qu'une telle démarche diminue de 10 à 20% les dépenses liées à l'utilisation d'engrais minéraux, la cartographie des sols permettrait d'économiser, selon les hypothèses formulées¹⁹⁰, environ 15 à 30 millions de francs par an.

Protection des sols organiques et prévention des gaz à effet de serre
Au total, les sols stockent une plus grande quantité de dioxyde de carbone (C) sous forme de substance organique (humus) que les forêts ou l'atmosphère. A l'état naturel, les réserves de carbone de nombreux sols sont équilibrées. Les marais accumulent même sur des millénaires

Economics of Land Degradation

La dégradation des sols est un problème mondial dont les conséquences se font particulièrement ressentir dans les pays pauvres. Bien que le sol constitue la base de l'existence sur la Terre, les mesures déployées jusqu'à présent en faveur d'une utilisation durable des sols s'avèrent insuffisantes. Telles sont du moins les conclusions d'une équipe de scientifiques intervenant à travers le monde qui a étudié douze pays et régions – parmi lesquels l'Inde, l'Argentine et de vastes régions d'Afrique et d'Asie centrale⁹¹. Leurs résultats fondés sur des cartes satellites livrent un constat sans appel : à l'échelle mondiale, 33% des prairies, 25% des terres arables et 23% des surfaces boisées se sont dégradées au cours des trois dernières décennies. A l'échelle planétaire, les sols d'environ 30% des terres émergées – espace vital de quelque 3,2 milliards d'êtres humains – subissent des dégradations significatives. Les coûts correspondants s'élèvent à près de 300 milliards d'euros par an. L'étude démontre également que la prévention de la dégradation des sols s'avère nettement moins coûteuse que leur réhabilitation. Chaque dollar investi aujourd'hui dans la protection du sol permettrait à l'avenir d'en économiser cinq sur la réparation des dommages⁹¹.

Illustration 35

Sol marécageux labouré en profondeur et drainé. Suite au drainage, les sols organiques deviennent des sources de carbone et contribuent notablement au changement climatique.

Photo: G. Brändli, U. Zihlmann, Agroscope; A. Chervet, LANAT Berne.



du carbone sous forme de tourbe (ill. 35, p. 90). Si les marais libèrent ces réserves de carbone, par exemple à l'issue d'un assèchement (libération de CO_2 par la respiration microbienne), les sols se transforment en source de CO_2 et contribuent considérablement au changement climatique. En outre, les sols exploités à des fins agricoles dégagent d'importantes quantités d'oxyde d'azote, un gaz ayant un effet de serre très puissant. A ce jour, les réserves de carbone des sols sont encore largement méconnues¹⁹⁷. En disposant, pour une surface étendue, d'informations à haute résolution spatiale sur les réserves de carbone, il serait possible d'identifier les sites présentant de vastes réserves de carbone, sur lesquels une modification de la gestion du sol réduirait de manière substantielle les émissions de gaz à effet de serre.

En Suisse, les marais asséchés libèrent actuellement près de 700 000 tonnes

d'équivalents CO_2 de gaz à effet de serre par an sur une surface d'environ 20 000 hectares¹⁹⁸. Si l'on procédait, sur la base des informations pédologiques fournies par une carte du sol, à la remise en eau d'environ un dixième à un tiers des sols concernés et que l'on y privilégiait une exploitation très extensive, l'humus serait préservé et les émissions de CO_2 dans l'atmosphère diminueraient de 230 000 tonnes. Avec un prix moyen de 72 euros la tonne, le CO_2 compensé représenterait une contre-valeur comprise entre 6 et 18 millions de francs par an¹⁹⁹.

Préserver les sols fertiles pour la production de denrées alimentaires

Sur le Plateau suisse, près de 90% des surfaces nouvellement urbanisées sont d'anciennes surfaces agricoles. Dans les régions de montagne, on observe parallèlement une expansion des surfaces boisées (embroussaillage et régénération de la forêt) due à un recul de l'exploitation⁷. Une cartographie nationale des sols constitue à cet égard une base essentielle pour protéger et maintenir la production de denrées alimentaires et mettre en place une planification durable en matière de sécurité alimentaire (point 2.7, p. 61).

En s'appuyant sur les classes d'aptitude culturale définies dans la cartographie des sols, les responsables de l'aménagement du territoire peuvent en effet préserver les surfaces agricoles productives en choisissant de convertir plutôt des sols de moindre valeur en nouvelles zones à bâtir. Si l'on part du principe que ce sont principalement les meilleures surfaces agricoles qui ont été imperméabilisées jusqu'à présent, un développement intérieur ciblé permettrait de réduire d'environ 10 millions de francs par an le montant des dommages encourus en matière de production de denrées alimentaires¹⁹⁰. Cela corres-

pond à une surface permettant approximativement de nourrir entre 6000 et 19000 personnes (populations respectives des villes de Rothenburg LU et d'Aarau).

Diminuer le risque de crue grâce à la capacité de rétention d'eau des sols
Selon les propriétés du sol et l'utilisation qui en est faite, les pores du sol peuvent absorber plusieurs centaines de litres d'eau par mètre carré. Grâce à leur importante capacité de rétention d'eau, les sols intacts jouent dès lors un rôle décisif dans la prévention des crues⁷⁰. L'imperméabilisation ou la compaction peut affecter la capacité naturelle d'infiltration des sols, ce qui entraîne une augmentation du débit des cours d'eau. L'amortissement des débits de pointe nécessite la mise en œuvre de mesures de protection coûteuses. Depuis 1970, plus d'une vingtaine de bassins de rétention des crues ont ainsi été aménagés dans le seul canton de Zurich. Pour améliorer la prévision des crues, il est primordial de disposer de connaissances détaillées sur les sols et leurs propriétés pour chaque bassin versant.

Illustration 36
Le système de réparation et de traitement des eaux de chaussée (SETEC) à Zurich-Affoltern.

Source : A. Keller, Agroscope.



Le scénario de calcul met en regard la perte de capacité de rétention d'eau des nouvelles surfaces imperméabilisées chaque année dans le canton de Zurich et les coûts de remplacement d'un bassin de rétention des crues. Si la mise à disposition de cartes d'application permettait de renoncer à urbaniser environ un tiers des surfaces actuellement imperméabilisées, une cartographie des sols se traduirait par un gain d'environ 4 millions de francs par an selon les hypothèses formulées¹⁹⁰.

4.3 Deux exemples de coûts de réparation

Au-delà des dix exemples précités permettant d'estimer la valeur ajoutée économique réalisée grâce à la mise à disposition d'informations du sol à l'échelle nationale, la valeur du sol peut aussi être appréhendée de manière indirecte, notamment en considérant les coûts occasionnés par les mesures d'assainissement ou d'amélioration foncière des sols ou encore par les installations techniques qui imitent leurs fonctions de filtration et de dégradation. Les exemples suivants ne s'inscrivent pas directement dans le contexte d'une cartographie nationale des sols. Ils mettent néanmoins en balance les coûts des dommages, les dépenses exigées par la réparation des sols et les investissements nécessaires à la mise en place d'un instrument de prévention comme la PIS-CH. Si les instruments de prévention mis en œuvre afin de protéger le sol occasionnent des coûts, ceux-ci s'avèrent nettement inférieurs à ceux qu'il faudrait engager pour tenter de «réparer» ultérieurement des dommages pour la plupart irréversibles.

Parmi les installations techniques imitant la fonction de filtration des sols, citons notamment les bassins de rétention filtrants et les systèmes de réparation et de traitement des eaux de chaussée (SETEC).

Selon la loi sur la protection des eaux, les eaux polluées doivent être traitées avant de rejoindre le régime hydrique. La filtration des eaux de chaussée par les sols des bas-côtés constitue la mesure la moins dispendieuse. En revanche, les SETEC s'avèrent très onéreux (ill. 36, p. 91) et la Suisse a déjà investi plus de 500 millions de francs dans leur construction. Les coûts du traitement des eaux de chaussée atteignent entre 0,2 et 3 millions de francs par hectare de chaussée drainée¹⁹⁹, ce qui met clairement en évidence la valeur de la fonction de régulation d'un sol sain (filtration et dégradation des polluants).

Les dépenses nécessaires à l'assainissement des sols pollués (sites contaminés) peuvent être considérées comme des coûts de restauration des sols. En Suisse, près de 38 000 sites pollués par des déchets ont été recensés²⁰⁰. 4 000 d'entre eux sont conta-

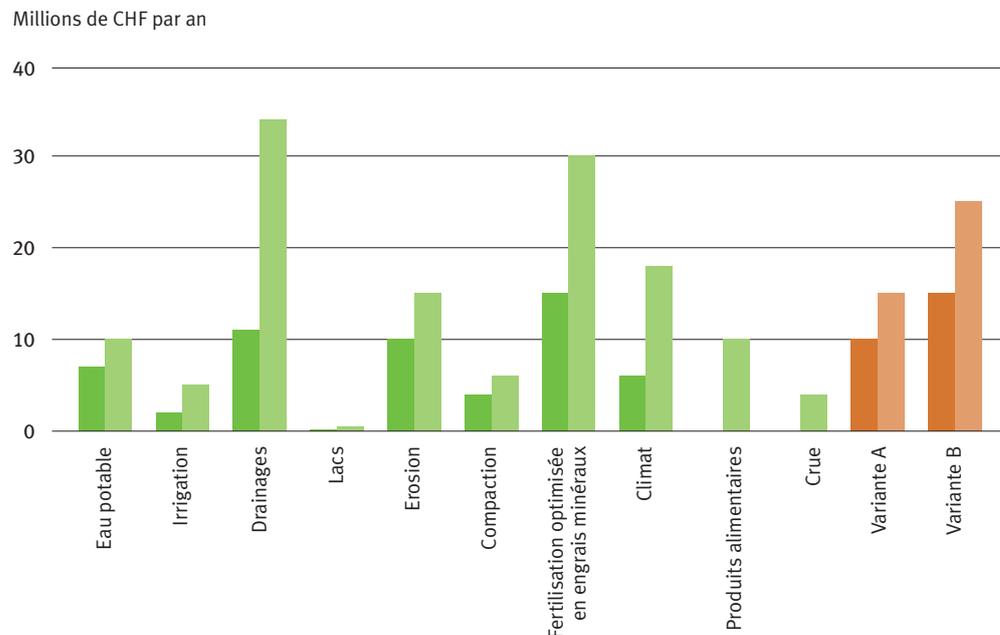
minés par des résidus toxiques et devront être assainis d'ici 2040. Parmi les sites pollués, nombreux sont ceux situés à proximité immédiate de nappes phréatiques sensibles. Dans la plupart des cas, ces sites sont assainis en excavant les matériaux pollués, principalement d'origine minérale, qui doivent souvent être éliminés dans des décharges spécifiques. Chaque année, près d'un million de tonnes sont ainsi évacuées avant d'être en grande partie mises en décharge. En Suisse, cet assainissement devrait représenter près de 5 milliards de francs d'ici 2040²⁰⁰.

4.4 Conclusion

La valeur ajoutée d'une cartographie nationale des sols n'est pas immédiatement perceptible dans de nombreux domaines politiques ou environnementaux. Bien que les hypothèses retenues soient très conservatrices, une analyse simplifiée des

Illustration 37
Aperçu de la valeur ajoutée d'une cartographie des sols pour dix domaines sélectionnés.

Valeur ajoutée – évaluation par domaine thématique:
■ minimale
■ optimiste
Coûts annuels d'une PIS-CH avec une cartographie nationale des sols réalisée sur vingt ans:
■ optimiste
■ conservatrice



bénéfices économiques résultant de la mise à disposition d'informations du sol à l'échelle nationale pour les dix domaines étudiés fait ressortir une valeur ajoutée globale allant de 55 à 132 millions de francs par an. Ces chiffres correspondent aux économies qui seraient réalisées sur les coûts des dommages et le remplacement des installations techniques ou qui résulteraient d'une optimisation de l'utilisation des sols (ill. 37, p. 92). Une PIS-CH serait également très utile dans d'autres domaines. Cela étant, les coûts effectifs d'une cartographie nationale des sols demeurent difficiles à évaluer, notamment dans la mesure où ils dépendent des innovations techniques, de la taille des régions à cartographier et de divers autres facteurs (chapitre 3, p. 70).

Selon l'hypothèse retenue (estimation optimiste des coûts nécessaires à un relevé national: de 10 à 15 millions de francs par an ou estimation conservatrice: de 15 à 25 millions de francs par an pendant au moins vingt ans), la valeur ajoutée d'une PIS-CH oscille entre 1:2 (hypothèse conservatrice), 1:6 (hypothèse modérée) à 1:13 (hypothèse optimiste). Chaque franc investi dans une cartographie des sols en tant qu'instrument de prévention se révèle rentable à maints égards pour la société et les générations futures. L'instrument de prévention PIS-CH générerait une valeur ajoutée importante et contribuerait, dans la perspective de l'utilisation durable de la ressource sol, à prévenir les futures dépenses liées aux dommages et à leur réparation.

La plateforme d'information des sols suisse (PIS-CH) repose sur des informations du sol intégrées à un cycle fermé de création de valeur. Dans la perspective de l'élaboration de la PIS-CH, dix champs d'action ont été identifiés et synthétisés en quatre messages clés formulés en préambule à la ST4. Ces dix champs d'action mettent en évidence le cycle de création de valeur des informations du sol (ill. 3, p. 19).

1 Redéfinir les besoins en informations du sol

Alors que les cartes établies jusqu'à présent avaient pour principal objectif d'évaluer l'aptitude culturale des sols, il est aujourd'hui indispensable de collecter des informations supplémentaires sur leurs propriétés afin de préserver les fonctions qu'ils assument et de garantir leur protection. Il convient de définir un ensemble de données standardisé afin que la PIS-CH puisse satisfaire tous les besoins en matière d'utilisation des informations du sol. Les méthodes de relevé actuelles doivent être adaptées aussi largement que possible aux besoins de tous les utilisateurs et développées en conséquence.

2 Définir un standard pour la classification des sols

La mise en place d'une PIS-CH implique de définir, sur la base des connaissances actuelles, des standards nationaux pour la classification des sols qui permettent également des comparaisons internationales. La Société suisse de pédologie (SSP) a d'ores et déjà élaboré un concept en ce sens (chapitre. 3, p. 70). A l'image des pratiques usuelles dans d'autres pays européens, la classification devrait être actualisée régulièrement de manière à intégrer de nouveaux développements, connaissances et besoins des utilisateurs.

3 Perfectionner la méthode de cartographie des sols

Il est tout d'abord nécessaire de remanier et d'actualiser les directives relatives à la cartographie des sols agricoles et forestiers, qui datent désormais de plus de deux décennies, afin qu'elles reflètent l'état de l'art (FAL24+). Parallèlement, il y a lieu de déterminer, à partir d'études de cas concrètes, dans quelle mesure les méthodes DSM peuvent compléter de manière ciblée les directives relatives à la cartographie des sols. La ST4 a identifié des domaines thématiques dans lesquels des études de cas régionales doivent prioritairement être menées sur le terrain afin de déterminer si certains instruments et procédés DSM sont transposables dans la pratique. Ces études de cas et le traitement de régions d'au moins un millier d'hectares constituent des conditions indispensables à l'exploitation des synergies (économies d'échelle).

4 Mettre en place une infrastructure dédiée à la cartographie des sols

Les besoins en informations du sol étendues se heurtent aux coûts relativement élevés de l'analyse des propriétés du sol en laboratoire. De nouvelles méthodes spectroscopiques permettent néanmoins d'analyser rapidement un grand nombre d'échantillons, que ce soit sur le terrain ou en laboratoire. Dans l'optique de la cartographie des sols, il est indispensable de développer ces méthodes qui permettent d'effectuer des mesures à peu de frais. Les investissements nécessaires diminuent encore si l'on recourt à des équipements techniques modernes. A titre d'exemple, citons les véhicules pourvus d'un dispositif de forage intégré qui assurent le prélèvement d'échantillons par carottage et facilitent ainsi les travaux de terrain. En vue de la réalisation d'une cartographie nationale des sols, il est par ailleurs indispensable d'investir dans une infrastructure adaptée (logistique, prépa-

ration et analyse des échantillons de sol) et de prévoir un archivage centralisé des échantillons afin de modérer les coûts unitaires en privilégiant un traitement à grande échelle.

5 Définir le calendrier et les régions prioritaires

Le projet d'une cartographie nationale des sols s'inscrivant dans le cadre d'une PIS-CH représente l'œuvre d'une génération et s'échelonne approximativement sur deux ou trois décennies. Les régions à cartographier en priorité devraient être définies en fonction des besoins les plus urgents (par exemple, l'identification des SDA aux abords des zones urbaines). La ST4 présente les principaux critères et variantes méthodologiques pour mener à bien ce projet.

6 Garantir la gestion des données et le système d'information sur les sols (SIS)

Le Système national d'information pédologique NABODAT développé ces dernières années se révèle un instrument performant et adapté à la pratique. Cependant, la Confédération et les cantons sont les seuls à avoir accès aux informations proposées. Il y a lieu de garantir l'exploitation à long terme et la poursuite du développement du SIS. Par ailleurs, la libre disponibilité des informations du sol pour la Confédération, les cantons, les communes et la science ainsi que la suppression des barrières d'accessibilité pour les responsables de l'exécution et le grand public constituent les conditions préalables à une large utilisation desdites informations. En vue de la mise en place d'une PIS-CH, il est recommandé de privilégier une plateforme Internet qui permette aux utilisateurs de consulter les informations du sol et les méta-informations essentielles s'y rapportant ainsi que d'accéder à des prestations de service et de conseil. La PIS-CH a pour vocation de garantir que des données pédologiques standardisées puissent à l'avenir être échangées rapidement et efficacement entre les différents acteurs concernés.

7 Etablir une cartographie nationale des sols et générer une valeur ajoutée

Les coûts annuels d'une cartographie nationale des sols devraient osciller entre 10 à 15 millions de francs (estimation optimiste) et 15 à 25 millions de francs (estimation conservatrice) pour les deux ou trois prochaines décennies. Cependant, cette estimation est entachée d'incertitudes dans la mesure où il est encore difficile de déterminer dans quelle mesure les propositions formulées permettront de cartographier les sols de manière plus efficace au plan national. L'étude de régions plus étendues qu'auparavant et le recours à des techniques avancées pourront réduire les coûts spécifiques par hectare (économies d'échelle).

Une cartographie nationale des sols constitue un investissement rentable pour l'avenir. Pour en apprécier la valeur, il suffit de recenser sommairement les bénéfices économiques indirects d'une PIS-CH : même en retenant des hypothèses conservatrices, chaque franc investi dans une cartographie nationale des sols génère une valeur ajoutée de 2 à 13 francs. Contrairement à d'autres domaines de l'observation environnementale, la cartographie des sols et les données pédologiques génèrent des bénéfices à long terme du fait de leur moindre variabilité. Il est par conséquent recommandé d'approfondir les considérations économiques relatives à la valeur ajoutée des informations du sol.

8 Utiliser les instruments et les indicateurs du sol

Des instruments adaptés à la pratique ont été développés dans le but de prévenir ou de réduire les risques résultant de la compaction, de l'érosion, de la perte d'humus, de l'acidification des sols ou des apports diffus de fertilisants et de polluants dans les cours d'eau. Cependant, leur utilisation sur le terrain était jusqu'à présent limitée du fait des lacunes observées en matière de données pédologiques. A l'avenir, il est recommandé d'utiliser ces instruments de manière uniforme et à grande échelle et de générer, à partir des résultats obtenus, des cartes d'application qui seront ensuite mises à disposition en vue d'une utilisation durable des sols. Il convient d'élaborer parallèlement des indicateurs du sol afin d'assurer une gestion durable des sols.

L'évaluation des fonctions du sol et des points d'indice de qualité pédologique qui en découlent jettera un pont entre la science et l'aménagement du territoire. Un premier catalogue de méthodes d'évaluation a d'ores et déjà été développé (point 2.6, p. 53), et un catalogue national contenant d'autres méthodes d'évaluation pertinentes et éprouvées dans la pratique devrait être établi à moyen terme.

9 Mettre en place un service centralisé

Il est recommandé de mettre en place un service centralisé – à l'intention des responsables politiques et exécutifs, de la recherche et du grand public – qui assure la coordination des différentes activités dans le cadre du cycle de création de valeur des informations du sol et qui développe avec des partenaires des méthodes à la pointe de la technique afin de les mettre à la disposition des cantons. Ce service centralisé aura également pour vocation de garantir le transfert de savoir et d'offrir des prestations de conseil tout en gérant la PIS-CH comme une plateforme dédiée à l'information et à la connaissance. De telles instances existent depuis longtemps dans d'autres domaines environnementaux, notamment le Service géologique national ou le Service hydrologique national. A l'instar de ces exemples, il est recommandé de mettre en place un Service pédologique national qui réponde de la PIS-CH.

Les conclusions ainsi formulées par rapport à la PIS-CH n'ont rien de nouveau. Elles se font en partie l'écho de la motion Müller-Altermatt qui appelle à la « création d'un organe central indépendant de gestion et de coordination des informations pédologiques ». Il est urgent d'appliquer cette motion à l'échelle fédérale et de remettre en cause la décision ayant entraîné la dissolution du Service national de cartographie des sols il y a plus de deux décennies. Parallèlement, il convient de finaliser la stratégie Sol de la Confédération et de l'ancrer dans le système d'exécution et les différents domaines politiques avec le concours des offices fédéraux et des cantons.

10 Relations publiques : sensibilisation à l'importance des sols

Le sol est une ressource naturelle rare et menacée qu'il est impossible de renouveler. A l'heure de la mondialisation de l'agriculture et de l'urbanisation, les sols ne sont souvent plus perçus consciemment comme base d'existence, bien que leur rôle dans le maintien de la vie sur Terre demeure inchangé. En dehors des champs d'action cités, qui se concentrent principalement sur la dimension technique, il y a lieu de sensibiliser davantage la

politique et la société au fait que notre civilisation et notre bien-être dépendent en fin de compte aussi des fonctions du sol et des services écosystémiques qu'il remplit.

En ce sens, il est primordial de veiller à la diffusion du message suivant : une fois détruits ou dégradés, les sols ne peuvent pas être régénérés en dépit des nombreuses solutions techniques qui révolutionnent notre quotidien. En ce qui concerne la ressource sol, le principe de précaution s'impose. Une utilisation inappropriée et non durable provoque des dommages pour ainsi dire irréversibles. Les techniques de restauration des fonctions du sol – si tant est qu'elles existent – ne sont pas viables financièrement. La mise en place de la PIS-CH permettra de renforcer le principe de précaution en matière de protection du sol.

Annexe

Annexe 1

Sélection des interventions parlementaires qui revêtent une grande importance pour la ressource sol et pour lesquelles les informations du sol constituent une base de décision essentielle.

Motion Bigger (05.3676)

Préserver les terres cultivables, date de dépôt: 07.10.2005

Initiative parlementaire Malama (08.437)

Taxe sur la plus-value. Abrogation de l'article 5 alinéa 1 LAT, date de dépôt: 13.06.2008

Initiative parlementaire CEATE (09.474)

Flexibilisation de la politique forestière en matière de surface, date de dépôt: 25.06.2009

Motion Bourgeois (09.4036)

Aménagement du territoire. Etude d'impact sur l'agriculture, date de dépôt: 02.12.2009

Motion Bourgeois (10.3659)

Aménagement du territoire et protection efficace des terres cultivables, date de dépôt: 15.09.2010

Motion von Siebenthal (10.3404)

Reconstitution et préservation des surfaces agricoles utiles embroussaillées et emboisées, date de dépôt: 10.06.2010

Postulat von Siebenthal (13.4201)

Ramener les cendres en forêt pour lutter contre l'acidification des sols, date de dépôt: 12.12.2013

Motion Hassler (10.3489)

Inscrire la protection intégrale des terres cultivables dans le droit de l'aménagement du territoire, date de dépôt: 17.06.2010

Postulat Lachenmeier-Thüring (10.3529)

Pour une limitation des surfaces de transport, date de dépôt: 17.06.2010

Postulat Walther (10.3533)

Eau et agriculture. Les défis de demain, date de dépôt: 17.06.2010

Interpellation Geissbühler (11.3046)

Réexamen des surfaces d'assolement, date de dépôt: 03.03.2011

Postulat Moser (12.3299)

Plan d'action pour réduire les risques et favoriser une utilisation durable des produits phytosanitaires, date de dépôt: 16.03.2012

Interpellation Joder (12.3883)

Protection qualitative et quantitative des sols. Coordination et mise en œuvre dans le cadre de la politique d'aménagement du territoire, date de dépôt: 27.09.2012

Motion Müller-Altermatt (12.4230)

Centre national de compétences pédologiques. Un gain pour l'agriculture, l'aménagement du territoire et la protection contre les crues, date de dépôt: 14.12.2012

Postulat Bourgeois (13.4158)

Potentiel du sous-sol. Règlement des conflits, gestion et organisation des tâches, date de dépôt: 11.12.2013

CdG, rapport de gestion 2015

Maintien de la superficie des terres cultivables. Rapport du Contrôle parlementaire de l'administration à l'intention de la Commission de gestion du Conseil national. Juin 2015.

Motion Graf (15.3411)

Suspension immédiate des ventes d'herbicides contenant du glyphosate, date de dépôt: 05.05.2015

Motion Knecht (15.3458)

Halte aux projets de qualité du paysage, date de dépôt: 06.05.2015

Motion Graf (15.3717)

Asseoir la Politique agricole 2014–2017 et assurer le suivi, date de dépôt: 19.06.2015

Motion Schelbert (15.3835)

Pesticides. Mise en œuvre du principe de précaution, date de dépôt: 04.11.2015

Motion Reynard (16.4070)

Relever la concentration de mercure entraînant l'inscription d'une parcelle de terrain au cadastre des sites pollués, date de dépôt: 15.12.2016

Interpellation Bertschy (17.4186)

La sécurité alimentaire comme défi écologique. Quelles mesures prend le Conseil fédéral? Date de dépôt: 14.12.2017

Annexe 1

Systèmes d'information sur les sols

Pays	Institution	Informations pédologiques
Allemagne	Institut fédéral des Géosciences et de Ressources naturelles (BGR)	<ul style="list-style-type: none"> – Système d'information spécialisé pour les sols (FISBo) – Données de base pédologiques – Données relatives aux surfaces – Laboratoire/données relatives aux profils – Méthodes – Cartes thématiques
→	http://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Boden/Informationsgrundlagen/informationsgrundlagen_node.html http://www.bgr.de/app/FISBoBGR_MapServer/index.php?project=fisbo&lang=de	
Allemagne	Office fédéral de l'environnement (Allemagne)	<ul style="list-style-type: none"> – Système d'information spécialisé pour la protection des sols (FIS Bodenschutz) – Surveillance permanente des sols – Transfert sols – plantes
→	www.umweltbundesamt.de (en allemand / voir aussi la publication : UBA 2012. Bodendaten in Deutschland)	
Allemagne	Institut fédéral des Géosciences et de Ressources naturelles (BGR)	– Cartes à grande échelle
→	www.bodenatlas.de (en allemand)	
Allemagne	Services publics géologiques allemands	<ul style="list-style-type: none"> – Relevés des forages – Serveur cartographique
→	http://www.infogeo.de	
Allemagne	Office fédéral de cartographie et de géodésie	<ul style="list-style-type: none"> – Géoportail de la République fédérale d'Allemagne – Recherche par domaines thématiques
→	http://www.geoportal.de (en allemand)	
Allemagne	Centre BonaRes	<ul style="list-style-type: none"> – Ministère fédéral de l'Education et de la Recherche (BMBWF) – Centre Helmholtz pour la recherche environnementale (UFZ) – Centre de recherche de Leibniz sur le paysage agricole (ZALF)
→	www.bonares.de (en allemand)	
Allemagne – Bavière	Bayerisches Landesamt für Umwelt	– Cartes des sols
→	Système d'information sur les sols de Bavière : http://www.bis.bayern.de	
Allemagne – Rhénanie du Nord-Westfalie	Geologischer Dienst Nordrhein-Westfalen	– Cartes des sols
→	Système d'information et cartes pédologiques : http://www.gd.nrw.de/g_bk.php	
Allemagne – Basse-Saxe	Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG)	– Cartes des sols
→	Système d'information sur les sols de Basse-Saxe NIBIS : http://www.lbeg.niedersachsen.de/portal/live.php?navigation_id=608&article_id=841&psmand=4	
Allemagne – Bade-Wurtemberg	Regierungspräsidium Freiburg, Institut fédéral des Géosciences et de Ressources	– Cartes des sols
→	Services de géodonnées, Office national de géologie : https://produkte.lgrb-bw.de/catalog/list/?wm_group_id=2	
Autriche	Système d'information sur les sols BORIS Umweltbundesamt Wien	<ul style="list-style-type: none"> – Cartes des sols – Surveillance des sols – Etat des sols
→	http://www.umweltbundesamt.at/umweltsituation/boden/boris/boris_datenzugang/	

Systèmes d'information sur les sols

Pays	Institution	Informations pédologiques
Suisse	Office fédéral de l'environnement (OFEV)	– Cartes pédologiques – Surveillance des sols – Etat des sols
→	Système national d'information pédologique NABODAT : www.nabodat.ch	
Suisse – Canton de Bâle-Campagne	Direktion für Bau und Umwelt, Umweltschutz	– Cartes des sols – Etat des sols
	Informations pédologiques Bâle : http://www.baselland.ch/Bodeninformation.312689.o.html (www.geo.bl.ch)	
Suisse – Canton de Zurich	Baudirektion, Amt für Landschaft und Natur	– Cartes des sols – Surveillance des sols
→	Carte des sols du canton de Zurich : http://www.aln.zh.ch/internet/baudirektion/aln/de/fabo/bodenzustand/bodenkarten.html (http://www.gis.zh.ch/gb4/bluevari/gb.asp?app=boka)	
Suisse – Canton de Soleure	Amt für Umwelt, Fachbereich Bodenschutz	– Cartes des sols – Etat des sols
→	Carte interactive d'informations sur les sols : http://www.so.ch/departemente/bau-und-justiz/amt-fuer-umwelt/fachbereiche/bodenschutz.html (http://www.sogis1.so.ch/sogis/internet/pmapper/map.phtml?config=boden_lw)	
Suisse – Canton de Saint-Gall	Amt für Umwelt und Energie (AFU) Amt für Raumentwicklung und Geoinformation (AREG)	– Cartes des sols
→	http://www.umwelt.sg.ch/home/Themen/Boden/Messergebnisse/bodenkarte.html (www.geoportal.sg.ch)	
Suisse – Canton de Lucerne	Umwelt und Energie (uwe), Abteilung Boden und Abfall, Bodenschutz	– Cartes des sols
→	Carte interactive d'informations sur les sols : http://www.umwelt-luzern.ch/index/bodenschutz.htm (http://www.geo.lu.ch/map/boden/)	
Suisse – Canton de Genève	Service de géologie, sols et déchets (GESDEC)	– Cartes des sols
→	Carte interaction d'informations sur les sols : http://ge.ch/geoportail/infosgesdec	
Angleterre et Pays de Galles	Cranfield University, Ministry of Environment	
→	LandIS (Land Information System) : http://www.gd.nrw.de/g_bk.php	
Irlande	Environmental Protection Agency	
→	http://soils.teagasc.ie	
France	Groupement d'Intérêt Scientifique Sol (GIS Sol)	
→	DONESOL : http://www.gissol.fr/outil/donesol/donesol.php	
Danemark	Geological Survey of Denmark and Greenland	
→	Soil Mapping Service : http://www.geus.dk/departments/quaternary-marine-geol/gis/j200-dk.html	
Norvège	Norwegian Institute of Land Inventory	
→	Soil Mapping Service : http://www.skogoglandskap.no/	
Europe de l'Est	Synthèse	
→	Voir compilation dans Hengl et al. 2007 ⁸³	

Annexe 1

Systèmes d'information sur les sols

Pays	Institution
Europe	Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability, European Commission
.....>	EUSIS (European Soil Information System) : http://eusoils.jrc.ec.europa.eu/esbn/EUSIS.html European Soil Data Centre (ESDAC) : http://esdac.jrc.ec.europa.eu/resource-type/datasets
Etats-Unis	National Cooperative Soil Survey (NCSS)
.....>	NASIS (National Soil Information System) : http://soils.usda.gov/technical/nasis/index.html
Canada	Agriculture and Agri-Food Canada
.....>	SISCan (Service d'information sur les sols du Canada) : http://sis.agr.gc.ca/cansis

Le Programme national de recherche « Utilisation durable de la ressource sol » (PNR 68)

Les Programmes nationaux de recherche (PNR) doivent apporter une contribution à la résolution de problèmes actuels d'importance nationale. Le Fonds national suisse (FNS) veille à leur exécution sur mandat du Conseil fédéral.

Le Programme national de recherche « Utilisation durable de la ressource sol » (PNR 68) établit les bases pour une exploitation durable des sols en Suisse. A cette fin, il convient de prendre en compte les services écologiques et économiques que fournit le sol. Le concept des services écosystémiques permet de mettre en valeur les fonctions des sols et leur contribution au bien-être humain.

Le PNR 68 poursuit trois objectifs principaux: i) approfondissement de la connaissance systémique du sol; ii) mise au point d'instruments pour évaluer le sol en tant que ressource; iii) élaboration de stratégies favorisant un usage durable des sols.

Sélection et durée des projets de recherche

Le PNR 68 disposait d'une enveloppe de 13 millions de francs, et les recherches réparties en deux phases ont duré de 2013 à 2017. Les projets ont été sélectionnés parmi un grand nombre de propositions selon des critères de qualité scientifique et de pertinence pour le PNR 68 dans le contexte suisse. Après une procédure de sélection en deux étapes ayant fait appel à une expertise internationale, le FNS a retenu 19 projets pour la première phase de recherche (2013–2015). Deux projets supplémentaires ont été encouragés dans le cadre d'une seconde mise au concours. Lors de la seconde phase de recherche (2016–2017), le FNS a lancé quatre projets complémentaires. Au total, ce sont donc 25 projets de recherche qui ont été menés à bien dans le cadre du PNR 68. Par ailleurs, 4 millions de francs supplémentaires ont été mis à disposition du PNR 68 et du PNR 69 « Alimentation saine et production alimentaire durable » afin d'encourager des projets s'inscrivant dans les mises aux concours des initiatives européennes de programmation conjointe (European Joint Programming Initiatives – JPI) « Agriculture, sécurité alimentaire et changement climatique » (FACCE-JPI) et « Une alimentation saine pour une vie saine » (HDHL-JPI). Ces fonds ont permis d'intégrer au PNR 68 douze projets supplémentaires d'un rayonnement international (www.nfp68.ch/fr/ → Projets).

Faute de propositions d'une qualité suffisamment élevée, le PNR 68 ne comprend aucun projet de recherche sur les thèmes de la propriété du sol, des conditions-cadres juridiques et de la valorisation économique et sociale des services écosystémiques fournis par le sol.

Un dialogue constant

Au regard des buts poursuivis par le PNR 68, l'établissement d'un dialogue ouvert et transparent au sein du programme ainsi qu'avec les représentantes et représentants des parties prenantes revêtait une grande importance. A cette fin, les scientifiques se sont rencontrés à l'occasion de trois conférences internes. Des chercheuses et chercheurs ainsi que des membres du comité de direction ont en outre régulièrement participé à des manifestations

réunissant des partenaires de la pratique et à des symposiums publics. Le principal objectif était ce faisant de promouvoir l'échange entre les scientifiques et les acteurs de la pratique afin d'aborder les thématiques centrales du PNR 68: « environnement », « agriculture » et « aménagement du territoire ».

Suivi largement étayé des synthèses thématiques

En préalable à l'élaboration des synthèses thématiques, le PNR 68 a organisé début 2016 trois ateliers destinés aux parties prenantes qui ont regroupé des spécialistes issus des administrations fédérales et cantonales, des associations économiques et environnementales et du secteur privé afin de discuter des résultats provisoires des projets. Ces ateliers ont fourni d'importantes impulsions pour la conception et la structuration des synthèses thématiques du PNR 68 dont l'objectif est de replacer les résultats scientifiques dans un contexte élargi adapté aux groupes-cibles et de développer des instruments, des concepts et des stratégies spécifiques destinés à la pratique comme à l'administration. Elles apportent ce faisant une contribution décisive à l'atteinte des buts du programme.

En s'appuyant sur les impulsions fournies par ces ateliers et en concertation avec les scientifiques, le comité de direction du PNR 68 a décidé à l'automne 2016 de lancer cinq synthèses thématiques.

Les responsables des synthèses thématiques ont respectivement présenté leurs concepts et leurs ébauches aux membres des groupes de suivi à l'occasion de deux ou trois ateliers participatifs. Ces rencontres visaient à soumettre les concepts élaborés à un examen critique et à combler d'éventuelles lacunes. Il incombait aux auteures et auteurs des synthèses thématiques d'évaluer ces suggestions et de décider quels étaient les aspects pouvant être pris en compte dans les travaux à venir. Enfin, les synthèses thématiques ont été validées par le comité de direction du PNR 68.

Les projets de recherche du PNR 68

* Projets ayant contribué à la présente synthèse thématique.

Phase de recherche 1

- A * **ACCAPAREMENT DES TERRES**: L'accaparement des terres (« land grabbing ») avec une participation suisse (Rist S., Cottier T., Mann S.)
- B * **BACTÉRIES DU SOL**: Des sols sains grâce aux bactéries du sol (Maurhofer Bringolf M., Keel C.)
- C * **CARTES DES SOLS**: Cartographie des propriétés du sol pour une évaluation des fonctions du sol à l'échelle régionale (Papritz A.J., Baltensweiler A., Keller A., Presler J., Schaepman M.E., Walthert L., Zimmermann S.)
- * **COMPENSATION DES PLUS-VALUES ET DES MOINS-VALUES FONCIÈRES**: Gestion durable des sols par la compensation des plus-values et moins-values économiques et écologiques (Nahrath S., Gmünder M., Grêt-Regamey A., Joerin F., Pflieger G.)
- * **COMPENSATION MULTICRITÈRE**: Prendre en compte la qualité des sols dans les mécanismes de compensation appliqués en aménagement du territoire (Joerin F., Boivin P., Ruegg J.)
- * **COUVERTS VÉGÉTAUX**: Préserver l'environnement par les couverts végétaux et l'agriculture de conservation du sol (Streit B., Charles R., Walter A.)
- D * **DYNAMIQUE DU CARBONE**: Influence du changement climatique et de l'utilisation des sols sur le carbone contenu dans les sols suisses (Abiven S., Niklaus P.A.)
- E * **ENTRÉES DE CARBONE**: Entrées de carbone dans le sol par les cultures (Mayer J., Abiven S., Hund A., Leifeld J.)
- G * **GAZ HILARANT**: Influences de l'exploitation du sol sur les micro-organismes du sol qui émettent et décomposent le gaz hilarant (Gattinger A., Mäder P., Thonar C.)
- I * **INDICATEURS DE VULNÉRABILITÉ**: Indicateurs de la vulnérabilité du carbone contenu dans les sols (Eglinton T.)
- * **INSTRUMENTS POLITIQUES**: Instruments politiques pour une utilisation durable des sols (Walter F., Grêt-Regamey A., Sager F., Vatter A.)
- M * **MITAGE**: Contrôler le mitage du territoire – Réduire l'utilisation du sol (Kienast F., Hersperger A.M., Schulz T., Seidl I.)

Annexe 1

* MYCORHIZES : Restauration des fonctions du sol à l'aide de mycorhizes arbusculaires (Van der Heijden M., Oehl F., Wagg C.)

N * NÉMATODES : Utilisation des filaires dans la lutte contre les insectes nuisibles du sol (Turlings T., Mascher F.)

P * PLATE-FORME DE DÉCISION : Plate-forme de décision pour une utilisation durable du sol (Grêt-Regamey A., Diggelmann H., Huber R., Keller A., Kübler D., Siegrist D., Zimmermann S.)

R RÉSISTANCE AUX ANTIBIOTIQUES : Le rôle de l'utilisation des sols dans les résistances aux antibiotiques (Duffy B., Smits T.)

S * SOLS FORESTIERS : Stocks de carbone dans les sols forestiers suisses (Hagedorn F., Gimmi U., Thürig E., Walther L.)

* SOLS MARÉCAGEUX : Gestion durable des sols organiques (Leifeld J., Engel S., Müller M.)

* STABILITÉ DES SOLS : Stabilité des sols et risques naturels : de la connaissance à l'action (Graf F., Bebi P., Frei M., Rickli C., Rixen C., Springman S.M.)

* SYSTÈME D'ALERTE PRÉCOCE : Outil régional de monitoring des sols pour des cycles durables des substances dans les sols agricoles (Keller A., Mann S., Schaepman M.E., Schulin R.)

T * TASSEMENT DES SOLS : Restauration naturelle de la structure des sols tassés (Keller T., Or D., Schymanski S., Walter A., Weisskopf P.)

Phase de recherche 2

D * DÉCISIONS QUANT À L'EXPLOITATION DES SOLS : Meilleure gestion des achats transnationaux de terrains (Rist S., Mann S., Messerli P.)

L * LUTTE BIOLOGIQUE CONTRE LES PARASITES : Des nématodes et des bactéries contre les organismes nuisibles du sol (Turlings T., Keel C., Maurhofer Bringolf M.)

M MODÈLE D'EXPLOITATION DU SOL : Modèle d'exploitation du sol sur le Plateau suisse (Keller A., Schaepman M.E., Schulin R.)

S SYSTÈMES DE CULTURE AMÉLIORANT LE SOL : Pôles d'innovation pour des systèmes de culture améliorant le sol (Charles R., Keller T., Mayer J., Six J., Van der Heijden M.)

FACCE-JPI

Les équipes de projet des initiatives européennes de programmation conjointe «Agriculture, sécurité alimentaire et changement climatique» (FACCE-JPI) et «Une alimentation saine pour une vie saine» (HDHL-JPI) sont composées de scientifiques issus d'au moins trois pays partenaires. Par souci de simplification, seuls les chefs de projet sis en Suisse sont mentionnés.

- A AFGROLAND: Dynamique du système alimentaire en Afrique (Messerli P.)
- B BASIL: Biodiversité dans les systèmes agricoles (Olschewski R., Frey B., Gessler A., Hagedorn F., Seidl I.)
- C * CLIMATE-CAFÉ: Adaptabilité des systèmes agricoles au changement climatique en Europe (Six J., Charles R.)

COMET-GLOBAL: Comptabilité des gaz à effet de serre (Six J.)
- D * DEVIL: Sécurité alimentaire sur des territoires limités (Buchmann N.)
- E ECO-SERVE: Pérennité des services écosystémiques multiples dans les systèmes agricoles (Mäder P., Gattinger A.)
- G GREEN RICE: Produire du riz en ménageant les ressources (Six J.)
- M MAGGNET: Gaz à effet de serre issus de l'agriculture (Leifeld J.)

MODELS4PASTURES: Gaz hilarant d'origine agricole (Merbold L., Buchmann N.)
- P PROMESSING: Maintien des services écosystémiques dans les vignobles d'Europe centrale (Bacher S.)
- S STACCATO: Services écosystémiques dans les paysages agricoles (Zimmermann N., Kienast F.)
- T * TALE: Pour des paysages agricoles multifonctionnels en Europe (Holzkämper A., Charles R.)

Synthèses thématiques

Synthèse thématique ST1: Sol et production alimentaire (Charles R., Wendling M., Burgos S.)

Synthèse thématique ST2: Sol et environnement (Hagedorn F., Krause H.-M., Studer M., Schellenberger, A., Gattinger A.)

Annexe 1

Synthèse thématique ST₃: Un agenda du sol pour l'aménagement du territoire
(Grêt-Regamey A., Kool S., Bühlmann L., Kissling S.)

Synthèse thématique ST₄: Plateforme d'information des sols suisse (PIS-CH) (Keller A., Franzen J., Knüsel P., Papritz A.J., Zürrer M.)

Synthèse thématique ST₅: Vers une politique durable des sols (Walter F., Hänni E.)

Etudes focalisées

- B BILAN GAZ À EFFET DE SERRE: Emissions de gaz à effet de serre des sols agricoles en Suisse (Gattinger A., Bretscher D., Schellenberger A.)
- I * INDICATEURS DU SOL: Indicateurs du sol pour un aménagement durable du territoire (Grêt-Regamey A., Bühlmann L.)
- M MARCHÉ DU SOL AGRICOLE: Le marché du sol agricole pris en étau dans les régions en expansion urbaine (Giuliani G., Flury C.)
- S * SYSTÈMES D'INFORMATION DU SOL: Systèmes d'information du sol et cartographie (digitale) du sol (Papritz A.J., Burgos S., Carizzoni M., Keller A., Wegmann F.)

Index des illustrations

Illustration 1	Profils de sol de champs cultivés, de prairies et de sols forestiers	15
Illustration 2	Le sol dans sa globalité	17
Illustration 3	Informations du sol en tant qu'éléments du cycle de création de valeur d'une politique durable des sols	19
Illustration 4	Dimensions du cycle de création de valeur des informations du sol devant être coordonnées	20
Illustration 5	Types de sols adaptés et inadaptés à la production de denrées alimentaires	27
Illustration 6	Capacité de filtration des sols	29
Illustration 7	Exemples d'organismes vivant dans le sol	31
Illustration 8	Extrait de la carte recensant les sols anthropiques dans le canton de Zurich	32
Illustration 9	Feuille de relevé d'une cartographie des sols	36
Illustration 10	Exemple de carte d'utilisateur thématique pour la protection du sol dérivée de cartes du sol	37
Illustration 11	Procédure d'élaboration de cartes des propriétés et des fonctions du sol	38
Illustration 12	Aperçu des cartographies du sol depuis les années 1950 en Suisse	41
Illustration 13	Extrait du Système national d'information pédologique (NABODAT)	44
Illustration 14	Aperçu des réseaux de mesure de l'humidité du sol 2015	46
Illustration 15	Teneur en P des horizons supérieurs des surfaces de cultures fourragères 2014	47
Illustration 16	Etat de la cartographie des sols dans l'UE	50
Illustration 17	Disponibilité des systèmes d'information sur les sols dans les pays de l'UE	50
Illustration 18	Réserves mondiales de terres agricoles	51
Illustration 19	Piliers d'action du Partenariat mondial sur les sols (GSP)	53
Illustration 20	Exemple d'une évaluation des fonctions du sol dans le Land de la Hesse (DE)	56
Illustration 21	Processus général d'évaluation des fonctions du sol	57
Illustration 22	Cartes des fonctions du sol pour la région d'étude du canton de Zurich	58
Illustration 23	Diagramme de représentation de la multifonctionnalité des sols et des performances spécifiques d'un sol	59
Illustration 24	Changement dans la gestion du sol dans la région de Bern-Westside entre 2002 et 2008	61
Illustration 25	Schéma d'inventaire des surfaces d'assolement	62
Illustration 26	Carte des sols comme base d'évaluation de l'aptitude culturale (CAC) et la délimitation des sDA	63
Illustration 27	Outil régional de monitoring des sols pour équilibrer les cycles des matières	67
Illustration 28	Catégories d'utilisation du sol et rotations entre terres cultivées et prairies pour les surfaces agricoles du Plateau de 2000 à 2015	68

Annexe 2

Illustration 29	Etapes de travail de la méthode de cartographie actuelle et développements techniques proposés	77
Illustration 30	Régions prioritaires possibles pour la cartographie des sols : sols situés aux abords des paysages dominés par les zones urbaines (critère : « pression urbaine »)	80
Illustration 31	Calendrier possible pour la réalisation d'une PIS-CH	82
Illustration 32	Utilité directe du sol (exemples)	85
Illustration 33	Culture du sol : « Le semeur », Vincent van Gogh	86
Illustration 34	Signe de compaction du sol après de fortes précipitations sur des terres arables en Suisse.	87
Illustration 35	Sol marécageux labouré en profondeur et drainé	90
Illustration 36	SETEC à Zurich-Affoltern	91
Illustration 37	Aperçu de la valeur ajoutée d'une cartographie des sols pour dix domaines sélectionnés	92

Index des tableaux

Tableau 1	Domaines thématiques dans lesquels des informations du sol sont relevées	23
Tableau 2	Intérêts d'utilisation, parties prenantes et questions sélectionnées en rapport avec les informations du sol	24–25
Tableau 3	Besoins en informations du sol relatives aux propriétés et caractéristiques pédologiques	34
Tableau 4	Etapes du relevé des informations du sol pour l'établissement de cartes	35
Tableau 5	Etat de la cartographie des sols en Suisse	42
Tableau 6	Exemples de critères d'évaluation pour quelques sous-fonctions du sol	54–55
Tableau 7	Instruments de calcul et d'évaluation des risques pour les sols	64
Tableau 8	Définitions possibles de régions prioritaires, selon les problématiques propres à différents groupes de besoins	81

Glossaire

C Caractéristiques pédologiques

En général, paramètres dérivés qui servent à décrire les propriétés des sols (par ex., profondeur utilisable par les plantes).

Cartographie des sols

Relevé systématique et étendu (inventaire) des conditions du sol. Le but d'une cartographie des sols est de recenser la répartition spatiale des sols selon leur composition et leurs propriétés. Les directives de cartographie font office de document de référence⁴⁶.

Code

Version du modèle de données qui définit comment les propriétés et les caractéristiques des sols sont enregistrées. Le code définit également les orientations possibles (classes de codes) pour les grandeurs taxonomiques.

D Digital Soil Mapping (DSM)

Domaine de la pédologie appliquant des méthodes mathématiques et statistiques pour analyser la logique de répartition ainsi que la genèse des sols et de leurs propriétés. L'objectif principal est de générer des cartes pédologiques en s'appuyant sur les relations quantitatives entre données pédologiques de terrain ou de laboratoire et données environnementales étendues (relief, géologie, climat et autres facteurs)¹⁷⁴.

Données pédologiques

Propriétés des sols qui peuvent être directement mesurées ou estimées (par ex., teneur en argile). Elles peuvent être utilisées telles quelles afin de décrire des propriétés des sols ou devoir être agrégées en caractéristiques pédologiques dérivées¹.

F Fertilité du sol

Terme désignant tous les processus et propriétés minéralogiques, physiques, chimiques et biologiques du sol ayant une influence sur la croissance des végétaux et la production de biomasse¹⁹.

Le sol est considéré comme fertile :

- a. s'il présente, pour sa station, une biocénose biologiquement active, une structure, une succession et une épaisseur typiques et qu'il dispose d'une capacité de décomposition intacte;*
- b. s'il permet aux plantes et aux associations végétales naturelles ou cultivées de croître et de se développer normalement et ne nuit pas à leurs propriétés;*
- c. si les fourrages et les denrées végétales qu'il fournit sont de bonne qualité et ne menacent pas la santé de l'homme et des animaux;*
- d. si son ingestion ou inhalation ne menace pas la santé de l'homme et des animaux.*

Fonctions du sol

Services résultant des propriétés du sol et des processus à l'œuvre dans le sol qui contribuent à l'équilibre naturel et revêtent une importance centrale pour la société humaine. Contrairement aux services écosystémiques (†), les fonctions remplies par un sol n'ont

aucune incidence directe sur la valeur du sol pour le bien-être humain. A cet égard, l'on distingue selon la loi fédérale allemande sur la protection du sol¹²⁵:

Fonctions naturelles:

- Base vitale et espace vital pour les êtres humains, les animaux, les plantes et les micro-organismes vivant dans le sol
- Elément de l'équilibre naturel, en particulier dans les cycles de l'eau et de la matière
- Milieu de dégradation, d'ajustement et de développement des substances grâce à ses propriétés tampon et capacités de filtration de transformation, en particulier dans l'optique de la protection des eaux souterraines

Fonctions d'archivage:

- Conservation de l'histoire naturelle et culturelle

Fonctions d'utilisation:

- Gisements de ressources naturelles
- Surface d'urbanisation et de détente
- Espace pour l'exploitation agricole et forestière
- Espace pour d'autres utilisations économiques et publiques, notamment le transport, l'approvisionnement, l'élimination

I Informations du sol

Ensemble des données pédologiques, des paramètres, des cartes et des autres supports d'information qui servent à relever, à évaluer et à interpréter les propriétés spatio-temporelles des sols.

P Propriétés du sol

Propriétés décrivant la nature du sol. Elles sont généralement exprimées au moyen de caractéristiques pédologiques. La compacité ou la perméabilité à l'eau en constituent des exemples. Les propriétés du sol donnent des indications sur la manière dont certains processus s'y déroulent. La perméabilité indique ainsi la vitesse à laquelle l'eau peut s'infiltrer dans le sol¹.

Q Qualité du sol

Capacité des sols à remplir leurs fonctions dans les écosystèmes^{201, 202}.

S Services écosystémiques (SES)

Services fournis aux Hommes par les écosystèmes ou aspects des écosystèmes utilisés – activement ou passivement – pour le bien-être humain. Les services écosystémiques contribuent à la reconnaissance de la valeur du sol pour le bien-être humain et à la prise en compte des sols dans les processus de décision. A l'inverse, les fonctions du sol (†) sont des fonctions que le sol remplit sans qu'il existe de relation directe entre la valeur du sol et le bien-être humain².

Surface agricole utile (SAU)

Surface affectée à une exploitation et utilisée pour la production végétale, excluant la surface d'estivage qui est à la disposition de l'exploitant tout au long de l'année²⁰³. La surface agricole utile de la Suisse s'élève à près de 1,05 million d'hectares (2017)²⁰⁴.

Surfaces d'assolement (SDA)

Terme désignant les terres arables les plus précieuses de Suisse qui doivent figurer dans le plan sectoriel des surfaces d'assolement (PS SDA) afin de garantir des sources d'approvisionnement suffisantes au pays conformément à l'article 1, alinéa 2 de la loi fédérale sur l'aménagement du territoire (LAT) du 22 juin 1979. Les SDA représentent 444 000 hectares qui sont constitués en premier lieu des terres ouvertes et des prairies artificielles intercalaires, de même que des prairies naturelles arables. Les SDA sont principalement situées sur le Plateau suisse²⁰⁵.

T Tensiomètre

Instrument permettant de mesurer en continu l'humidité du sol par détermination de la succion (force fournie par une plante pour absorber l'eau).

Liste des abréviations

ARE	Office fédéral du développement territorial
CAC	Classes d'aptitude culturale des sols (selon FAL24)
Cst.	Constitution fédérale
DSM	Digital Soil Mapping, cartographie numérique des sols
EIE	Etude de l'impact sur l'environnement
FAL24	Méthode de cartographie, selon « Kartieren und Beurteilen von Landwirtschaftsböden » ⁴⁶
FAL24+	Méthode de cartographie, selon le concept de cartographie élaboré par le canton de Soleure ^{20, 46} , qui perfectionne la méthode actuelle et affecte à chaque unité de surface (polygone) de la carte du sol un ensemble minimal de données correspondant aux propriétés et caractéristiques du sol.
FNS	Fonds national suisse
FPT	Fonction de pédotransfert
GES	Gaz à effet de serre
NABO	Observatoire national des sols
NABODAT	Système national d'information pédologique (www.nabodat.ch)
OEA	Objectifs environnementaux pour l'agriculture
OFAG	Office fédéral de l'agriculture
OFEV	Office fédéral de l'environnement
OFS	Office fédéral de la statistique
OSol	Ordonnance sur les atteintes portées aux sols (RS 814.12)
PNR 22	Programme national de recherche « Utilisation du sol en Suisse »
PNR 61	Programme national de recherche « Gestion durable de l'eau »
PD SDA	Plan sectoriel des surfaces d'assolement
SAU	Surface agricole utile
SDA	Surfaces d'assolement
SES	Services écosystémiques
SIS	Système d'information sur les sols
SSP	Société suisse de pédologie
ST	Synthèse thématique

Bibliographie

- 1 Krebs R., Egli M., Schulin R., Tobias S. (Ed.) (2017) : *Bodenschutz für die Praxis*. Haupt-Verlag, UTB-Band-Nr. 4820.
- 2 Grêt-Regamey A., Drobnik T., Greiner L., Keller A., Papritz A. (2016) : *Soils and their contribution to ecosystem services*. Fiche d'information du PNR 68. www.nfp68.ch/fr
- 3 Greiner L., Keller A., Grêt-Regamey A., Papritz A. (2017) : *Soil function assessment: review of methods for quantifying the contributions of soils to ecosystem services*. *Land Use Policy* 67, 224–237.
- 4 Offices fédéraux de l'environnement (OFEV), du développement territorial (ARE) et de l'agriculture (OFAG) (2016) : *Projet de stratégie nationale pour la gestion durable du sol (document interne)*.
- 5 Staub C., Ott W., Heusi F., Klingler G., Jenny A., Häcki M., Hauser A. (2011) : *Indicateurs pour les biens et services écosystémiques: Systématique, méthodologie et recommandations relatives aux informations sur l'environnement liées au bien-être*. Office fédéral de l'environnement (OFEV), Berne.
- 6 Office fédéral de l'agriculture (2012) : *Protection des terres agricoles. Bilans et défis*. Berne. www.blw.admin.ch/blw/fr/home.html > Politique > Protection des terres agricoles.
- 7 Grêt-Regamey A., Kool S., Bühlmann L., Kissling S. (2018) : *Un agenda du sol pour l'aménagement du territoire*. Synthèse thématique ST3 du Programme national de recherche « Utilisation durable de la ressource sol » (PNR 68), Berne.
- 8 Chemnitz C., Weigelt J. (2015) : *L'Atlas du sol – Faits et chiffres sur la terre, les sols et les champs*. Fondation Heinrich Böll Berlin. fr.boell.org/fr/2015/05/19/atlas-du-sol
- 9 Science for Environment Policy (2016) : *No net land take by 2050? Future Brief 14*. Produced for the European Commission DG Environment by the Science Communication Unit, UWE, Bristol. Disponible sous : <http://ec.europa.eu/science-environment-policy>
- 10 www.farmlandgrab.org
- 11 Office fédéral pour l'approvisionnement économique du pays (OFAE) (2010) : *Berechnung theoretisches Produktionspotential Fruchtfolgeflächen*. Domaine alimentation.
- 12 Moser A., Lüscher C. (2013) : *Surfaces nécessaires à l'alimentation de l'agglomération bâloise mises en image*. *Recherche Agronomique Suisse* 4, 88–91.
- 13 Office fédéral de l'agriculture (OFAG) (2010) : *Agriculture et filière alimentaire 2025*. Document de discussion élaboré par l'OFAG en vue d'une orientation stratégique de la politique agricole, Berne.
- 14 Rieder S., Landis F., Lienhard A., Schwenkel C., Dolder O. (2014) : *Stärkung des Vollzugs im Umweltbereich – Rapport final sur mandat de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV)*. Interface/Kompetenzzentrum für Public Management de l'Université de Berne, Lucerne.
- 15 Hepperle E., Stoll T. (2006) : *Ressourcenplan Boden. Ein Konzept zum planerisch-nachhaltigen Umgang mit Bodenqualität*. OFEV, Connaissance de l'environnement UW-0633, Berne.
- 16 Neue Zürcher Zeitung (14.11.2014) : *Föderalismus in Bewegung. Es hapert beim Vollzug der Umweltgesetze*. Zurich.

- 17 Direction de l'économie publique, Office de l'agriculture et de la nature (OAN) du canton de Berne (2017) : *Rapport sur les sols 2017*. Zollikofen. www.be.ch/bodenschutz.
- 18 Campbell G.A., Lilly A., Corstanje R., Mayr T.R., Black H.I.J. (2017) : *Are existing soils data meeting the needs of stakeholders in Europe? An analysis of practical use from policy to field*. *Land Use Policy* 69, 211–223.
- 19 Ordonnance sur les atteintes portées aux sols (OSol) du 1^{er} juillet 1998 (Etat le 12 avril 2016) (SR 814.12).
- 20 Service de protection des sols du canton Soleure (2005) : *Bodenkartierung Kanton Solothurn. Konzept Bodenkartierung Kanton Solothurn 2005. Aktualisierung des Konzeptes von 1995*. Soleure.
- 21 Lüscher C. (2004) : *Leitfaden Bodenkartierung Bodendaten – ein Werkzeug für Planung, Nutzung und Schutz des Lebensraumes Boden*. SSP et OFEFP.
- 22 Knecht M., Lüscher C., Borer F. (2017) : *Bedürfnisabklärungen Bodeninformationen*. Sur mandat de l'OFEV. AMBIO GmbH, Zurich.
- 23 Conseil fédéral suisse (2017) : *Message relatif à l'initiative populaire « Pour la souveraineté alimentaire. L'agriculture nous concerne tous »*, SR 17.023.
- 24 Office fédéral de l'environnement (OFEV), Office fédéral de l'agriculture (OFAG) (2016) : *Objectifs environnementaux pour l'agriculture. Rapport d'état 2016*. OFAG, Connaissance de l'environnement UW-1633, Berne.
- 25 World Food System Center de l'EPF Zurich (2015) : *Foresight Study: Research for a Sustainable Swiss Food System*. www.worldfoodsystem.ethz.ch
- 26 Zihlmann U., Weisskopf P., Müller M. (2010) : *Böden standortgerecht nutzen. Datenblätter Ackerbau, Grundlagen 1.7.1*, Agridea.
- 27 Office fédéral de l'environnement (2009) : *Résultats de l'observatoire national des eaux souterraines (NAQUA). Etat et évolution de 2004 à 2006*. OFEV, Etat de l'environnement UZ-0903, Berne.
- 28 Doppler T., Mangold S., Wittmer I., Spycher S., Comte R., Stamm C., Singer H., Junghans H., Kunz M. (2017) : *Pollution élevée par les produits phytosanitaires dans les ruisseaux suisses (résumé en français)*. *Aqua & Gas* 4.
- 29 Wittmer I., Moschet C., Simovic J., Singer H., Stamm C., Hollender J., Junghans M., Leu C. (2014) : *Plus de 100 pesticides dans les cours d'eau – Le programme NAWA SPE montre la forte pollution en pesticides des cours d'eau suisses*. *Aqua & Gas* 3.
- 30 Prasuhn V., Konz N., Stamm C., Frey M. (2011) : *Machbarkeitsstudie Kartierung bei-tragender Flächen – Problem fehlender Bodendaten*. *Bulletin 32 SSP, Knappe Ressource Boden: eine Herausforderung*, 71–74.
- 31 Chiaia-Hernandez A.C., Keller A., Wächter D., Steinlin C., Camenzuli L., Hollender J., Krauss M. (2017) : *Long-term persistence of pesticides and TPs in archived agricultural soil samples and comparison with pesticide application*. *Environmental Science & Technology* 51 (18), 10642–10651.
- 32 Conseil fédéral (2012) : *Adaptation aux changements climatiques en Suisse. Objectifs, défis et champs d'action*. Premier volet de la stratégie du Conseil fédéral du 2 mars 2012. OFEV (Ed.).
- 33 Conseil fédéral (2014) : *Adaptation aux changements climatiques en Suisse. Plan d'action 2014–2019*. Deuxième volet de la stratégie du Conseil fédéral du 9 avril 2014. OFEV (Ed.).

- 34 Office fédéral de l'agriculture (OFAG) (2011) : *Stratégie Climat pour l'agriculture. Protection du climat et adaptation au changement climatique pour une agriculture et une économie alimentaire suisses durables*. Berne.
- 35 Jeffery S., Gardi C., Jones A., Montanarella L., Marmo L., Miko L., Ritz K., Peres G., Römbke J., van der Putten W.H. (Ed.; 2010) : *Atlas européen de la biodiversité des sols*. Commission européenne.
- 36 Conseil fédéral (2012) : *Stratégie Biodiversité Suisse*. OFEV (Ed.), Berne.
- 37 Conseil fédéral (2017) : *Plan d'action relatif à la Stratégie Biodiversité Suisse*. OFEV (Ed.), Berne.
- 38 Bardgett R.D., van der Putten W.H. (2014) : *Belowground biodiversity and ecosystem functioning*. Nature 515, 505–511. doi:10.1038/nature13855
- 39 Office de de l'environnement du canton Argovie (2015) : « *Jahr des Bodens 2015* ». UMWELT AARGAU, Sondernummer 45. Aarau.
- 40 Office des paysages et de la nature (OPN) du canton de Zurich (2012) : *Massnahmenplan Bodenschutz*. Zurich.
- 41 Office de l'environnement et de l'énergie (OEE) du canton de Saint-Gall (2014) : *Kantonale Bodenüberwachung St. Gallen – Konzept 2015*. Saint-Gall, page 29.
- 42 Office de la protection de l'environnement et de l'énergie de Bâle-Campagne (1999) : *Integration des Bodenschutzes in die Raumplanung*. Liestal.
- 43 Direction des travaux publics du canton de Zurich, Office des paysages et de la nature. www.maps.zh.ch
- 44 Conseil fédéral (2016) : *Stratégie pour le développement durable 2016–2019*, 27. janvier 2016. ARE (Ed.).
- 45 Plate-forme nationale «Dangers naturels» (PLANAT) (2002) : *Sécurité contre les dangers – Concept et Stratégie*. www.planat.ch/fr
- 46 Brunner J., Jäggi F., Nievergelt J., Peyer K. (1997) : *Cartographie et estimation des sols agricoles* (résumé en français). Station fédérale de recherche en agroécologie et agriculture (FAL, Ed.), SR Nr. 24., Reckenholz, Zurich.
- 47 Sticher H. (2001) : *Bodenkunde und Bodenkundler in der Schweiz 1855–1962*. Société suisse de pédologie (Ed.), Document 11, Dietikon.
- 48 Viscarra Rossel R.A., Behrens T., Ben-Dor E., Brown D.J., Demattê J.A.M., Shepherd K.D., Shi Z., Stenberg B., Stevens A., Adamchuk A., Aichi H., Barthès B.G., Bartholomeus H.M., Bayer A.D., Böttcher K., Brodský L., Du C.W., Ji W. (2016) : *A global spectral library to characterize the world's soil*. Earth-Sci. Rev. 155, 198–230. <http://dx.doi.org/10.1016/j.earscirev>
- 49 Viscarra Rossel R.A., Webster R. (2012) : *Predicting soil properties from the Australian soil visible-near infrared spectroscopic database*. Eur. J. Soil Sci. 63, 848–860.
- 50 Carizzoni M., Cavelti G., Hurst T., Zürrer M. (2017) : *Konzept für ein flächendeckendes Bodeninformationssystem*. Sur mandat de l'OFEV. BHP Brugger und Partner, Zurich.
- 51 Leitgeb E., Reiter R., Englisch M., Lüscher P., Schad P., Feger K.H. (2013) : *Waldböden: Ein Bildatlas der wichtigsten Bodentypen aus Österreich, Deutschland und der Schweiz*. Wiley-vch Verlag, Weinheim.
- 52 Ruff A., Peyer K. (1996) : *Handbuch Waldbodenkartierung*. OFEFP, L'environnement pratique, Berne.
- 53 Société suisse de pédologie (ssp; Ed.) (2008) : *Classification des sols de Suisse*.

- 54 Ad-hoc-Arbeitsgruppe Boden (2005): *Bodenkundliche Kartieranleitung*. KA5. Ed.: Institut fédéral des Géosciences et des Ressources naturelles, Staatliche Geologische Dienste, 5^e édition, Hannover.
- 55 *Carte pédologique de Soleure*. <https://geoweb.so.ch/map/isboden>; © Office de l'environnement du canton de Soleure, service Sol, Soleure.
- 56 Nussbaum M., Spiess K., Baltensweiler A., Grob U., Keller A., Greiner L., Schaepman M.E., Papritz A. (2017): *Evaluation of digital soil mapping approaches with large sets of environmental covariates*. Soil Discussions, 1–32, 10.5194/soil-2017-14, <https://www.soil-discuss.net/soil-2017-14>.
- 57 Nussbaum M., Walther L., Fraefel M., Greiner L., Papritz A. (2017): *Mapping of soil properties at high resolution in Switzerland using boosted geosadditive models*. Soil Discussions, 1–32, 10.5194/soil-2017-13, <https://www.soil-discuss.net/soil-2017-13>.
- 58 Behrens T., Scholten T. (2006): *Digital Soil Mapping in Germany – a review*. Journal of Plant Nutrition and Soil Science 169, 434–443. <https://doi.org/10.1002/jpln.200521962>
- 59 Pazeller A., Rued A., Petrusek M. (2004): *Sichere und benutzerfreundliche Archivierung von Bodenprofil- und Bohrdaten*. Projet Infosol Suisse PIS-CH – Sous-projet 1. Société suisse de pédologie (SSP; Ed.) sur mandat de l'OFEPF.
- 60 Knecht M. (2004): *Bodeninformation Schweiz BI-CH. Schlussbericht 2003*. Société suisse de pédologie (SSP; Ed.) sur mandat de l'OFEPF.
- 61 Grob U., Rued A., Zihlmann U., Klausner L., Keller A. (2015): *Agroscope-Bodendaten-archiv. Bodendaten aus Bodenkartierungen 1953–1996*. Agroscope Science 14. www.nabodat.ch
- 62 www.nabodat.ch
- 63 Rehbein K., Grob U., Klausner L., Keller A. (2017): *Système national d'information pédologique NABODAT – Modèle de données NABODAT, version 1.5*, Agroscope, Centre de services NABODAT, Zurich. www.nabodat.ch
- 64 Vökt U., Pazeller A. (2002): *Bodeneignungskarte der Schweiz 1:200 000 – Qualität und Aussagekraft der Archivadokumente*. SSP (Ed.). www.bgr.bund.de/DE/Themen/Boden (uniquement en allemand et en anglais)
- 65 Walther L., Bridler L., Keller A., Lussi M., Grob U. (2017): *Harmonisierung von Bodendaten*, dans le cadre du projet « Cartographie des propriétés du sol pour une évaluation des fonctions du sol à l'échelle régionale (PMSoil) » du PNR 68. EPF Zurich. <http://dx.doi.org/10.3929/ethz-a-010801994>.
- 67 Grob U., Rehbein K., Keller A. (2018): *Stand der Bodenkartierung in der Schweiz: Informationsplattform und Metadatenkatalog*. Agroscope, Zurich. www.nabodat.ch/index.php/fr/
- 68 Senn D. (2015): *Vision vom lückenlosen Bodenmessnetz*. Magazin Schweizer Landtechnik, 46–51.
- 69 Stehrenberger E., Huguenin-Landl B. (2016): *Evaluation der Bodenfeuchtemessnetze. Bestehende Messnetze, Erwartungen der Nutzer und Anforderungen an ein ideales Bodenfeuchtemessnetz*. Sur mandat de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV).
- 70 Mösch D., Liener C. (2015): *Bodendaten sind wichtig für die Hochwasserprognose*. Umwelt Aargau, Sondernummer 45, 34–36.
- 71 Gubler A., Schwab P., Wächter D., Meuli R.G., Keller A. (2015): *Observatoire national des sols (NABO) de 1985 à 2009*. Etat et évolution des polluants inorganiques et des paramètres associés aux sols. Office fédéral de l'environnement, Berne. Etat de l'environnement 1507.

- 72 Desauls A., Dahinden R. (2000): *Réseau national d'observation des sols – Variations des teneurs en polluants après 5 et 10 ans de suivi. Périodes de mesures 1985–1991 et 1992–1997*. OFEV, Série: Cahier de l'environnement, 320, Berne.
- 73 Schaub M., Dobbertin M., Kräuchi N., Kaennel Dobbertin M. (2011): *Preface – long-term ecosystem research: understanding the present to shape the future*. Environ. Monit. Assess. 174, 1–2.
- 74 Braun S., Belyazid S., Burger T., Stocker R., Kurz D., Remund J., Rihm B. (2015): *Erfassung und Behandlung gefährdeter Waldstandorte. Bericht 2006–2014*. Office fédéral de l'environnement (OFEV).
- 75 Office fédéral de l'agriculture (OFAG) (2014): *Rapport agricole 2014*. www.agrarbericht.ch/fr
- 76 Hämman M., Desauls A. (2003): *Prélèvements et préparation d'échantillons de sols pour l'analyse de substances polluantes*. OFEV, VU-4814-F, Berne.
- 77 Nussbaum M., Aregger K., Burgos S., Keller A., Papritz A. (2018): *Übersicht der Bodeninformationssysteme und der Bodenkartieraktivitäten in Europa im Hinblick auf die Bodenkartierung in der Schweiz*. Etude focalisée SYSTÈMES D'INFORMATION DU SOL du PNR 68.
- 78 Jones R.J.A., Houšková B., Bullock P., Montanarella L. (2005): *Soil Resources of Europe*, seconde édition, Institute for Environment & Sustainability, JRC Ispra.
- 79 Umweltbundesamt (Ed.; 2012): *Bodendaten in Deutschland: Übersicht über die wichtigsten Mess- und Erhebungsaktivitäten für Böden*. www.umweltbundesamt.de/publikationen
- 80 Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) (2015): *Status of the World's Soil Resources (swsr) – Main Report*.
- 81 Omuto C., Nachtergaele F., Vargas Rojas R. (2012): *State of the Art Report on Global and Regional Soil Information: Where are we? Where to go? Global Soil Partnership technical report*. FAO (Ed.), Rome.
- 82 Hartemink A.E., Krasilnikov P., Bockheim J. (2013): *Soil maps of the world*. Geoderma 207/208, 256–267.
- 83 Hengl T., de Jesus J.M., MacMillan R.A., Batjes N.H., Heuvelink G.B.M., Ribeiro E., Samuel-Rosa A., Kempen B., Leenaars J.G.B., Ruiperez Gonzalez M. (2014): *Soil Grids 1 km – Global Soil Information Based on Automated Mapping*. PLOS ONE 9 (8), e105992.
- 84 Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), IIASA, ISRIC, ISS-CAS, JRC (2012): *Harmonized World Soil Database (version 1.2)*. FAO, Rome.
- 85 Ribeiro E., Batjes N.H., Leenaars J.G.B., Van Oostrum A.J.M., Mendes de Jesus J. (2015): *Towards the standardization and harmonization of world soil data: Procedures Manual ISRIC World Soil Information Service (WoSIS version 2.0)*. ISRIC – World Soil Information, Wageningen. http://www.isric.org/sites/default/files/isric_report_2015_03.pdf
- 86 Sanchez P.A., Ahamed S., Carré F., Hartemink A.E., Hempel J. (2009): *Digital Soil Map of the World*. Science 325, 680–681.
- 87 Arrouays D., McBratney A.B., Minasny B., Hempel J.W., Heuvelink G.B.M., MacMillan R.A., Hartemink A.E., Lagacherie P., McKenzie, N.J. (2014): *The GlobalSoilMap project specifications*. GlobalSoilMap Basis of the global spatial soil information system 9–12, CRC Press.

- 88 Panagos P, Van Liedekerke M., Jones A., Montanarella L. (2012) : *European Soil Data Centre: Response to European policy support and public data requirements*. Land Use Policy 29 (2), 329–338, doi:10.1016/j.landusepol.2011.07.003.
- 89 Latham J., Cumani R., Rosati I., Bloise M. (2014) : *Global Land Cover SHARE (GLC-SHARE)*. Database Beta-Release Version 1.0.
- 90 Pimentel D., Burgess M. (2013) : *Soil Erosion Threatens Food Production*. Agriculture 3, 443–463; doi:10.3390/agriculture3030443.
- 91 Nkonya E., Mirzabaev A., von Braun J. (Ed.) (2016) : *Economics of Land Degradation and Improvement – A Global Assessment for Sustainable Development*. Springer-Verlag, doi 10.1007/978-3-319-19168-3.
- 92 Bouma J. (2009) : *Soils are back on the global agenda: Now what?* Geoderma 150, 224–225.
- 93 Daily G.C., Polasky S., Goldstein J., Kareiva P.M., Mooney H.A., Pejchar L., Shallenberger R. (2009) : *Ecosystem services in decision making: time to deliver*. Frontiers in Ecology and the Environment 7 (1), 21–28.
- 94 Baveye P.C. (2017) : *Quantification of ecosystem services: beyond all the guesstimates, how do we get real data?* Ecosystem Services 24, 47–49.
- 95 Naturkapital Deutschland – TEEB (2012) : *Der Wert der Natur für Wirtschaft und Gesellschaft – eine Einführung*. München, ifuplan; Leipzig, Helmholtz Zentrum für Umweltforschung – UFZ Bonn; Bundesamt für Naturschutz, Bonn.
- 96 Bouma J. (2014) : *Soil science contributions towards Sustainable Development Goals and their implementation: linking soil functions with ecosystem services*. Journal of Plant Nutrition and Soil Science 177 (2), 111–120.
- 97 Herrick J.E. (2000) : *Soil quality: an indicator of sustainable land management?* Applied Soil Ecology 15 (2000), 75–83.
- 98 Wienhold B.J., Andrews S.S., Karlen D.L. (2004) : *Soil quality: a review of the science and experiences in the USA*. Environmental Geochemistry and Health 26, 89–95.
- 99 Karlen D.L., Mausbach M.J., Doran J.W., Cline R.G., Harris R.F., Schuman G.E. (1997) : *Soil Quality: A Concept, Definition, and Framework for Evaluation (Guest Editorial)*. Soil Science Society of America Journal 61, 4–10.
- 100 McBratney A., Field D.J., Koch A. (2014) : *The dimensions of soil security*. Geoderma 213, 203–213. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.08.013>.
- 101 Patzel N., Sticher H., Karlen D. (2000) : *Soil fertility – Phenomenon and Concept*. Journal of Plant Nutrition and Soil Science 163, 129–142.
- 102 Office fédéral de l’environnement, des forêts et du paysage (OFEFP) (1991) : *Wegleitung zur Beurteilung der Bodenfruchtbarkeit*. OFEFP, Berne.
- 103 Häberli R., Lüscher C., Chastonay B.P., Wyss C. (1991) : *L’affaire SOL – Pour une utilisation raisonnée du sol*. Rapport final du Programme national de recherche « Utilisation du sol en Suisse » (PNR 22), Editions Georg, Genève.
- 104 Greiner L., Schwab P., Zimmermann S., Nussbaum M., Papritz A., Keller A. (2016) : *Bodenfunktionen bewerten: Anwendungsbeispiele Wasserhaushalt und Landwirtschaft*. BGS-Bulletin 37, 17–23.
- 105 Greiner L., Keller A. (2015) : *Indexpunkte gegen den Landverbrauch*. TEC21 Schweizerische Bauzeitung 41, 24–26.
- 106 Vereecken H., Schnepf A., Hopmans J.W., Javaux M., Or D., Roose T., Vanderborght J., Young M.H., Amelung W., Aitkenhead M., Allison S.D., Assouline S., Baveye P., Berli M., Brüggemann N., Finke P., Flury M., Gaiser T., Govers G., Ghezzehei T., Hallett P.,

- Hendricks Franssen H.J., Heppell J., Horn R., Huisman J.A., Jacques D., Jonard F., Kollet S., Lafolie F., Lamorski K., Leitner D., McBratney A., Minasny B., Montzka C., Nowak W., Pachepsky Y., Padarian J., Romano N., Roth K., Rothfuss Y., Rowe E.C., Schwen A., Šimůnek J., Tiktak A., Van Dam J., van der Zee S.E.A.T.M., Vogel H.J., Vrugt J.A., Wöhling T., Young I.M. (2016) : *Modeling soil processes: review, key challenges, and new perspectives*. *Vadose Zone Journal* 15 (5), 32–88. <http://dx.doi.org/10.2136/vzj2015.09.0131>.
- 107 Bayerisches Geologisches Landesamt (2003) : *Das Schutzgut Boden in der Planung. Bewertung natürlicher Bodenfunktionen und Umsetzung in Planungs- und Genehmigungsverfahren*. Augsburg.
- 108 Ad-hoc AG Boden des Bund/Länder-Ausschusses Bodenforschung (BLA-GEO) (2007) : *Methodenkatalog zur Bewertung natürlicher Bodenfunktionen, der Archivfunktion des Bodens, der Nutzungsfunktion « Rohstofflagerstätte » nach BBodSchG sowie der Empfindlichkeit des Bodens gegenüber Erosion und Verdichtung*.
- 109 Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (1995) : *Bewertung von Böden nach ihrer Leistungsfähigkeit. Leitfaden für Planungen und Gestattungsverfahren*. Karlsruhe.
- 110 Lehmann A., David S., Stahr K. (2013) : *Eine Methode zur Bewertung natürlicher und anthropogener Böden*. Hohenheimer Bodenkundliche Hefte 86.
- 111 Müller U. (2004) : *Auswertungsmethoden im Bodenschutz*. Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung (NLFb), Arbeitshefte Boden, 2004/2. Hannover.
- 112 Brunner H., Jäggi F., Nievergelt J., Peyer K. (1997) : *Kartieren und Beurteilen von Landwirtschaftsböden*. Station fédérale de recherches en agroécologie et agriculture (FAL), Zurich Reckenholz.
- 113 Gröngroft A., Hochfeld B., Miehlich G. (2001) : *Funktionale Bewertung von Böden bei grossmassstäbigen Planungsprozessen – Bewertungsverfahren*. Institut für Bodenkunde, Université de Hambourg.
- 114 Ruef A., Peyer K. (1996) : *L'environnement pratique: Manuel Cartographie des sols forestiers*. OFEF, Berne.
- 115 Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (2010) : *Bewertung von Böden nach ihrer Leistungsfähigkeit. Leitfaden für Planungen und Gestattungsverfahren*. Karlsruhe.
- 116 Bayerisches Geologisches Landesamt und Bayerisches Landesamt für Umweltschutz (2003) : *Das Schutzgut Boden in der Planung. Bewertung natürlicher Bodenfunktionen und Umsetzung in Planungs- und Genehmigungsverfahren*. Munich et Augsburg.
- 117 Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau (DVWK) (1988) : *Filtereigenschaften des Bodens gegenüber Schadstoffen. Teil I: Beurteilung der Fähigkeit von Böden, zugeführte Schwermetalle zu immobilisieren. Merkblätter zur Wasserwirtschaft*.
- 118 Litz N. (1998) : *Schutz vor Organika*. Blume H.-P. (Ed.) : *Handbuch der Bodenkunde*, point 7.6.6. Landsberg.
- 119 Litz N., Blume H. (1989) : *Verhalten organischer Chemikalien in Böden und dessen Abschätzung nach einer Kontamination*. *Zeitschrift für Kulturtechnik und Landentwicklung* 30, 355–364.
- 120 Mosimann T. (1999) : *Integration des Bodenschutzes in die Raumplanung. Ziele, Konzept und Methodik zur Bestimmung besonders schutzwürdiger Bodenflächen am Beispiel des Kantons Basel-Landschaft*.
- 121 Gemeinsame Arbeitsgruppe des Fachbeirats für Bodenfruchtbarkeit und Bodenschutz im Lebensministerium und des Österreichischen Normungsinstituts (2013) : *Bodenfunk-*

- tionsbewertung: *Methodische Umsetzung der öNORM L 1076*. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Vienne.
- 122 Gerdes H., Naumann S., Landgrebe R., Stupak N. (2010): *Ökonomische Bewertung der ökologischen Funktionen von Böden*. Institut écologique, Berlin. www.ecologic.eu
- 123 Griffiths B.S., Römbke J., Schmelz R.M., Scheffczyk A., Faber J.H., Bloem J., Pérès G., Cluzeau D., Chabbi A., Suhadolc M., Sousa J.P., Martins Da Silva P., Carvalho F., Mendes S., Morais P., Francisco R., Pereira C., Bonkowski M., Geisen S., Bardgett R.D., De Vries F.T., Bolger T., Dirilgen T., Schmidt O., Winding A., Hendriksen N.B., Johansen A., Philippot L., Plassart P., Bru D., Thomson B., Griffiths R.I., Bailey M.J., Keith A., Rutgers M., Mulder C., Hannula S.E., Creamer R., Stone D. (2016): *Selecting cost effective and policy-relevant biological indicators for European monitoring of soil biodiversity and ecosystem function*. *Ecological Indicators* 69, 213–223.
- 124 Feldwisch N., Neite H., Düntgen J. (2011): *Grundlagen und Anwendungsbeispiele von Bodenfunktionskarten in Nordrhein-Westfalen*. *Bodenschutz* 2/11, 37–45.
- 125 *Gesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen und zur Sanierung von Altlasten* (loi fédérale allemande sur la protection des sols – BBodSchG).
- 126 Calzolari C., Ungaro F., Filippi N., Guermandi M., Malucelli F., Marchi N., Staffilani F., Tarocco P. (2016): *A methodological framework to assess the multiple contributions of soils to ecosystem services delivery at regional scale*. *Geoderma* 261, 190–203.
- 127 Dominati E., Mackay A., Green S., Patterson M. (2014): *A soil change-based methodology for the quantification and valuation of ecosystem services from agro-ecosystems: A case study of pastoral agriculture in New Zealand*. *Ecological Economics* 100, 119–129.
- 128 Schulte R.P.O., Creamer R.E., Donnellan T., Farrelly N., Fealy R., O'Donoghue C., O'Huallachain D. (2014): *Functional land management: A framework for managing soil-based ecosystem services for the sustainable intensification of agriculture*. *Environmental Science & Policy* 38, 45–58.
- 129 Rutgers M., van Wijnen H.J., Schouten A.J., Mulder C., Kuiten A.M.P., Brussaard C.L., Breure A.M. (2012): *A method to assess ecosystem services developed from soil attributes with stakeholders and data of four arable farms*. *Science of the Total Environment* 415, 39–48.
- 130 Robinson D.A., Hockley N., Cooper D.M., Emmett B.A., Keith A.M., Lebron I., Reynolds B., Tipping E., Tye A.M., Watts C.W., Whalley W.R., Black H.I., Warren G.P., Robinson J.S. (2013): *Natural capital and ecosystem services, developing an appropriate soils framework as a basis for valuation*. *Soil Biology and Biochemistry* 57, 1023–1033.
- 131 Toth G., Gardi C., Bódis K., Ivits É., Aksoy E., Jones A., Jeffrey S., Petursdottir T., Montanarella L. (2013): *Continental-scale assessment of provisioning soil functions in Europe*. *Ecological Processes* 2 (32).
- 132 Miller R. (2012): *Bodenfunktionsbewertung für die Raum- und Bauleitplanung in Hessen und Rheinland-Pfalz. Methoden zur Klassifizierung und Bewertung von Bodenfunktionen*. Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie. Wiesbaden. www.hlug.de
- 133 Gemeinsame Arbeitsgruppe des Fachbeirats für Bodenfruchtbarkeit und Bodenschutz im Lebensministerium und des Österreichischen Normungsinstituts (2012): *Bodenfunktionsbewertung – Grundlagen und Erläuterungen zur öNORM L 1076*. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Vienne.

- 134 Geitner C., Tusch M., Stötter J. (2005) : *Abschlussbericht: Bodenkartierung zur Bewertung der Bodenfunktionen im Gemeindegebiet von Wörgl (Tyrol)*. Institut für Geographie, Universität d'Innsbruck.
- 135 Knoll A., Sutor G., Huber G., Kübler B. (2010) : « *Pilotprojekt Boden* ». *Bewertung von Bodenfunktionen in Planungsverfahren*. Land Oberösterreich, Direktion Umwelt und Wasserwirtschaft, Abteilung Umweltschutz.
- 136 Haslmayr H.P., Gerzabek M.H. (2010) : *Bewertung der Bodenfunktionen landwirtschaftlicher Böden auf Basis der österreichischen Datengrundlagen*. *Die Bodenkultur* 61(2), 19–34.
- 137 Jäggi F., Peyer K., Pazeller A., Schwab P. (1999) : *Grundlagenbericht zur Bodenkartierung des Kantons Zürich – Landwirtschaftsareal*. Amt für Landschaft und Natur Kanton Zürich, Fachstelle Bodenschutz, Zurich.
- 138 Vereinigung für Strukturverbesserungen und Agrarkredite (vsvak) (2004) : *Estimation de la valeur des terres cultivées et des surfaces proches de l'état naturel lors de remembrements*. Office fédéral de l'agriculture (OFAG).
- 139 Teepe R., Dilling H., Beese F. (2003) : *Estimating water retention curves of forest soils from soil texture and bulk density*. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 166, 111–119.
- 140 Walthert L., Zimmermann S., Blaser P. (2004) : *Waldböden der Schweiz. Band 1. Grundlagen und Region Jura*. Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage (wsl), Hep-Verlag, Berne.
- 141 Blaser P., Walthert L., Zimmermann S., Graf Pannatier E., Luster J. (2008) : *Classification schemes for the acidity, base saturation, and acidification status of forest soils in Switzerland*. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 171, 163–170.
- 142 Bouma J., Broll G., Crane T.A., Dewitte O., Gardi C., Schulte R., Towers W. (2012) : *Soil information in support of policy making and awareness raising*. *Current Opinion in Environmental Sustainability* 4, 552–558.
- 143 McBratney A.B., Minasny B., Cattle S.R., Vervoort R. (2002) : *From pedotransfer functions to soil inference systems*. *Geoderma* 109, 1–2, 41–73.
- 144 Greiner L., Nussbaum M., Papritz A., Fraefel M., Zimmermann S., Schwab P., Grêt-Regamey A., Keller A. (2018) : *Assessment of soil multi-functionality to support the sustainable use of soil resources on the Swiss Plateau*. *Geoderma regional* 14. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2018.e00181>
- 145 Feldwisch N., Balla S. (2007) : *Orientierungsrahmen zur zusammenfassenden Bewertung von Bodenfunktionen*. *Bodenschutz* 1 (07), 15–19.
- 146 Grêt-Regamey A., Sirén E., Brunner S.H., Weibel B. (2017) : *Review of decision support tools to operationalize the ecosystem services concept*. *Ecosystem Services*, 26 Part B, 306–315.
- 147 Adhikari K., Hartemink A. (2016) : *Linking soils to ecosystem services – A global review*. *Geoderma* 262, 101–111.
- 148 Haygarth P., Ritz K. (2009) : *The future of soils and land use in the UK: Soil systems for the provision of land-based ecosystem services*. *Land Use Policy* 26, Supplement 1, 187–197.
- 149 Robinson D.A., Hockley N., Cooper D.M., Emmett B.A., Keith A.M., Lebron I., Reynolds B., Tipping E., Tye A.M., Watts C.W., Whalley W.R., Black H.I.J., Warren G.P., Robinson J.S., Cooper D.M., Emmett B.A., Keith A.M., Lebron I., Reynolds B., Tipping E., Tye A.M., Watts C.W., Whalley W.R., Black H.I.J., Warren G.P., Robinson J.S. (2013) : *Natural capital*

- and ecosystem services, developing an appropriate soils framework as a basis for valuation. Soil Biology and Biochemistry* 57, 1023–1033.
- 150 Planteam AG Boden + Landwirtschaft Vogt (2013) : *Sachplan Fruchtfolgeflächen – Bericht zum Stand der Umsetzung des Sachplanes*. Rapport à l'intention de l'Office fédéral du développement territorial (ARE). Berne.
- 151 Office fédéral du développement territorial (ARE) (2006) : *Plan sectoriel des surfaces d'assolement – Aide à la mise en œuvre*. Berne.
- 152 Office fédéral du développement territorial (ARE) (2015) : *Plan sectoriel des surfaces d'assolement – agrarpédologique Analyse*. myx GmbH, Uster.
- 153 Contrôle parlementaire de l'administration (2015) : *Maintien de la superficie des terres cultivables*. Rapport à l'intention de la Commission de gestion du Conseil national. Berne
- 154 Commission de gestion du Conseil national (2015) : *Maintien de la superficie des terres cultivables*.
- 155 Weisskopf P., Schwab P., Jäggli F., Kramer E., Peyer K., Studer R. (1988) : *Die Verdichtungsgefährdung schweizerischer Ackerböden*. Rapport 20 du PNR 22, Liebefeld-Berne.
- 156 Office fédéral de l'environnement (OFEV) (2017) : *Sols suisses – Etat et évolution – 2017*. Etat de l'environnement UZ 1721.
- 157 Charles R., Wendling M., Burgos S. (2018) : *Sol et production alimentaire*. Synthèse thématique ST1 du Programme national de recherche « Utilisation durable de la ressource sol » (PNR 68), Berne.
- 158 Hagedorn F., Krause H.-M., Studer M., Schellenberger A., Gättinger A. (2018) : *Sol et environnement. Matière organique du sol, émissions de gaz à effet de serre et atteintes physiques des sols suisses*. Synthèse thématique ST2 du Programme national de recherche « Utilisation durable de la ressource sol » (PNR 68), Berne.
- 159 Keller T., Colombi T., Ruiz S., Manalili M.P., Rek J., Stadelmann V., Wunderli H., Breitenstein D., Reiser R., Oberholzer H.R., Schymanski S., Romero-Ruiz A., Linde N., Weisskopf P., Walter A., Or D. (2017) : *Long-term soil structure observatory for monitoring post-compaction evolution of soil structure*. *Vadose Zone Journal* 16 (4), 1–16.
- 160 Alder S., Herweg K., Liniger H., Prasuhn V. (2013) : *Technisch-wissenschaftlicher Bericht zur Gewässeranschlusskarte der Erosionsrisikokarte der Schweiz (ERK2) im 2 × 2-Meter-Raster*. Ed.: Université de Berne et station de recherche Agroscope de Reckenholz-Tänikon (ART), Berne et Zurich.
- 161 Alder S., Prasuhn V., Liniger H.P., Herweg K., Hurni H., Candinas A., Gujer H.U. (2015) : *A high-resolution map of direct and indirect connectivity of erosion risk areas to surface waters in Switzerland – A risk assessment tool for planning and policy-making*. *Land Use Policy* 48, 236–249.
- 162 Bader C., Müller M., Schulin R., Leifeld J. (2017) : *Amount and stability of recent and aged plant residues in degrading peatland soils*. *Soil Biology & Biochemistry* 109, 167–175.
- 163 Johannes A., Matter A., Schulin R., Weisskopf P., Boivin P. (2017) : *Optimal organic carbon values for soil structure quality of arable soils. Does clay content matter?* *Geoderma* 302, 14–21.
- 164 Johannes A., Weisskopf P., Schulin R., Boivin P. (2017) : *To what extent do physical measurements match with visual evaluation of soil structure?* *Soil and Tillage Research* 173, 24–32. <https://doi.org/10.1016/j.still.2016.06.001>
- 165 Della Peruta R., Keller A. (2016) : *A regional modelling tool to assess the risk of accumulation of nutrients, trace metals and pesticides in agricultural soils*. *BGS-Bulletin* 37, 9–15.

- 166 Gómez Giménez M., de Jong R., Della Peruta R., Keller A., Schaepman M. (2017) :
*Determination of grassland use intensity based on multi-temporal remote sensing data and
ecological indicators*. Remote Sensing of Environment 198, 126–139.
- 167 Stumpf F., Keller A., Schmidt K., Mayr A., Gubler A., Schaepman M. (2018) :
Spatio-temporal land use dynamics and soil organic carbon in Swiss agroecosystems.
In: Agroecosystems, Ecosystems & Environment 258, 129–142.
- 168 Hürdler J., Prasuhn V., Spiess E. (2015) : *Abschätzung diffuser Stickstoff- und Phosphor-
einträge in die Gewässer der Schweiz mit « MODIFFUS 3.0 »*. Rapport sur mandat de l'OFEV.
Agroscope, Zurich.
- 169 Prasuhn V., Kupferschmid P., Spiess E., Hürdler J. (2016) : *Szenario-Berechnungen für das
Projekt zur Verminderung diffuser Nährstoffeinträge in die Gewässer der Schweiz mit
« MODIFFUS »* : Rapport sur mandat de l'OFEV. Agroscope, Zurich.
- 170 Tobias S. (2012) : *Brainstorming « Zukunft Bodeninformation Schweiz »*. Rapport de
clôture du projet. wsl.
- 171 Behrens T., Scholten T. (2006) : *Digital Soil Mapping in Germany – a review*. Journal of
Plant Nutrition and Soil Science 169, 434–443.
- 172 McBratney A.B., Mendonca-Santos M.L., Minasny B. (2003) : *On digital soil mapping*.
Geoderma 117, 3–52.
- 173 Brevik E., Baumgarten A., Calzolari C., Miller B., Jordan A., Pereira P., Kabala C. (2016) :
Soil mapping, classification, and pedologic modeling: History and future directions.
Geoderma 264, Part B, 256–274.
- 174 Behrens T., Schmidt K., Keller A. (2017) : *Factsheet Digital Soil Mapping*. Sur mandat
de l'OFEV. www.nabo.ch
- 175 Nussbaum M. (2017) : *Digital Soil Mapping for Switzerland, Evaluation of Statistical
Approaches and Mapping of Soil Properties*. Thèse, EPF Zurich.
- 176 Nussbaum M., Spiess K., Baltensweiler A., Grob U., Keller A., Greiner L., Schaepman
M.E., Papritz A. (2017) : *Evaluation of digital soil mapping approaches with large sets of
environmental covariates*. Soil Discussions, 1–32.
- 177 Mulder V.L., de Bruin S., Schaepman M.E., Mayr T.R. (2011) : *The use of remote sensing
in soil and terrain mapping – A review*. Geoderma 162, 1–19.
- 178 Wulf H., Mulder T., Schaepman M., Keller A., Jörg P. (2015) : *Remote Sensing of Soils*.
Universität de Zurich, Laboratoires de télédétection, Zurich.
- 179 Heggemann T., Welp G., Amelung W., Angst G., Franz S., Koszinski S., Schmidt K.,
Pätzold S. (2017) : *Proximal gamma-ray spectrometry for site-independent in situ predic-
tion of soil texture on ten heterogeneous fields in Germany using support vector machines*.
Soil and Tillage Research 168, 99–109. <https://doi.org/10.1016/j.still.2016.10.008>
- 180 Ben-Dor E., Granot A., Notesco G. (2017) : *A simple apparatus to measure soil spectral
information in the field under stable conditions*. Geoderma 306, 73–80.
- 181 Towett E.K., Shepherd K.D., Cadisch G. (2013) : *Quantification of total element concen-
trations in soils using total X-ray fluorescence spectroscopy (TXRF)*. Science of the Total
Environment, 463–464, 374–388.
- 182 Wittmer H., Gundimeda H. (Ed.) (2012) : *The Economics of Ecosystems and Biodiversity
in Local and Regional Policy*. Earthscan, Londres.
- 183 Fromm O., Brüggemann R. (1999) : *Ökonomische Ansätze zur Ökosystembewertung am
Beispiel des Bodens*. Zeitschrift für Umweltchemie und Ökotoxikologie 11 (2), 119–124.

- 184 Fromm O., Brüggemann R. (1999) : *Verfahren zur Monetarisierung von Ökosystemleistungen*. Zeitschrift für Umweltchemie und Ökotoxikologie 11 (3), 177–179.
- 185 Pimentel D., Harvey C., Resosudarmo P., Sinclair K., Kurz D., McNair M., Crist S., Shpritz L., Fitton L., Saffouri R., Blair R. (1995) : *Environmental and economic costs of soil erosion and conservation benefits*. Science 267 (5201), 1117–1123.
- 186 Gerdes H., Naumann S., Landgrebe R., Stupak N. (2010) : *Ökonomische Bewertung der ökologischen Funktionen von Böden. 1. Projektphase: Auswertung der Literatur- und Datenlage*. Institut écologique, Berlin.
- 187 Gambarelli G. (2013) : *A framework for the economic evaluation of soil functions. Background paper to the Swiss Soil Strategy*. Rapport sur mandat de l'OFEV.
- 188 Ruh H., Brugger F., Schenk C. (1990) : *Ethik und Boden*. PNR 22, rapport 52, Liebefeld-Berne.
- 189 Sticher H. (1991) : *Schutz der natürlichen Ressourcen – das Beispiel Boden*. Vierteljahresschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich, 136 (3), 137–149.
- 190 Keller A., Franzen J., Knüsel P., Papritz A., Zürrer M. (2018) : *Plateforme d'information des sols suisse: Informations du sol, méthodes et instruments pour une utilisation durable de la ressource sol*. Synthèse thématique du Programme national de recherche «Utilisation durable de la ressource sol» (PNR 68), Berne. Annexe disponible à l'adresse : http://www.nfp68.ch/SiteCollectionDocuments/NFP68_TS4_Anhang.pdf
- 191 Office fédéral de l'environnement (OFEV) (2009) : *Améliorer la protection des eaux souterraines*. OFEV, UD-1003, Berne.
- 192 Heissenhuber A., Haber W., Krämer C. (2015) : *30 Jahre SRU-Sondergutachten – Umweltprobleme in der Landwirtschaft. Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU)*, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit. Texte 28/2015. Umweltbundesamt. Deutschland. Dessau.
- 193 Fuhrer J., Holzkämper A., Klein T., Tendall D., Lehmann N., (2013) : *Wasser und Schweizer Landwirtschaft. Projet AGWAM dans le cadre du PNR 61*. Aqua & Gas 7/8.
- 194 Béguin J., Smola S. (2010) : *Etat des drainages en Suisse. Bilan de l'enquête 2008*. OFAG, Secteur Améliorations foncières..
- 195 Presler J., Carizzoni M., Widmer D. (2010) : *Erfassung von Bodenverdichtung – Beprobungsrunde 2010*. Ed.: Zentralschweizer Umweltdirektionen (ZUDK) – gemeinsame Bodenüberwachung der Zentralschweizer Kantone (KABO-ZCH). Fachstelle Bodenschutz, Umwelt und Energie Kanton Luzern.
- 196 Ledermann T., Herweg K., Liniger H., Schneider F., Hurni H., Prasuhn V. (2008) : *Erosion damage mapping: assessing current soil erosion damage in Switzerland*. Advances in Geocology 39, 263–283.
- 197 Wüst C., Grünig A., Leifeld J. (2015) : *Locating organic soils for the Swiss greenhouse gas inventory*. Agroscope Science, 26.
- 198 Office fédéral de l'environnement (OFEV) (2017) : *Greenhouse Gas Inventory 1990–2015*. National Inventory Report. Berne.
- 199 Office fédéral des routes (OFROU) (2014) : *SABA-Projekte – Projektierungsstand*. Berne.
- 200 Office fédéral de l'environnement (OFEV) (2015) : *Le traitement des sites pollués avance à grands pas*. OFEV UZ-1516, Berne.
- 201 Doran J.W., Coleman D.C., Bezdicek D.F., Stewart B.A. (Ed.; 1994) : *Defining Soil Quality for a Sustainable Environment*. Soil Science Society of America and American Society of Agronomy, Special Publication 35.

- 202 Karlen D.L., Mausbach M.J., Doran J.W., Cline R.G., Harris R.F., Schuman G.E. (1997) : *Soil Quality: A Concept, Definition, and Framework for Evaluation*. Soil Science Society of America 61, 4–10.
- 203 *Ordonnance sur la terminologie agricole et la reconnaissance des formes d'exploitation* (Ordonnance sur la terminologie agricole, OTerm) (SR 910.91).
- 204 Office fédéral de l'agriculture (OFAG) (2017) : *Rapport agricole 2017*. www.agrarbericht.ch/fr
- 205 Office fédéral du développement territorial (ARE) (2014) : *Feuilles d'information pour la consultation « Protection des terres agricoles »*. https://www.are.admin.ch/dam/are/fr/dokumente/recht/kulturlandschutz.pdf.download.pdf/protection_des_terresagricoles.pdf; accès: 10.7.2017

Remerciements

Que les nombreuses chercheuses et chercheurs, expertes et experts issus de la pratique ayant collaboré à l'élaboration de la présente synthèse thématique soient ici chaleureusement remerciés pour leur soutien et leur collaboration. Il convient de nommer les membres du comité de direction du PNR 68, le manager du programme et le chargé du transfert de connaissances, les membres du groupe de suivi et du groupe principal, les équipes de recherche des projets du PNR 68 et les responsables des autres synthèses thématiques, ainsi que Madlene Nussbaum, Urs Grob, Lucie Greiner, Felix Stumpf, Thomas Keller, Jens Leifeld, Volker Prasuhn, Urs Zihlmann, Peter Schwab, Anna Hug et de nombreuses autres personnes pour la contribution apportée en matière de rédaction et d'illustration.

Impressum

Auteurs

Armin Keller, Agroscope, Observatoire national des sols (NABO), Zurich
Julia Franzen, Agroscope, Observatoire national des sols (NABO), Zurich
Paul Knüsel, journaliste scientifique RP, Zurich
Andreas Papritz, EPF Zurich, Zurich
Martin Zürcher, myx GmbH, Uster

Elaborée et publiée avec le soutien du Fonds national suisse de la recherche scientifique en tant que synthèse thématique dans le cadre du Programme national de recherche « Utilisation durable de la ressource sol » (PNR 68).

Editeur

Comité de direction du Programme national de recherche « Utilisation durable de la ressource sol » (PNR 68)

Groupe de suivi de la synthèse thématique

David Brugger, Union suisse des paysans (USP), Berne
Prof. Stephane Burgos, Société Suisse de Pédologie (SSP) et Haute école spécialisée bernoise, Zollikofen
Lukas Mathys, Nategra Remote Sensing, Berne
D^{re} Nathalie Dakhel, Prona SA, Yverdon-les-Bains
D^{re} Barbara Gfeller, Service de l'environnement du canton de Fribourg, Fribourg
Olivia Grimm, Office fédéral du développement territorial (ARE), Berne
D^r Rolf Gsponer, Service de protection des sols du canton de Zurich, Zurich
D^r Fabio Wegmann, Section Sols, Office fédéral de l'environnement (OFEV), Berne

Comité de direction du PNR 68

Prof. Emmanuel Frossard, EPF Zurich (Président)
Prof. Claire Chenu, AgroParisTech, France
Prof. Peter de Ruiter, Université d'Amsterdam, Pays-Bas
D^{re} Annette Freibauer, Institut Bavarois pour l'Agriculture, Allemagne
Prof. Bernd Hansjürgens, Centre Helmholtz de recherche environnementale (UFZ), Leipzig, Allemagne
Prof. Lorenz Hurni, EPF Zurich

D^r Michael Obersteiner, Institut international pour l'analyse appliquée des systèmes, Autriche
Prof. Kurt Roth, Université d'Heidelberg, Allemagne

Déléguée du Conseil national de la recherche

Prof. Claudia R. Binder, EPF Lausanne

Représentants de la Confédération

Stephan Scheidegger, Office fédéral du développement territorial (ARE), Berne
D^r Roland von Arx, Office fédéral de l'environnement (OFEV), Berne

Chargé du transfert de connaissances/Rédaction

Urs Steiger, steiger texte konzepte beratung, Lucerne

Manager du programme

D^r Pascal Walther, Fonds national suisse (FNS), Berne

Image de couverture

Nils Nova, Lucerne

Conception graphique et mise en page

Grafikatelier Max Urech, Unterseen

Corrections

Andreas Vonmoos, TERMINUS TEXTKORREKTUR, Lucerne

Traduction

Trad8 Sàrl, Delémont

Impression

Engelberger Druck AG, Stans

Pour ce qui a trait aux résultats de recherche mentionnés, la responsabilité en échoit aux équipes de recherche concernées, pour les synthèses thématiques et les recommandations, la responsabilité incombe aux auteurs concernés ainsi qu'au comité de direction. Leurs conclusions ne doivent pas nécessairement correspondre aux opinions des membres des groupes de suivi, du Fonds national suisse ou des équipes de recherche.

Référence recommandée

Keller A., Franzen J., Knüsel P., Papritz A., Zürrer M. (2018) :
Plateforme d'information des sols suisse (PIS-CH). Synthèse
thématique ST4 du Programme national de recherche
« Utilisation durable de la ressource sol » (PNR 68), Berne.

ISBN: 978-3-907087-35-0

www.fns.ch

www.pnr68.ch

Diffusion : Fonds national suisse, Berne

© 2018, Fonds national suisse de la recherche scientifique. FNS,
Berne

L'ouvrage, y compris l'ensemble des parties qui le composent, est protégé au titre du droit d'auteur. Toute utilisation en dehors des strictes limites de la loi sur le droit d'auteur est interdite sans l'accord de l'éditeur et est passible de poursuites. Cela vaut en particulier pour les reproductions, les traductions, les microfilmages ainsi que la sauvegarde et le traitement dans des systèmes électroniques.

Programme national de recherche « Utilisation durable de la ressource sol » (PNR 68)

Le Programme national de recherche « Utilisation durable de la ressource sol » (PNR 68) établit les bases pour une exploitation durable des sols en Suisse. A cette fin, il convient de prendre en compte les services tant écologiques qu'économiques fournis par le sol. Le concept des services écosystémiques permet de mettre en valeur les fonctions des sols et leur contribution au bien-être humain. Les recherches ont duré de 2013 à 2017. Les résultats sont rassemblés au sein de cinq synthèses thématiques et d'une synthèse globale.

Synthèse thématique ST4

Plateforme d'information des sols suisse (PIS-CH)

La synthèse thématique ST4 du PNR 68 « Plateforme d'information des sols suisse (PIS-CH) » esquisse le concept d'une PIS-CH en tant que plateforme d'information et de services. Elle examine les contenus dont cette plateforme devrait être dotée et les conditions nécessaires à sa mise en place. Elle met en lumière de futures possibilités de développement de la cartographie et indique les étapes à suivre pour créer une plateforme d'information des sols. La mise en place d'une telle PIS-CH doit ce faisant être entendue comme l'œuvre d'une génération. Les investissements nécessaires sont comparés aux bénéfices qui en résulteront pour la société.

Synthèse thématique ST1

Sol et production alimentaire

Synthèse thématique ST2

Sol et environnement

Synthèse thématique ST3

Un agenda du sol pour l'aménagement du territoire

Synthèse thématique ST5

Vers une politique durable des sols