



Résumé analytique à l'intention des groupes cibles

Numéro de projet

406840_143096

Titre

Cartes des sols : Cartographie des propriétés du sol pour une évaluation des fonctions du sol à l'échelle régionale

Responsable du projet

Andreas Papritz, EPF Zurich

Autres responsables du projet

Andri Baltensweiler, Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage WSL
Marco Carizzoni, BABU Sàrl
Armin Keller, Agroscope
Michael E. Schaepman, Université de Zurich
Lorenz Walthert, Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage WSL
Stephan Zimmermann, Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage WSL

Contribution à la synthèse thématique :

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

Lieu et date : Zurich, le 11 septembre 2017

Contexte

Les sols fournissent des services importants à l'être humain, par exemple en retenant les précipitations ou en filtrant l'eau qui sera utilisée comme eau potable. Les sols sont également, et de loin, l'élément le plus important dans la production de nourriture pour l'être humain et les animaux. Ces fonctions dépendent des propriétés des sols. Afin de les préserver à long terme, des connaissances détaillées sur leur structure, leurs propriétés, leur qualité et leur potentiel nutritif, ainsi que leur répartition spatiale, sont nécessaires. C'est ce qui permet la cartographie des sols. A l'heure actuelle, on connaît les propriétés de près d'un tiers des surfaces agricoles suisses, et d'un peu plus d'un dixième de la surface forestière productive du Plateau suisse. Il manque pourtant les informations essentielles à une utilisation durable des sols pour une grande partie du pays.

Pourtant, la majorité de ces données sont disponibles sous une forme ou une autre pour de nombreuses régions. Outre les cartographies, elles proviennent de programmes de surveillance des sols ou d'études sur leur pollution, par exemple, et peuvent être exploitées pour élaborer des cartes de propriétés du sol. Pour ce faire, les données pédologiques disponibles sont mises en relation, par des analyses statistiques (cartographie numérique des sols), avec des variables écologiques choisies. Les variables écologiques caractérisent les facteurs stationnels (climat, topographie, géologie, utilisation du sol) qui jouent un rôle dans la formation du sol. Lorsque les données sur les facteurs stationnels sont disponibles partout, il est possible, dans un deuxième temps, de pronostiquer les propriétés du sol pour n'importe quel point sur la base des relations statistiques entre données pédologiques et variables écologiques. A l'aide de règles d'évaluation, les cartes de propriétés du sol ainsi obtenues peuvent ensuite permettre d'établir des cartes des fonctions du sol (évaluation numérique des sols). Celles-ci montrent où et de quelle manière les sols sont à même de remplir leurs fonctions. Elles représentent une base importante pour l'utilisation durable des sols et leur protection contre la destruction par l'urbanisation.

But

Le projet PNR 68 « Cartes des sols » avait comme objectif principal de développer des méthodes permettant d'établir des cartes des propriétés et des fonctions pédologiques à partir de cartographies et d'évaluations des sols. Les outils ainsi élaborés devaient être testés par des études de cas. Dans le détail, le projet visait les objectifs suivants :

- *Harmonisation des données pédologiques* : développer des procédures pour comparer les données pédologiques provenant de nombreuses sources différentes.
- *Variables écologiques* : traiter des relevés de terrain numériques, afin de caractériser l'influence de la topographie sur les propriétés du sol. Enregistrer des images en haute définition spatiale et spectrale des régions étudiées, dans le but d'obtenir des informations, d'une part de manière directe sur les sols en friche, et d'autre part de manière indirecte, par le rayonnement réfléchi par la végétation présente sur les sols.
- *Modélisation statistique* : développer des modèles pour prévoir les propriétés du sol sur la base d'un nombre minimum de variables écologiques, et vérifier leur plausibilité par les connaissances pédologiques. Appliquer les modèles développés dans les régions d'étude, afin d'élaborer des cartes de propriétés du sol.
- *Evaluation des fonctions du sol* : établir une large palette thématique de fonctions du sol en vue d'un catalogue national, et cartographier les fonctions choisies sur la base des cartes de propriétés du sol développées dans les régions d'étude.

Résultats

Dans le cadre du projet « Cartes des sols », des données pédologiques concernant 16 000 sites des cantons de Berne et de Zurich ont été recueillies et harmonisées. Elles provenaient de cartographies et de programmes de recherche sur les sols forestiers et agricoles, de la surveillance cantonale et de contrôles de polluants. Ces données, relevées au cours de plusieurs décennies, avaient été numérisées avant le début du projet. En tout, 265 000 mesures de laboratoires et 200 000 valeurs estimées recueillies sur le terrain ont été enregistrées dans une base de données. Un schéma à dix échelons a été élaboré pour harmoniser ces valeurs. Un tel processus comporte plusieurs étapes importantes : récolte de méta-informations, enregistrement des données sous une forme unifiée, examen de plausibilité, réglage des valeurs de terrain estimées et des mesures de laboratoire et évaluation des valeurs manquantes sur la base des données à disposition. Les données pédologiques ont été harmonisées sur la base de ce schéma, et préparées pour les analyses statistiques.

Pour les régions des études de cas, l'équipe de projet a calculé sur la base de données altimétriques numériques une série exhaustive d'attributs de terrain tels que déclivité, exposition, courbure, indice d'humidité du sol, etc. En amont, on ne savait pas quelle échelle spatiale serait la plus adaptée. Les attributs de terrain ont donc été calculés avec un lissage variable pour plusieurs résolutions de données altimétriques. L'analyse statistique des données a montré que les attributs de terrain qui avaient été calculés à partir de données altimétriques à haute résolution avec un lissage plus fort se prêtaient en moyenne mieux au pronostic des propriétés du sol.

Pour deux des trois régions d'étude, des images aériennes à haute résolution spatiale et spectrale ont été prises par avion à trois moments différents. Le spectromètre utilisé a enregistré la réflexion de la lumière à la surface du sol dans le domaine visible et infrarouge proche. Pour les deux régions, les images aériennes des trois dates ont été combinées. Un procédé a également été développé pour pondérer l'humidité variable et l'état de surface des sols. Par rapport à une image unique, la combinaison des images permet de presque doubler les surfaces pour lesquelles on dispose d'une information spectrale sur les sols en friche. L'information spectrale provenant des images aériennes a ensuite été reliée aux analyses chimiques et physiques provenant des échantillons de sols des surfaces en friche, et à partir de là, ont été élaborées des cartes de propriétés pour ces sols. Le même procédé a été suivi pour concevoir, à l'aide d'images satellites Landsat, des cartes de propriétés pédologiques pour les sols en friche du Plateau suisse.

Outre les attributs de terrain et les images aériennes hyperspectrales, de nombreuses variables écologiques sur le climat, la géologie, les sols et leur utilisation ont été récoltées - entre 330 et 480 selon les régions étudiées. L'équipe de projet a développé un nouveau procédé statistique permettant d'établir automatiquement, à partir d'un grand nombre de variables écologiques, des modèles prédictifs simples pour les propriétés du sol. Cette approche autorise une interprétation pédologique des relations modélisées. Dans les régions des études de cas, la nouvelle méthode a permis d'élaborer des cartes des propriétés pédologiques essentielles (la teneur en humus, en pierres, en limon et en argile, le pH et d'autres caractéristiques d'acidification du sol, l'humidité du sol, l'importance du volume racinaire, etc.). Etant donné que les propriétés sont parfois très différentes selon la profondeur, des cartes ont été établies pour chaque propriété avec quatre niveaux de profondeur différentes. Cela permet de comprendre plus précisément les modifications des propriétés selon la profondeur, et d'évaluer plus efficacement les fonctions du sol. La précision des cartes des propriétés du sol ainsi obtenues a été vérifiée quantitativement. Par ailleurs, les propriétés pédologiques prédites ont été comparées avec des mesures qui avaient été réservées expressément à cet effet. Le nouveau procédé a été comparé avec cinq méthodes reconnues de modélisation dans les domaines de la géostatistique et de l'apprentissage automatique. Les

différences de qualité de la prédiction entre les six procédés étaient mineures pour la plupart. La « forêt aléatoire », basée sur des arbres de décision, a toutefois donné les prévisions les plus exactes d'une manière générale. C'est une méthode facile d'utilisation, qui permet également d'établir des cartes indiquant la précision des propriétés pédologiques prédites.

Sur la base d'une revue de la littérature, l'équipe de projet a dressé un catalogue de méthodes d'évaluation des fonctions du sol sur les sujets suivants : « régulation des flux d'eau et de substances », « production de biomasse » et « habitat ». L'accent a été mis sur les méthodes d'évaluation statiques qui, parce qu'elles sont peu gourmandes en données, permettent d'intégrer dans la pratique le concept de fonctions pédologiques, dans le domaine de l'aménagement du territoire et des ressources comme dans celui de la protection du sol et de l'environnement. Pour les régions des études de cas, dix méthodes d'évaluation ont été sélectionnées. Les propriétés du sol pour lesquelles des cartes devaient être établies ont été définies. Pour certaines propriétés requises (p.ex. les capacités de conductivité et de stockage de l'eau, la densité du sol, etc.), il n'existait que peu ou pas de données dans les régions d'étude. Les cartes manquantes ont donc été générées par le biais de règles de dérivation, dénommées « fonctions de pédotransfert », sur la base des cartes existantes (voir ci-dessus). L'équipe de projet en a conçu elle-même une partie et en a repris d'autres de la littérature. Les cartes de fonctions du sol élaborées ont montré, par une échelle graduée, dans quelles parties des régions étudiées les fonctions du sol diffèrent dans leur réalisation. Pour des fonctions choisies, la non-fiabilité de l'évaluation a également été quantifiée. En comparant le degré de réalisation avec les données recueillies via les profils de sols, on a vu que l'évaluation des fonctions du sol était plausible d'une manière générale. On a également voulu examiner si les informations fournies par les dix cartes de fonctions du sol pouvaient être réunies en une seule sous forme d'un indice de qualité des sols, ce qui s'est révélé difficile. Les cartes montrant le degré auquel les fonctions sont réalisées ont été utilisées pour une région d'étude du projet PNR 68 « Plate-forme de décision », dans le but de mieux pouvoir intégrer les informations spatiales sur les sols dans l'aménagement du territoire.

Implication pour la recherche

Dans le projet PNR 68 « Cartes des sols », la méthodologie de cartographie et d'évaluation numériques des sols a été perfectionnée sur plusieurs points :

Harmonisation des données pédologiques : La procédure développée permet d'harmoniser les données pédologiques provenant d'études antérieures et de les rendre utilisables pour la cartographie numérique des sols. Grâce à cette harmonisation, la base de données pour la cartographie numérique des propriétés du sol a pu être considérablement élargie dans les régions étudiées. Il a été constaté que les variations temporelles des valeurs mesurées qui n'ont pas pu être corrigées lors de l'harmonisation par manque de méta-informations adéquates, ont été équilibrées plus tard grâce à la modélisation spatiale statistique. Cette correction est importante pour la cartographie de nombreuses propriétés du sol.

Variables écologiques : Les résultats montrent qu'il est important de calculer des attributs de terrain pour différentes échelles spatiales et de déterminer l'échelle optimale par une analyse statistique des données. Si l'on choisit l'échelle spatiale en amont, l'influence de la topographie sur les propriétés pédologiques risque de ne pas être représentée de manière optimale.

Contrairement aux études menées dans des régions arides - c'est-à-dire où les sols sont peu couverts de végétation - les images aériennes hyperspectrales prises dans les régions d'étude n'ont livré que peu d'informations utiles pour la cartographie des propriétés pédologiques. Dans le cadre du projet, un procédé a été élaboré permettant de combiner des images aériennes prises à des

moments différents. Ainsi, on obtient davantage de surfaces contenant des informations spectrales sur les sols en friche qu'avec une seule prise de vue aérienne.

Modélisation statistique : La nouvelle méthode statistique permet d'élaborer des cartes de propriétés du sol de manière automatique. Pour tous les types de données pédologiques (mesures métriques, caractéristiques qualitatives et quantitatives), la même approche de modélisation peut être appliquée. Bien que de très nombreuses variables écologiques soient disponibles, seules un petit nombre d'entre elles ont été intégrées au modèle statistique. C'est la raison pour laquelle la plausibilité pédologique des modèles a pu être facilement vérifiée. Pour les régions des études de cas, de nombreuses cartes de propriétés du sol ont été établies sans investissement majeur grâce au nouveau procédé. Des critères novateurs et pertinents ont par ailleurs été proposés (et appliqués dans les études de cas) pour évaluer la qualité des cartes numériques de propriétés du sol.

Evaluation des fonctions du sol : Dans le cadre de ce projet, une approche numérique d'évaluation des sols a été mise en œuvre pour la première fois à l'échelon régional, couvrant de nombreuses thématiques. Dans les régions étudiées, dix fonctions du sol ont été évaluées dans l'espace, dans les domaines « production », « régulation des cycles de nutriments » et « habitat ». La plausibilité de l'évaluation a été vérifiée à l'aide de données pédologiques. De plus, le projet a étudié non seulement l'aptitude des sols pour certaines fonctions, mais aussi les failles de fiabilité de l'évaluation.

Implication pour la pratique

Le projet « Cartes des sols » a démontré clairement que l'on peut élaborer des cartes de propriétés du sol touchant toutes sortes de thématiques à partir de variables écologiques et de données récoltées lors d'études antérieures, disponibles à l'échelle de grandes surfaces. Si les données requises existent, des informations spatiales à haute définition peuvent ainsi également être générées pour les régions dans lesquelles il manque de bonnes cartes des sols. La précision de ce type de cartes peut être rigoureusement vérifiée. En outre, l'incertitude statistique des cartes élaborées peut être déterminée, et représentée en tant que telle sur les cartes. C'est un avantage dans la mesure où de nouvelles données pédologiques peuvent être recueillies en ciblant les parties d'une région d'étude dans laquelle les prédictions étaient jusque-là trop peu précises. Un autre avantage des cartes des sols réside dans le fait qu'elles sont faciles à actualiser : si de nouvelles données - données pédologiques ou variables écologiques - sont mises à disposition, il est aisé d'établir de nouvelles cartes.

Pour les trois régions d'étude, la précision des cartes de propriétés pédologiques a été vérifiée quantitativement. La qualité des cartes a montré de grandes variations selon la propriété concernée. Certaines propriétés ne sont prédictibles qu'avec de grosses erreurs aléatoires. Ces cartes ne peuvent pas servir dans le cadre de décisions en matière de propriété foncière, raison pour laquelle de nombreux spécialistes considèrent la méthodologie de cartographie numérique des sols comme trop peu précise et lui préfèrent des cartes produites par la méthodologie habituelle. Il n'existe toutefois à ce jour en Suisse aucune étude pertinente révélant les potentielles erreurs présentes sur les cartes traditionnelles à grande échelle basées sur des polygones dans le pronostic des propriétés du sol. Pour cette raison, l'opinion selon laquelle les cartes des sols traditionnelles à polygones livreraient des prédictions plus précises n'est pas vérifiée empiriquement.

La méthodologie numérique de cartographie ne se limite pas à cartographier les propriétés du sol. A partir d'un jeu de cartes générées numériquement indiquant les propriétés de base telles que la

teneur en humus, en pierres, en limon et en argile, le pH, les caractéristiques d'humidité du sol et l'importance du volume racinaire, il est possible, grâce à ces méthodes, d'effectuer une évaluation spatiale flexible de toute une palette thématique de fonctions du sol et de dangers potentiels.

Recommandation

Collaboration interdisciplinaire

Le projet « Cartes de sol » couvrait plusieurs domaines du cycle de création de valeur pour les informations pédologiques – de la mise à jour et harmonisation des données pédologiques et la mise à disposition de variables écologiques à l'analyse des fonctions pédologiques pour les décisions d'aménagement du territoire, en passant par le pronostic de propriétés du sol. Plusieurs disciplines y ont donc pris part. C'est grâce à cette collaboration interdisciplinaire que les objectifs du projet ont pu être atteints.

Utilisation de données du sol provenant d'études antérieures

Si des données provenant de projets plus anciens de cartographie des sols doivent être utilisées, il est indispensable de les harmoniser. Ce travail est essentiel à la réussite d'un projet de cartographie numérique des sols. L'harmonisation est une procédure exigeante, et doit être menée par des spécialistes des sols en collaboration avec des experts responsables de l'archivage des données numériques de sol et des analyses statistiques. Pour que cette harmonisation soit réussie, il faut disposer d'un modèle de données adapté. Des travaux préliminaires de qualité ont été menés en Suisse avec les bases de données NABODAT. La procédure de préparation des données pédologiques pour NABODAT ne couvre toutefois encore pas toutes les étapes telles que prévues dans le projet « Cartes des sols » (p.ex. contrôles de plausibilité) et devrait donc être complétée en conséquence. Par ailleurs, il faut veiller à un compromis entre l'harmonisation d'anciennes données de sols et le relevé de nouvelles données. En effet, selon la disponibilité des données, le travail nécessaire à l'harmonisation peut être trop important ou impossible à exécuter de manière satisfaisante par manque de méta-informations. Dans ces cas-là, il vaut mieux renoncer à utiliser les anciennes données et en relever de nouvelles.

Perfectionnement de la méthodologie de cartographie des sols

Les avancées réalisées dans la méthodologie de cartographie numérique des sols, ainsi que dans les données écologiques géo-référencées toujours plus précises disponibles depuis peu, offrent la possibilité, sinon de remplacer entièrement la méthodologie de cartographie des sols existante, du moins de générer plus facilement et à moindre coût des informations sur les sols pour de vastes surfaces.

Préparation de données de base, remplacement de la carte conceptuelle des sols : Au début d'un projet de cartographie, on traite toutes les données écologiques contenant des informations sur les facteurs de formation du sol dans la zone à cartographier. Ces informations sont essentielles à l'élaboration de la carte conceptuelle des sols qui sera effectuée dans un deuxième temps. S'agissant d'une cartographie basée sur le numérique, on peut y ajouter des données de télédétection : outre les attributs de terrain, calculés à partir de modèles altimétriques à haute résolution, et les données satellites multi-spectrales (Landsat, MODIS, Sentinel), qui fournissent directement des informations sur la surface de sols en friche (p. ex. sur la teneur en humus), c'est la spectrométrie gamma aéroportée qui est à même de fournir les informations les plus utiles. Une carte conceptuelle peut être établie de manière plus objective lorsqu'on utilise des procédés statistiques qui relient des données pédologiques déjà existantes à des variables écologiques. Avec

la méthode actuelle de cartographie, cette étape dépend fortement de l'expérience subjective des cartographes et, par conséquent, est sujette à déformation.

Les cartographes ont recours aux procédés statistiques également pour le choix du site dont les profils de sol doivent être étudiés. Cela permet de garantir que les sites de profils ne soient pas seulement répartis de façon équilibrée sur la zone à cartographier, mais aussi que la gamme de variations des données écologiques importantes soit couverte le plus complètement possible, à l'aide d'un nombre minimum de points d'examen. Selon l'étendue de la zone étudiée et la précision recherchée, il est indiqué de recourir à un procédé itératif, permettant selon le besoin d'étudier d'autres emplacements, jusqu'à ce que la couverture des données écologiques soit satisfaisante tant dans l'espace que dans le contenu.

Relevé de données pédologiques : Les données sur les propriétés du sol sont aujourd'hui recueillies soit par valeurs estimées de terrain soit par mesures quantitatives de laboratoire. Jusqu'à présent, les valeurs estimées d'indices du sol étaient généralement enregistrées comme valeurs de classe (p.ex. « 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. Il est également important que toutes les données provenant de cartographies de terrain, c'est-à-dire les informations obtenues par le biais de forages, soient désormais documentées et enregistrées numériquement. Au niveau conceptuel, il faut donc garder clairement séparée l'étape « récolte des données » de l'étape « formulation de pronostics spatiaux », que ces derniers soient établis par le modèle mentalement subjectif des cartographes ou par les analyses statistiques objectives et reproductibles.

Depuis quelque temps, les méthodes spectroscopiques qui enregistrent la réflexion dans le domaine visible et infrarouge du spectre lumineux sont de plus en plus utilisées pour mesurer les propriétés du sol. Une fois étalonnées sur la base de données spectrales par mesures chimiques humides, les méthodes spectroscopiques permettent d'effectuer une grande quantité d'analyses, rapidement et à peu de frais. Afin de limiter encore les coûts des analyses de laboratoire, il serait possible d'appliquer d'autres procédés de mesures (p. ex. analyse par fluorescence X) que les procédés optiques. Ces nouvelles évolutions devraient être prises en compte dans le remaniement prévu des directives sur la cartographie des sols. Autre problème posé par les directives en vigueur aujourd'hui : trop de catégories différentes doivent être considérées dans la codification des caractéristiques qualitatives et quantitatives. Avec une subdivision trop détaillée, il est difficile de relever les données correctement et de manière consistante. Par ailleurs, on dispose ensuite de trop peu de données par catégorie pour les modélisations statistiques, et il faut alors réunir des niveaux spécifiquement à cet effet.

Validation de la méthodologie de cartographie des sols : Jusqu'à présent, l'exactitude des prédictions tirées de cartes de sols traditionnelles basées sur les polygones n'a jamais été vérifiée en Suisse avec la même rigueur que ce qui se fait habituellement pour les études cartographiques numériques. Les futurs projets de cartographie des sols doivent tenir compte de cette lacune, et prévoir des ressources pour une validation de la qualité des cartes par le biais de données indépendantes qui ne doivent pas être utilisées pour l'établissement des cartes.

Tirer parti d'économies d'échelle dans les projets de cartographie des sols

Autre avantage de la démarche adoptée dans le projet « Cartes des sols » par rapport à la procédure actuelle : la réunion et l'évaluation de données écologiques très diversifiées et d'informations

provenant de la télédétection et de la reconnaissance proche, qui peuvent contribuer à l'explication du modèle spatial des propriétés du sol. Avec la méthode utilisée aujourd'hui, l'investissement nécessaire pour réunir et évaluer un tel volume de cartographies est trop important pour les projets d'ampleur modeste. En outre, les services privés de cartographie ne disposent souvent pas du savoir-faire technique requis. Le projet « Cartes des sols » a montré que pour cette étape des travaux, l'investissement pour préparer les données est à peine plus grand lorsqu'il s'agit de traiter des zones étendues ou plusieurs régions. Pour cette raison, pour tous les futurs projets de cartographie des sols, il serait judicieux de faire mener les travaux de préparation et de coordination par un service centralisé, travaillant en collaboration avec les cantons, et de pouvoir ainsi tirer parti de ces innovations techniques.