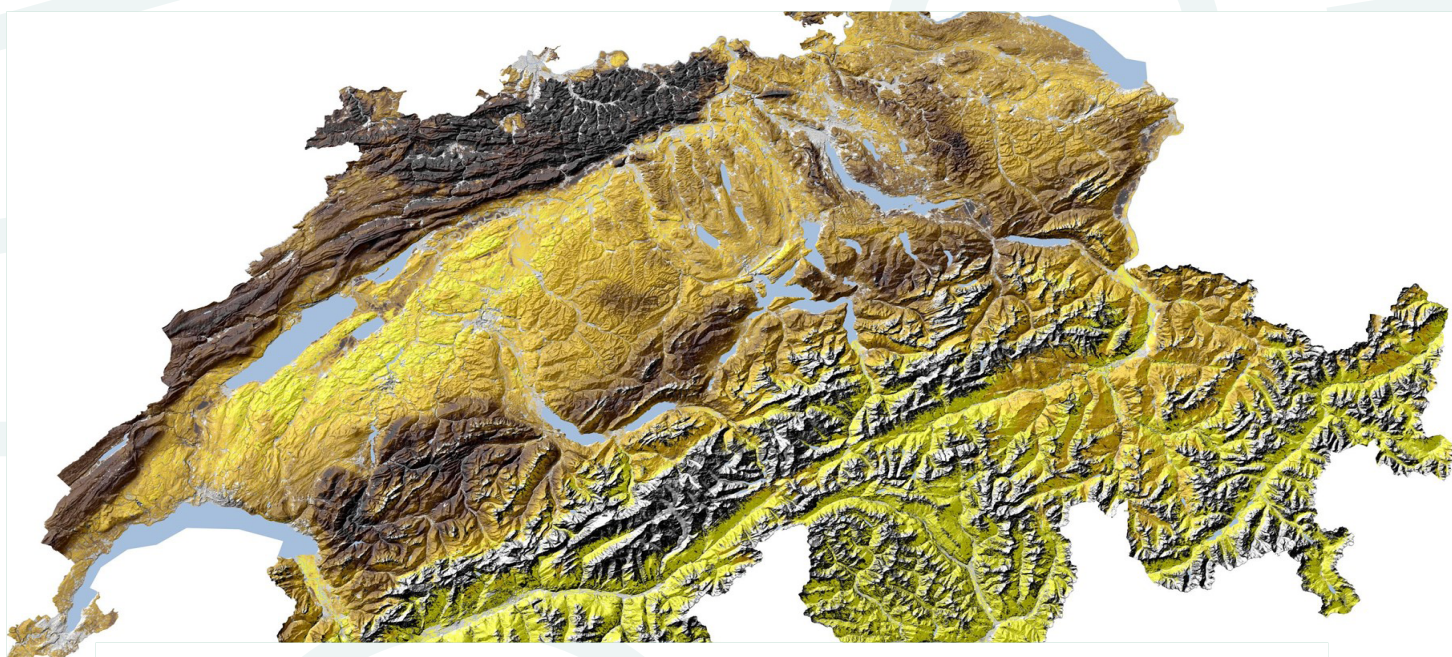




Cartes indicatives de propriétés des sols

Cartes modélisées de propriétés des sols
à trois profondeurs pour l'ensemble du pays

CCSols, rapport n° 6

Septembre 2023

Engagé en Suisse
pour une précieuse ressource

Mentions légales

Auteurs : Felix Stumpf, Thorsten Behrens, Karsten Schmidt, Armin Keller

Année de parution : 2023

Éditeur : Centre de compétences sur les sols (CCSols).

Le CCSols travaille sur mandat de trois offices fédéraux : l'Office fédéral de l'environnement (OFEV), l'Office fédéral de l'agriculture (OFAG) et l'Office fédéral du développement territorial (ARE) et est rattaché à la Haute école des sciences agronomiques, forestières et alimentaires (HAFL) de la Haute école spécialisée bernoise (HESB-BFH) de Zollikofen.

Photo de couverture : Carte indicative de la teneur en argile 0-30 cm (graphisme: CCSols)

Mise en page : Fabrice Wullschleger avec un modèle créé par Magma Branding, Sandrainstrasse 3, 3007 Berne, <https://magma-branding.ch>

Citation recommandée : F. Stumpf, Behrens T., K. Schmidt et A. Keller (2023). Cartes indicatives de propriétés pédologiques - Cartes modélisées de propriétés pédologiques à trois profondeurs pour l'ensemble du pays. Rapport n° 6, BFH-HAFL, CH 3052 Zollikofen-Berne, disponible sur www.ccsols.ch

Copyright : Conformément au symbole de licence ci-dessous, la reproduction non commerciale du rapport est souhaitée, mais avec indication de la source et envoi d'un exemplaire justificatif à l'éditeur. Le partage est soumis aux mêmes conditions de licence.



Table des matières

	1
1 Contexte	4
2 Méthode d'élaboration des cartes	5
2.1 Conception	5
2.2 NABODAT – jeu de données sur les propriétés pédologiques	6
2.3 Dérivation de variables environnementales à l'échelle du territoire	15
2.4 Modélisation spatiale des propriétés pédologiques	22
3 Cartes indicatives de propriétés des sols	25
4 Mise en perspective des résultats	37
5 Préparation des cartes matricielles	40
6 Bibliographie	41

1. Contexte

Pour garantir une utilisation durable des sols et les protéger, il est essentiel de disposer d'informations pédologiques fiables couvrant l'ensemble du territoire. Ces données sont indispensables, par exemple, pour déterminer et évaluer la multifonctionnalité des sols et couvrir les besoins très variables des différents groupes utilisateurs (p. ex. agriculture et sylviculture, climat, protection des eaux, biodiversité, aménagement du territoire, etc.). Plusieurs études ont recensé la diversité des besoins et des intérêts des utilisateurs potentiels, des services de la protection des sols ainsi que des représentants et représentants de ces groupes (Lüscher 2004, Knecht et al. 2017, Keller et al. 2018). Seuls quelques cantons disposent à ce jour d'informations pédologiques couvrant l'ensemble de leur territoire. Jusqu'ici, à peine environ 13 % de la surface agricole utile de la Suisse est cartographiée (Rehbein et al. 2019).

Concernant les études à grande échelle ou sur l'ensemble du territoire, les professionnelles et professionnels, les autorités d'exécution et la recherche ne disposaient jusqu'ici d'aucune carte des propriétés des sols. Pour pallier cette grave lacune, plusieurs projets de recherche ont dû recourir par le passé à des dérivations et des estimations basées sur la carte de l'aptitude des sols de la Suisse (BEK 200) à l'échelle 1:200'000 datant de 1980 (BEK 200, Vökt et Pazeller 2002). La BEK 200 a été élaborée

dans les années 1970, le contenu pédologique a été interprété sur la base d'analyses de photographies aériennes, de cartes géologiques et géotechniques ainsi que d'un nombre relativement limité de profils pédologiques et de sondages d'unités de relief et de caractéristiques géologiques. Les unités cartographiques de la BEK 200 renferment des informations sur six paramètres pédologiques subdivisés en classes grossières, mais ne contiennent pas de données sur des propriétés importantes comme le pH, la teneur en matière organique ou la teneur en argile. Un polygone de la BEK 200 couvre en moyenne plusieurs kilomètres carrés. Pour de nombreuses questions à l'échelle nationale, cette résolution spatiale se révèle insatisfaisante.

Compte tenu de ce contexte et de la forte demande émanant de la recherche, de l'exécution et des utilisatrices et utilisateurs sur le terrain, le Centre de compétences sur les sols (CCSols) a modélisé des cartes indicatives des propriétés des sols couvrant l'ensemble du territoire à partir des données disponibles dans le Système d'information pédologique NABODAT. Les cartes portent principalement sur la teneur en argile, en limon, en sable et en carbone ainsi que sur le pH et la capacité d'échange cationique potentielle à trois profondeurs et pour toutes les utilisations des sols (terres assolées, herbages, forêt).

La présente documentation décrit la préparation et l'analyse statistique des informations pédologiques disponibles dans NABODAT ainsi que la dérivation de variables environnementales (covariables) à l'échelle du territoire pour la modélisation spatiale.

Elle présente les produits finaux et les résultats de validation de la cartographie numérique des propriétés des sols. Elle décrit en outre la mise à disposition des produits cartographiques.

2. Méthode d'élaboration des cartes

2.1. Conception

La modélisation spatiale des propriétés des sols repose sur une procédure mathématique et statistique qui reproduit des relations entre des propriétés pédologiques mesurées en un point donné et des covariables quantitatives. Dans sa conception, une cartographie numérique des sols se fonde sur le modèle facteurs-état (Dokuchaev 1883 ; Jenny 1941 ; McBratney et al. 2003), la propriété prédite S représentant une fonction des facteurs :

- _ sol (s),
- _ climat (c),
- _ végétation/utilisation du sol (o),
- _ relief (r),
- _ matériau parental (p),
- _ temps (a) et
- _ espace (n) .

En équitation :

$$S = f(s, c, o, r, p, a, n)$$

Sur la base de ce modèle et de covariables disponibles à l'échelle du territoire, des prévisions spatiales et des incertitudes de prévision sont déduites pour les différentes propriétés des sols. On trouve dans la littérature un grand nombre d'études de cas et de variantes pour la cartographie numérique des propriétés des sols (p. ex. Behrens et al. 2018, Poggio and Gimona, 2017 ; Žížala et al., 2022).

2.2. NABODAT – jeu de données sur les propriétés pédologiques

Au cours des dernières années, le Système d'information pédologique NABODAT (banque de données nationale sur les sols : www.nabodat.ch) a servi à convertir les informations pédologiques cantonales disponibles en un modèle de données uniformisé et à harmoniser des données relevées durant quatre décennies principalement lors de cartographies cantonales (Rehbein et al. 2019). Le Centre de services NABODAT migre régulièrement dans son Système d'autres jeux de données issues d'anciennes cartographies des sols, de réseaux cantonaux d'observation des sols (KABO) et de divers relevés et met périodiquement à la disposition du public un Fichier actualisé de données ponctuelles mises en libre accès par les cantons. La version 6 de ce Fichier rassemble les données pédologiques de quelque 33 000 sites (www.nabodat.ch). La cartographie numérique des sols est basée sur les propriétés pédologiques mesurées en laboratoire du Fichier de données pédologiques de Suisse V6 (NABODAT 2023).

Les teneurs en matière organique, argile et limon estimées sur le terrain n'ont pas été utilisées pour la réalisation des cartes, car la corrélation entre ces estimations et les propriétés mesurées issues de l'ensemble des jeux de données du projet était insatisfaisante. À noter que le Fichier de données pédologiques de Suisse NABODAT intègre également l'échantillonnage en grille (4X6 km) effectué dans le cadre du monitoring de la biodiversité en Suisse (MBD). Entre 2011 et 2015, des échantillons de la couche supérieure du sol (0-20 cm) ont été prélevés dans ce réseau de mesure et analysés en laboratoire (MBD 2023).

Malgré les efforts considérables déployés par le Centre de services NABODAT pour harmoniser et regrouper les informations pédologiques en un modèle de données unique, les données du Fichier présentent à divers égards des différences de qualité. Celles-ci s'observent notamment au niveau de la distribution spatiale et temporelle, du type et de la profondeur exacte d'échantillonnage, du géoréférencement ainsi que des diverses méthodes de détermination analytique en laboratoire.

Afin d'optimiser l'efficacité de la modélisation spatiale des propriétés des sols, le jeu de données a d'abord été en grande partie harmonisé et épuré dans la mesure du possible en plusieurs étapes. Par exemple, les désignations et les unités des propriétés pédologiques ont été uniformisées. Les relevés antérieurs à 1985 ont été écartés, car il manque souvent des métadonnées importantes pour ces relevés ou parce que le géoréférencement des sites a été jugé trop imprécis. Les données de profils avec des chevauchements d'horizons, les doublons, les mesures répétées sur le même site (monitoring) et les valeurs non plausibles ont été identifiées et converties en moyenne ou supprimées. Les valeurs de mesure correspondant à des sites qui étaient imperméabilisés au moment du prélèvement des échantillons ont également été écartées, car elles indiquent un géoréférencement imprécis.

En ce qui concerne les analyses en laboratoire, la texture du sol (argile, limon, sable) a été déterminée selon la méthode de sédimentation (Gee et al., 1986). Les teneurs en carbone du sol (SOC) qui avaient été déterminées par oxydation humide selon la méthode de référence FAL ont été transposées pour correspondre aux valeurs de la méthode de référence actuelle (calcination à sec ; analyseur CN). Les teneurs en matière organique ont été converties en SOC selon la formule $SOC [\%] = \frac{Humus [\%]}{1.725}$ (Pribyl 2010). Les sols présentant une SOC supérieure à 10 % ont été écartés des analyses, car la densité d'échantillonnage était dispropor-

tionnellement faible pour cette plage de valeur et l'incertitude de la mesure élevée. Le pH a été déterminé par potentiométrie dans une solution de $CaCl_2$. Concernant la détermination analytique en laboratoire de la capacité d'échange cationique potentielle (CEC_{pot}), les cations échangeables de Ca, Mg, K, Na et H ont d'abord été extraits dans une solution de $BaCl_2$, resp. $HCl+H_2SO_4$. Ensuite, les concentrations des éléments ont été déterminées par spectroscopie d'absorption atomique (SAA) ou avec un photomètre de flamme et additionnées (Agroscope, 2023).

Afin d'harmoniser la profondeur des informations des différentes propriétés des sols dans le Fichier de données pédologiques de Suisse, un gradient de profondeur continu a été déduit au moyen d'une interpolation spline, puis la moyenne a été calculée pour les trois profondeurs (0 – 30 cm ; 30 – 60 cm ; 60 – 120 cm) (Bishop et al. 1999).

Les jeux de données harmonisées sur les propriétés des sols (argile, limon, sable, SOC, pH, CEC_{pot}) ont été évalués par rapport à l'utilisation du sol et à la profondeur. Les évaluations ont porté sur la distribution spatiale et la densité d'échantillonnage selon l'utilisation du sol, sur la distribution des fréquences par année de relevé et sur la distribution des fréquences des données d'analyse (Tableau 1 ; Figures 1 à 6). L'analyse des résultats montre clairement que la densité spatiale des sites d'échantillonnage varie fortement sur l'ensemble de la Suisse et en fonction des utilisations du sol et des profondeurs. On constate notamment que

les sites d'herbages et de forêts sont nettement sous-représentés par rapport aux terres assolées. La densité d'échantillonnage chute également avec l'augmentation de la profondeur d'échantillonnage. Dans le centre et le nord du Plateau, des cartographies ou des études pédologiques ont été réalisées par le passé, tandis que, pour d'autres régions, dont en particulier une grande partie du Jura, du Valais, du Tessin, des Grisons et des Préalpes, les données

d'analyses des propriétés des sols font presque entièrement défaut ou n'ont pas encore pu être migrées dans NABODAT (cf. à titre de comparaison, voir les cartes de « l'état de la cartographie » (Rehbein et al. 2019)). Environ 70 % des informations pédologiques ont été relevées sur la période 1990 à 2000. Par ailleurs, les distributions de fréquences des données d'analyse, stratifiées par utilisation du sol et profondeur d'échantillonnage, sont très semblables.

Tableau 1 : Nombre de sites d'échantillonnage par km² pour chaque propriété pédologique (argile, limon, sable, SOC, pH, CEC_{pot}) rapportés à la surface des différentes utilisations du sol (terres assolées, herbages, forêt ; total : somme de toutes les surfaces).

Propriété du sol	Total [km ⁻²]	Terres assolées [km ⁻²]	Herbages [km ⁻²]	Forêt [km ⁻²]
Argile	0.35	1.25	0.22	0.20
limon	0.34	1.24	0.22	0.20
sable	0.25	0.82	0.17	0.17
SOC	0.37	1.30	0.23	0.25
pH	0.55	1.86	0.36	0.37
CEC _{pot}	0.06	0.21	0.04	0.04

Clay [%]

Min	0.02
Max	69.17
Q1	16.85
Median	22.04
Q2	29.94
Mean	24.16
Sd	10.78
n	27045

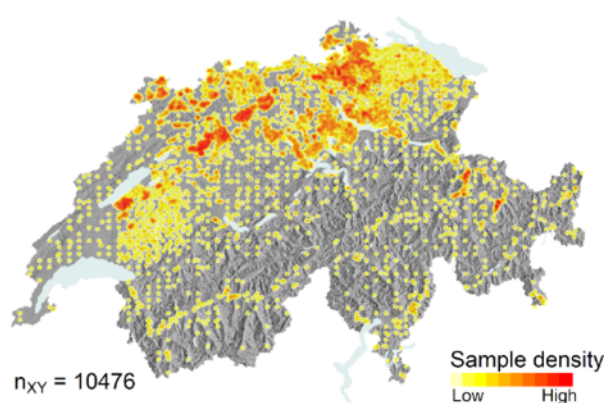
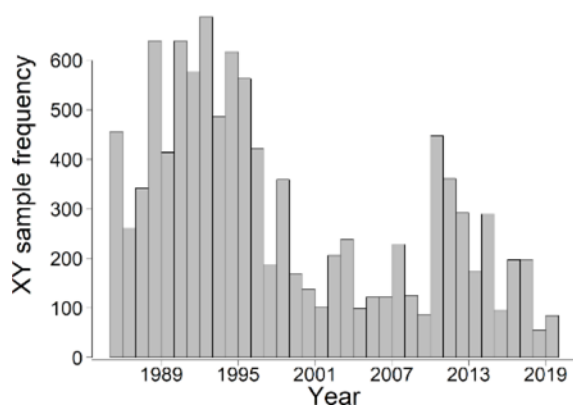
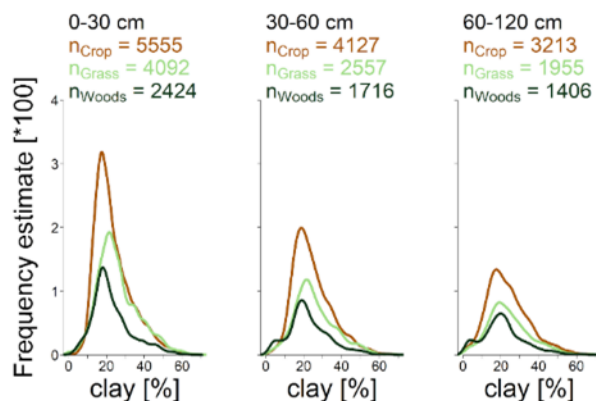


Figure 1 : Distribution statistique, temporelle et spatiale des teneurs en argile mesurées en laboratoire (clay) du Fichier de données pédologiques de Suisse NABODAT v6. En haut : caractéristiques statistiques des analyses en laboratoire (min : minimum ; max : maximum ; Q1 : quantile 25 % ; Q2 : quantile 75 % ; Sd : écart-type ; n : nombre de relevés) et distribution des fréquences par profondeurs et par utilisation du sol (en brun : terres assolées ; en vert clair : herbages ; en vert sombre : forêt) ; en bas à gauche : distribution des fréquences au fil du temps ; en bas à droite : distribution spatiale des sites d'échantillonnage n_{xy}

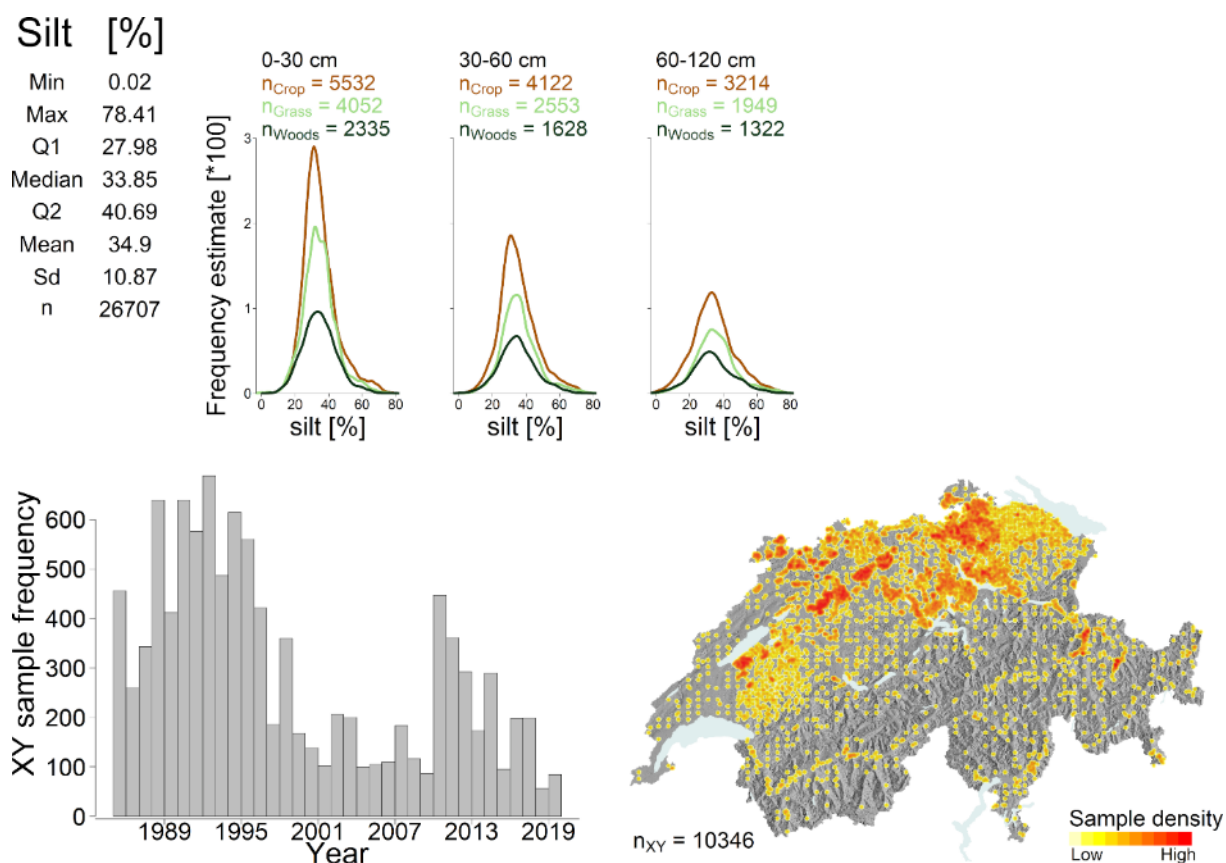


Figure 2 : Distribution statistique, temporelle et spatiale des teneurs en limon mesurées en laboratoire (silt) du Fichier de données pédologiques de Suisse NABODAT v6. En haut : caractéristiques statistiques des analyses en laboratoire (min : minimum ; max : maximum ; Q1 : quantile 25 % ; Q2 : quantile 75 % ; Sd : écart-type ; n : nombre de relevés) et distribution des fréquences par profondeurs et par utilisation du sol (en brun : terres assolées ; en vert clair : herbages ; en vert sombre : forêt) ; en bas à gauche : distribution des fréquences au fil du temps ; en bas à droite : distribution spatiale des sites d'échantillonnage n_{xy} .

Sand [%]

Min	0.1
Max	92.38
Q1	26.52
Median	41.2
Q2	52.81
Mean	39.97
Sd	17.67
n	19675

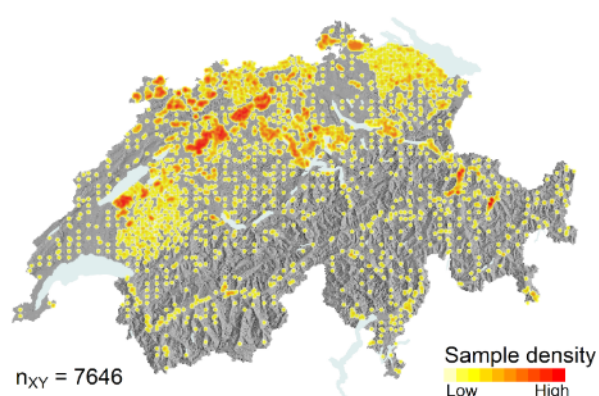
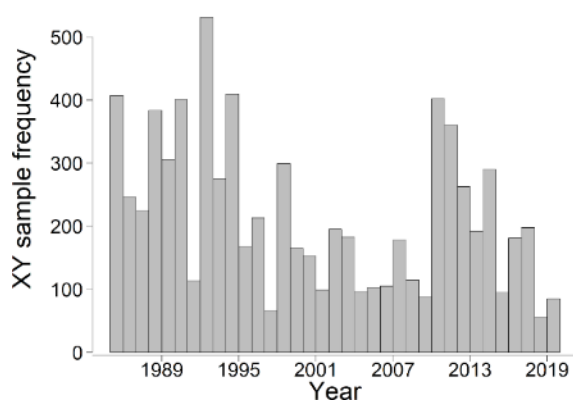
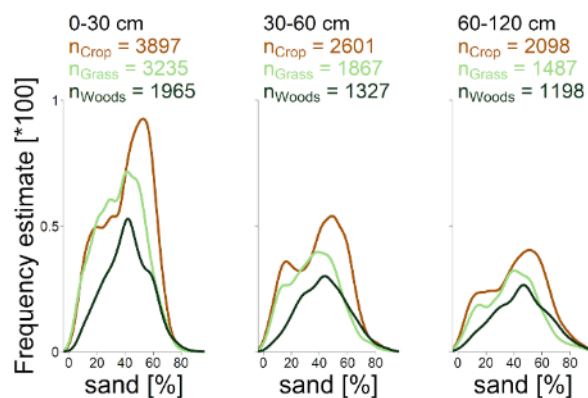


Figure 3 : Distribution statistique, temporelle et spatiale des teneurs en sable mesurées en laboratoire (sand) du Fichier de données pédologiques de Suisse NABODAT v6. En haut : caractéristiques statistiques des analyses en laboratoire (min : minimum ; max : maximum ; Q1 : quantile 25 % ; Q2 : quantile 75 % ; Sd : écart-type ; n : nombre de relevés) et distribution des fréquences par profondeurs et par utilisation du sol (en brun : terres assolées ; en vert clair : herbages ; en vert sombre : forêt) ; en bas à gauche : distribution des fréquences au fil du temps ; en bas à droite : distribution spatiale des sites d'échantillonnage n_{xy} .

SOC [%]

Min	0.01
Max	10.19
Q1	0.77
Median	1.75
Q2	3
Mean	2.14
Sd	1.76
n	22624

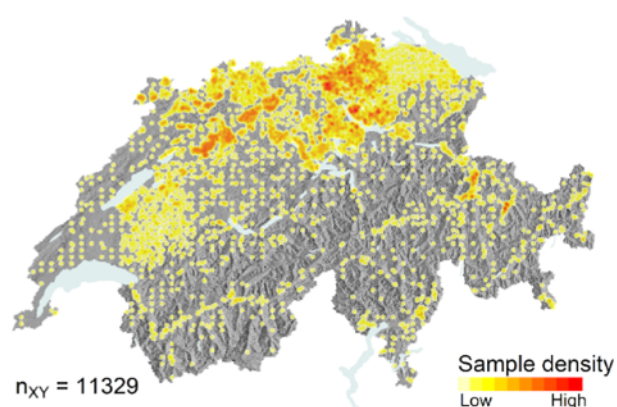
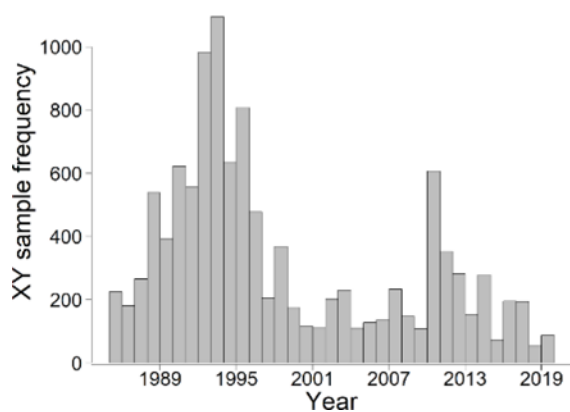
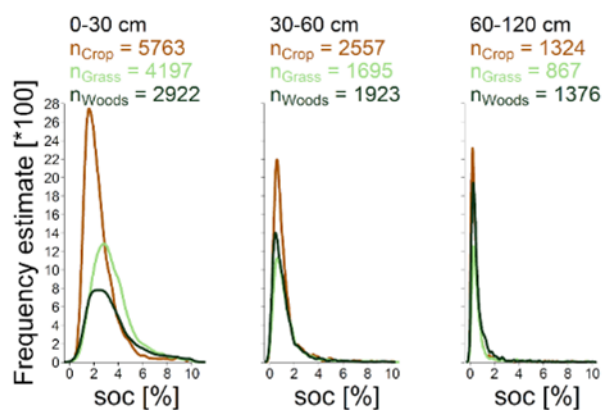


Figure 4 : Distribution statistique, temporelle et spatiale des teneurs en carbone mesurées en laboratoire (SOC) du Fichier de données pédologiques de Suisse NABODAT v6. En haut : caractéristiques statistiques des analyses en laboratoire (min : minimum ; max : maximum ; Q1 : quantile 25 % ; Q2 : quantile 75 % ; Sd : écart-type ; n : nombre de relevés) et distribution des fréquences par profondeurs et par utilisation du sol (en brun : terres assolées ; en vert clair : herbages ; en vert sombre : forêt) ; en bas à gauche : distribution des fréquences au fil du temps ; en bas à droite : distribution spatiale des sites d'échantillonnage n_{xy} .

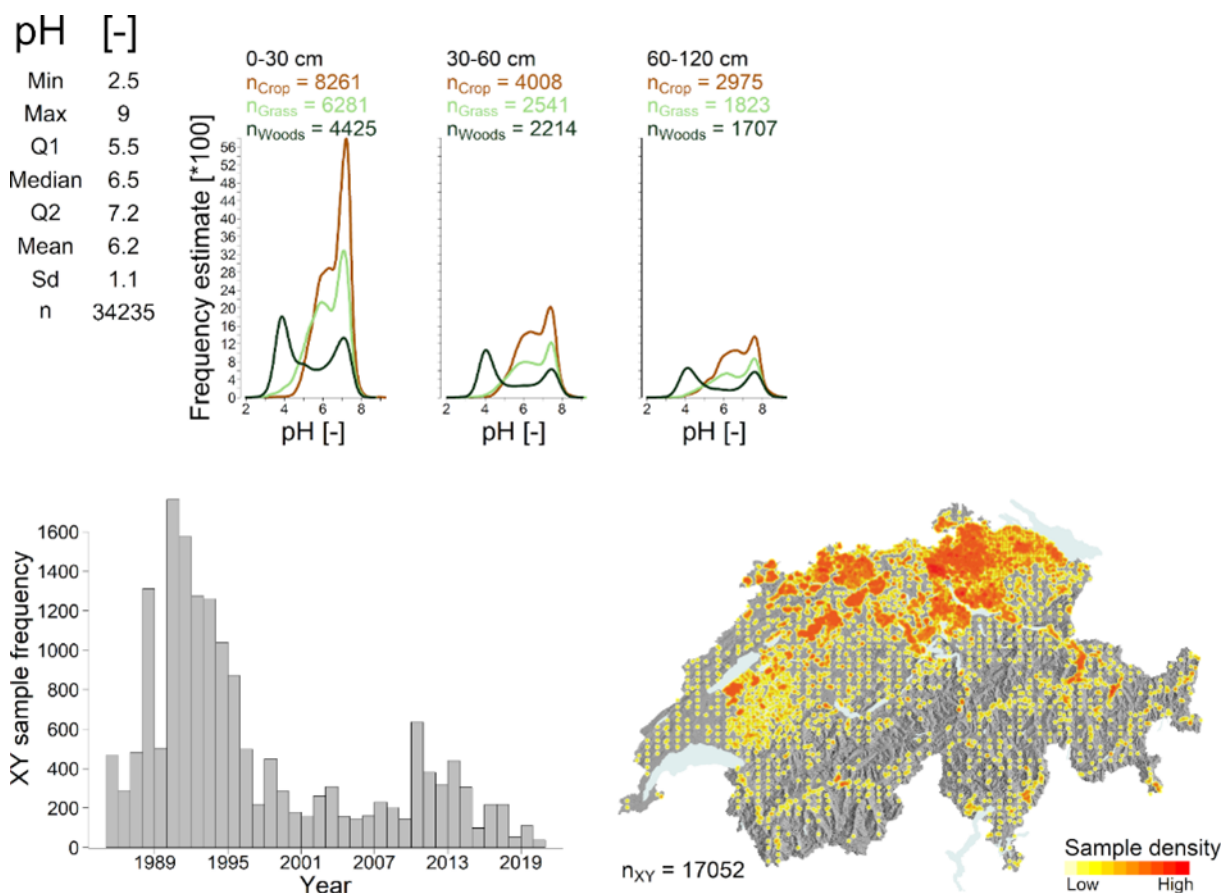


Figure 5 : Distribution statistique, temporelle et spatiale des valeurs de pH mesurées en laboratoire (pH) du F de données pédologiques de Suisse NABODAT v6. En haut : caractéristiques statistiques des analyses en laboratoire (min : minimum ; max : maximum ; Q1 : quantile 25 % ; Q2 : quantile 75 % ; Sd : écart-type ; n : nombre de relevés) et distribution des fréquences par profondeurs et par utilisation du sol (en brun : terres assolées ; en vert clair : herbages ; en vert sombre : forêt) ; en bas à gauche : distribution des fréquences au fil du temps ; en bas à droite : distribution spatiale des sites d'échantillonnage n_{xy} .

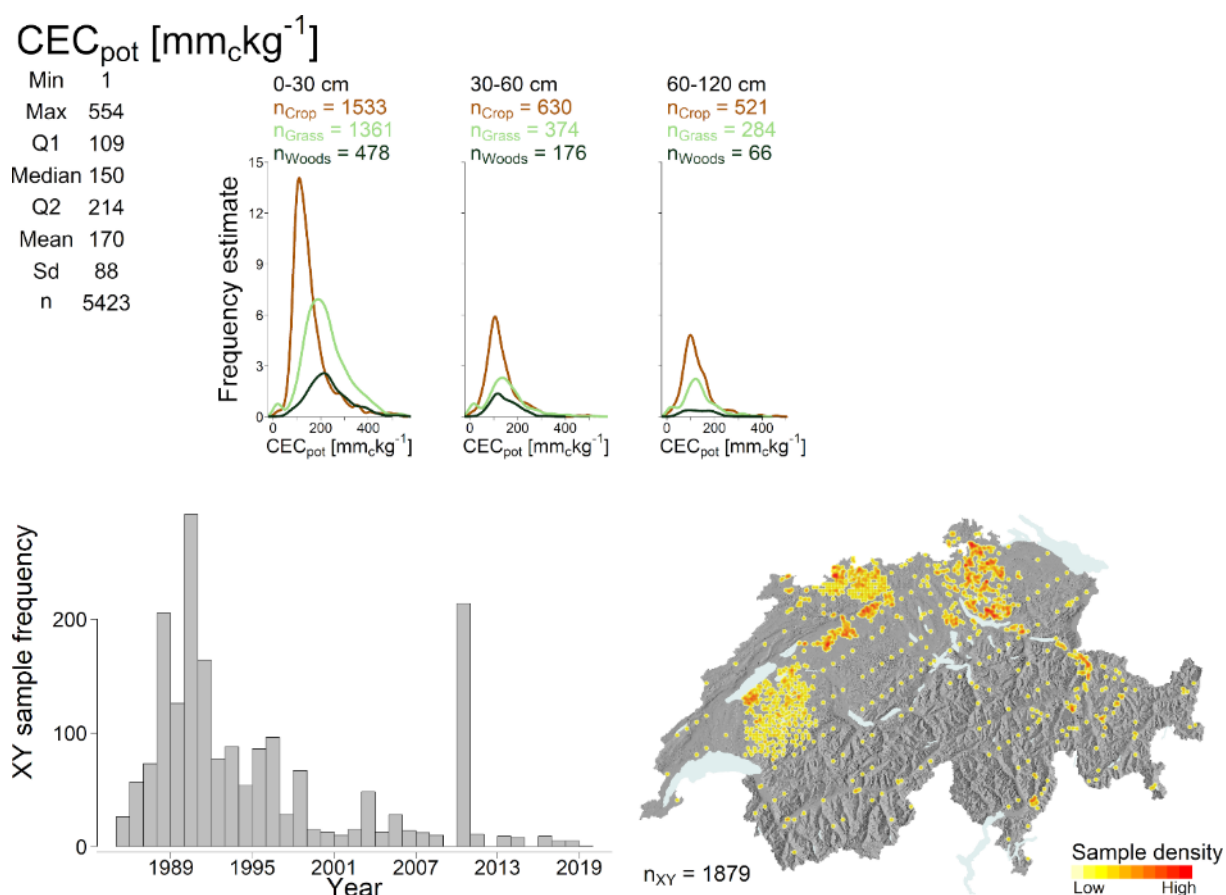


Figure 6 : Distribution statistique, temporelle et spatiale de la capacité d'échange cationique potentielle mesurée en laboratoire (CEC_{pot}) du Fichier de données pédologiques de Suisse NABODAT v6. En haut : caractéristiques statistiques des analyses en laboratoire (min : minimum ; max : maximum ; Q1 : quantile 25 % ; Q2 : quantile 75 % ; Sd : écart-type ; n : nombre de relevés) et distribution des fréquences par profondeurs et par utilisation du sol (en brun : terres assolées ; en vert clair : herbages ; en vert sombre : forêt) ; en bas à gauche : distribution des fréquences au fil du temps ; en bas à droite : distribution spatiale des sites d'échantillonnage n_{xy} .

2.3. Dérivation de variables environnementales à l'échelle du territoire

Données relatives au terrain

Les caractéristiques du terrain sont des facteurs pédogénétiques importants et peuvent être dérivées à partir de modèles numériques de terrain. Il s'agit par ailleurs de grandeurs proxy importantes pour les phénomènes et caractéristiques géologiques et climatiques (Behrens et al. 2010). Les caractéristiques du terrain ont été décrites pour l'ensemble du territoire suisse à différentes échelles spatiales au moyen d'une analyse de terrain multiscalaire (Behrens et al. 2018 ;

Behrens et al. 2019 ; Behrens and Viscarra Rossel 2020). La base de données utilisée pour l'analyse de terrain est le modèle altimétrique numérique swissALTI^{3D} à une résolution de 2 x 2 m, calculé sur la base de laser scanning aéroporté (swisstopo 2023). Onze paramètres de terrain ont été dérivés dans quatorze résolutions spatiales différentes, allant de 8 m à 4880 m (Tableau 2). L'analyse de terrain multiscalaire a permis d'obtenir 154 jeux de données matricielles couvrant l'ensemble du territoire.

Tableau 2 : Paramètres de l'analyse de terrain multiscalaire

Description / nom	Référence
Elevation (a.s.l.) [m]	swisstopo, 2023
Slope Inclination [°]	Zevenbergen and Thorne, 1987
Terrain Ruggedness Index [-]	Riley et al., 1999
Terrain Roughness Index [-]	Wilson et al., 2007
Topographic Position Index [-]	Guisan et al., 1999
Profile Curvature [-]	Zevenbergen and Thorne, 1987
Planform Curvature [-]	Zevenbergen and Thorne, 1987
Flow Accumulation, log10 [-]	Quinn et al., 1991
Convergence Index [-]	Kiss, 2004
Eastness [-], sin(aspect in rad)	Wilson et al., 2007
Northness [-], cos(aspect in rad)	Wilson et al., 2007

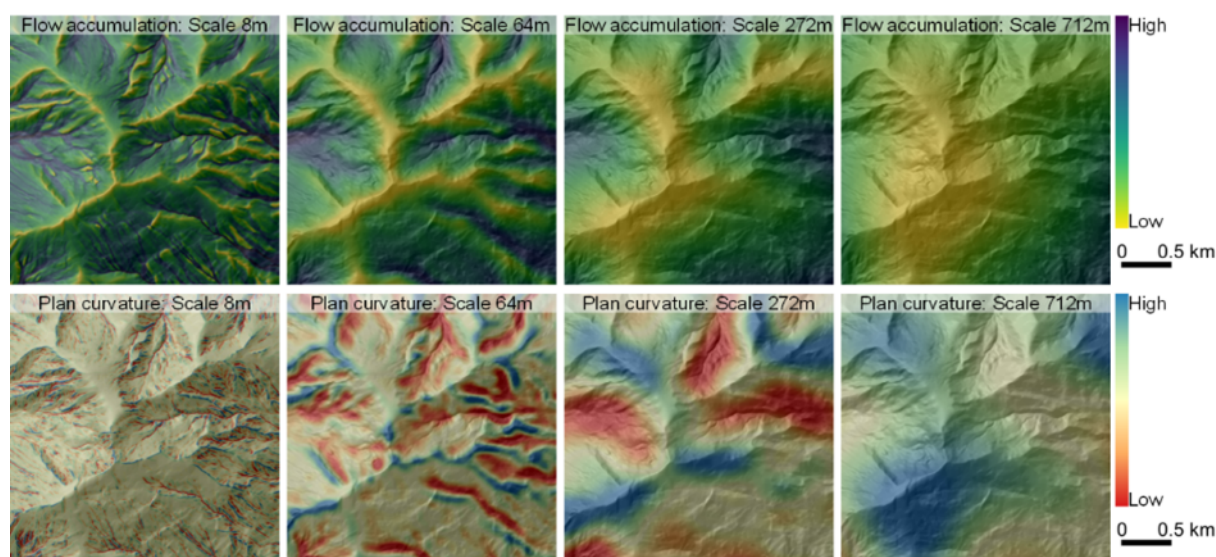


Figure 7 : Analyse multiscalaire du relief à l'exemple de l'accumulation du flux (Flow Accumulation FLA_{log}) et de la courbure planiforme (Plan Curvature: CPL) aux échelles de 8 m, 64 m, 272 m et 712 m.

Données climatiques

Le climat a une influence sur la pédogenèse, notamment au travers d'interactions avec les cycles hydrologiques. Ces interactions sont liées, quant à elles, à l'érosion du sol ainsi qu'aux variations de la matière organique, de la texture, de la capacité de rétention en eau et de la capacité d'échange cationique du sol (Brevik 2013).

Les caractéristiques climatiques spatio-temporelles sont dérivées à partir de données matricielles à l'échelle de la Suisse en résolution spatiale de 1000 x 1000 m portant sur les sommes annuelles des précipitations, sur la température moyenne et sur la durée d'ensoleillement relative moyenne (Meteoswiss 2021).

Les données matricielles sur les précipitations et la température sont basées sur les travaux de Frei et al. (2006 ; 2014).

Ceux-ci s'appuient sur les données d'un réseau de 430 stations de mesure des précipitations et de 125 stations de mesure des températures en Suisse. La durée d'ensoleillement relative correspond au rapport entre l'ensoleillement effectif et la durée d'ensoleillement maximale possible avec une atmosphère sans nuages (Frei et al. 2015). Finalement, on dispose ainsi de données matricielles à l'échelle du territoire sur la température moyenne, la somme moyenne des précipitations et la durée d'ensoleillement relative moyenne pour la période 1980 à 2021. En plus, la variation annuelle moyenne a été calculée sur la même période pour chaque paramètre climatique (Figure 8).

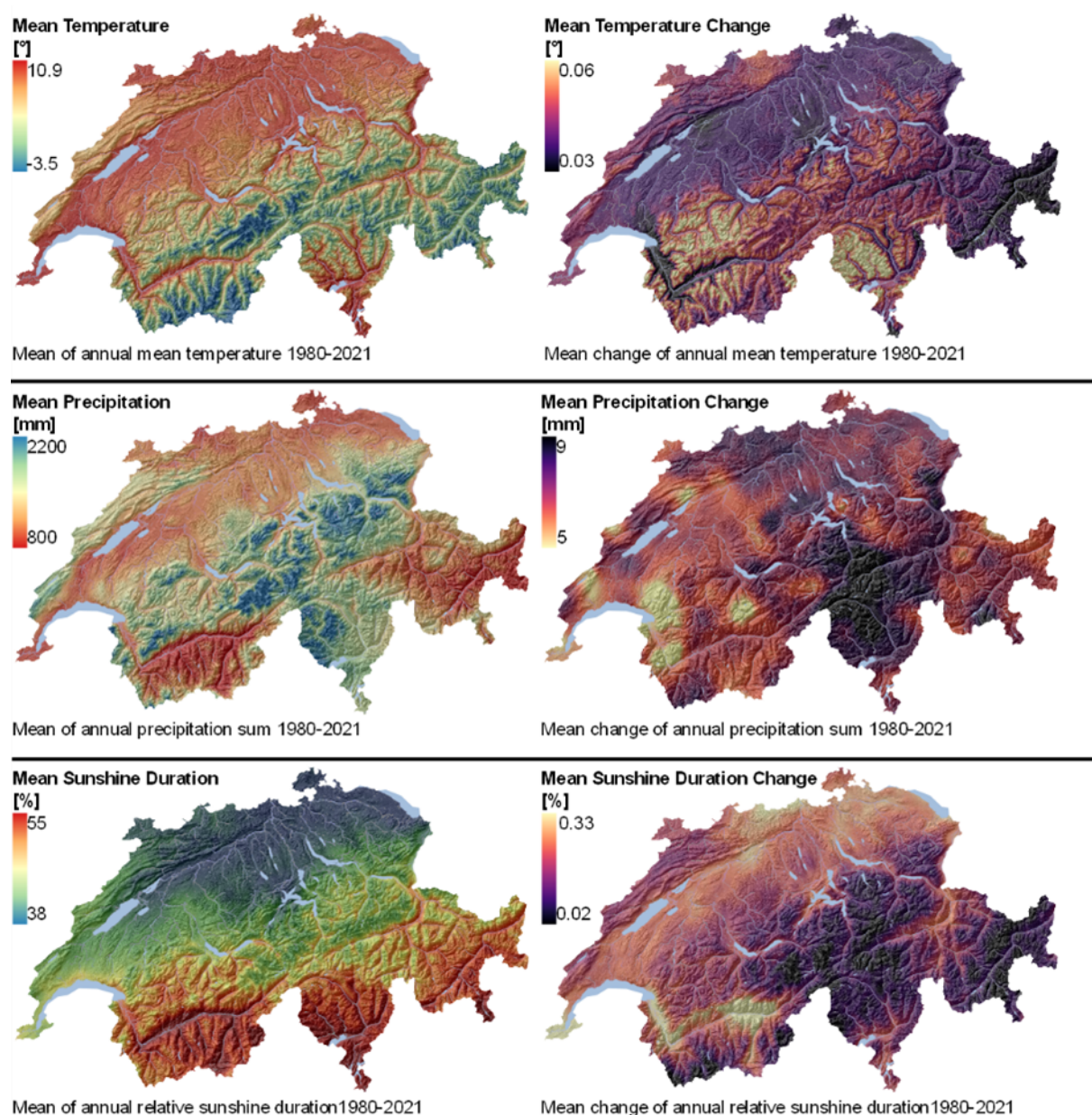


Figure 8 : Paramètres climatiques à l'échelle du pays pour la période 1980 à 2021 : température moyenne (temperature mean ; en haut à gauche) et variation annuelle moyenne de la température (mean temperature change ; en haut à droite) ; précipitations moyennes (precipitation mean ; au milieu à gauche) et variation annuelle moyenne des précipitations (mean precipitation change ; au milieu à droite) ; durée relative moyenne d'ensoleillement (mean sunshine duration ; en bas à gauche) et sa variation annuelle (mean sunshine duration ; en bas à droite).

Données relatives à la végétation et à l'utilisation du sol

La végétation et l'utilisation du sol ont une grande influence sur plusieurs processus et propriétés pédologiques et sont donc des éléments importants pour la description des processus pédogénétiques. Elles influencent notamment les cycles du carbone et des éléments nutritifs et modifient ainsi la biologie et la physique du sol (De Vries et al. 2013). En outre, l'évolution de l'utilisation du sol influe sur des propriétés des sols telles que la matière organique, la masse volumique apparente et la capacité de rétention en eau (Haghighi et al. 2010).

Diverses caractéristiques de la végétation et de l'utilisation du sol ont été dérivées pour l'ensemble du territoire suisse à différentes échelles temporelles au moyen d'une analyse multitemporelle. Chaque année entre 1985 et 2021 a été utilisée comme référence pour comparer ces analyses. La base de données repose sur des séries temporelles satellitaires de l'indice spectral « Normalized Difference Vegetation Index » (indice de végétation par différence normalisé, NDVI, Rouse et al. 1974) des missions Landsat (depuis 1985) et Sentinel (depuis 2018) (ESA 2023 ; USGS 2023). La résolution spatiale des données Landsat est de 30 x 30 m, celle

des données Sentinel de 10 x 10 m. Le NDVI est un indicateur de la densité et de la productivité de la végétation, l'indice est échelonné entre -1 et 1. D'une manière générale, les valeurs NDVI négatives correspondent à des plans d'eau, les valeurs NDVI faiblement positives à des surfaces très peu végétalisées et les valeurs au-delà à une biomasse de plus en plus importante.

Toutes les données Landsat et Sentinel disponibles ont été agrégées en plusieurs séries matricielles annuelles (Tableau 3). Des fonctions de tendances (médiane, écart-type, estimateur de tendance Theil-Sen) ont été calculées pour chaque année dans ces séries matricielles annuelles. (Sen 1968 ; Wu et al 2014).

En outre, les données Sentinel ont été agrégées sur la base de la moyenne des séries temporelles mensuelles allant de mars à octobre pour les années 2018 à 2021 (Figure 9). La combinaison des données matricielles ainsi produites décrit l'état et l'évolution de la végétation et de l'utilisation du sol pour chaque année depuis 1985 sur plusieurs périodes (Figure 10). Au total, l'analyse multitemporelle des données de télédétection aboutit à environ 500 jeux de données matricielles sur la végétation et l'utilisation du sol couvrant l'ensemble du territoire.

Tableau 3 : Séries temporelles Sentinel et Landsat avec leur agrégation, la référence temporelle et la résolution spatiale.

Source des données	Agrégation	Référence temporelle	Résolution spatiale
Sentinel 2 – NDVI	Moyenne	Mensuel 2018 – 2021	10 m
Sentinel 2 – NDVI	Médiane	Annuel 2017 – 2021	10 m
Landsat – NDVI		Annuel 1985 – 2021	30 m
Sentinel 2 – NDVI	Maximum	Annuel 2017 – 2021	10 m
Landsat – NDVI		Annuel 1985 – 2021	30 m
Sentinel 2 – NDVI	Minimum	Annuel 2017 – 2021	10 m
Landsat – NDVI		Annuel 1985 – 2021	30 m
Sentinel – NDVI	Écart-type	Annuel 2017 – 2021	10 m
Landsat – NDVI		Annuel 1985 – 2021	30 m

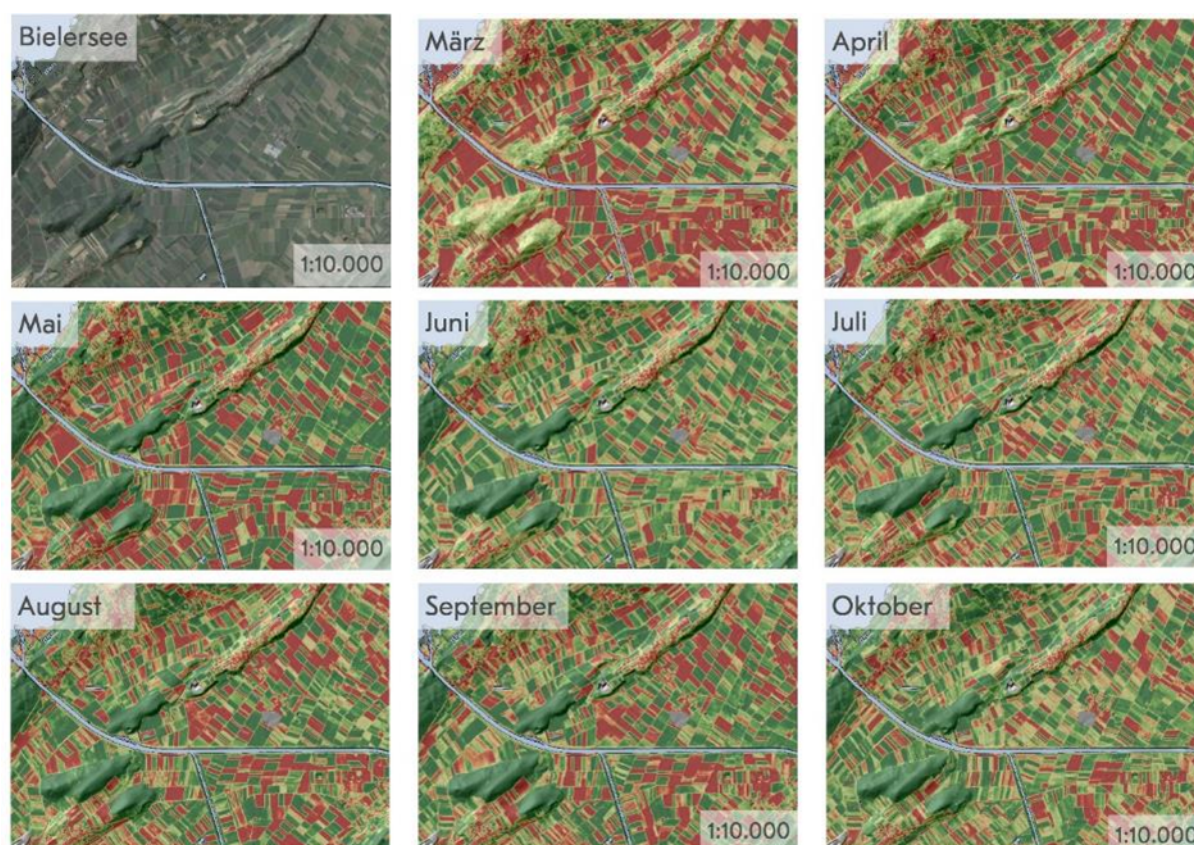


Figure 9 : Exemple : état mensuel de la végétation au sud du lac de Biene en 2021 (analyse de la végétation et de l'utilisation du sol). La série temporelle représentée est basée sur l'indice spectral NDVI des satellites Sentinel 2 (NDVI : Normalized Difference Vegetation Index ; l'échelle de couleurs rouge-jaune-vert correspond à un NDVI de bas à élevé)

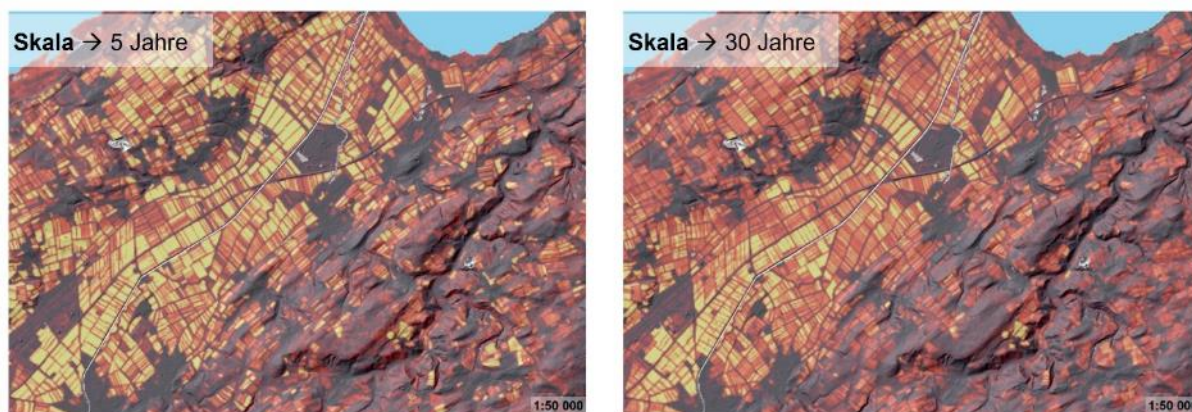


Figure 10 : Exemple : intensité d'utilisation du sol au sud-est du lac de Neuchâtel illustrée grâce à deux échelles temporelles différentes (analyse de la végétation et de l'utilisation du sol). L'intensité d'utilisation du sol est basée sur la moyenne de l'écart-type annuel du NDVI sur 5 ans (à gauche) et sur 30 ans (à droite), année de référence : 2021 (NDVI : Normalized Difference Vegetation Index ; l'échelle de couleurs violet-rouge-jaune correspond à une intensité d'utilisation du sol de basse à élevée).

Données pédologiques spectrales —

« Bare Soil »

Les propriétés physiques et chimiques du matériau parental sont un important facteur pédogénétique (Loiseau et al. 2020). La minéralogie, la granulométrie et la couleur sont étroitement liées à la signature spectrale du sol sans végétation (Gray et al., 2016). La réalisation de cartes à l'échelle du territoire montrant la signature spectrale du sol nu (« bare soil ») peut améliorer la prévision spatiale de propriétés des sols, et ce, en particulier pour la couche supérieure du sol.

La signature spectrale du sol des surfaces agricoles suisses a été déduite à partir de données satellitaires. Les séries temporelles des missions Landsat depuis 1985 avec une résolution spatiale de 30 x 30 m (USGS 2023) ont servi de base de données. Pour ces séries, les indices spectraux NDVI (Rouse et al. 1974) et NBR2 (Normalized Burn Ratio 2 ; Garcia and Caselles 1991) ont également été dérivés et servent d'informations complémentaires. Le NBR2 est notamment utilisé pour des questions relatives à la litière, à l'humidité et à la texture du sol (Demattê et al., 2018). L'indice est échelonné de -1 à 1 et calculé sur la base des bandes spectrales de l'infrarouge à ondes courtes.

La combinaison des indices spectraux NDVI et NBR2 permet d'identifier les surfaces de sol nu et de filtrer en conséquence les séries temporelles matricielles. Comme les terres agricoles ne sont pas simultanément sans végétation, les séries temporelles ont été agrégées (Figure 11). Toutes les surfaces ayant été temporairement dépourvues de végétation sur la période allant de 1985 à 2021 sont prises en considération. Pour les surfaces recouvertes en permanence de végétation depuis 1985 (p. ex. forêts), la signature spectrale a été modélisée au moyen de l'apprentissage automatique à partir de toutes les cellules de la matrice pour lesquelles les NDVI et NBR2 étaient disponibles. Le résultat se présente sous la forme de 8 jeux de données matricielles (Tableau 4).

Tableau 4 : Jeux de données spectrales pour le sol nu (« bare soil »).

Canal spectral	Longueur d'onde [nm]	Calcul de l'indice
BLUE	482 – 485	-
GREEN	560 – 569	-
RED	655 – 662	-
NIR	835 – 865	-
SWIR1	1609 – 1676	-
SWIR2	2206 – 2223	-
RGBindex		$RED * 65636 + GREEN * 256 + BLUE$
NDVI		$(NIR - RED) / (NIR + RED)$
NBR2		$(SWIR1 - SWIR2) / (SWIR1 + SWIR2)$

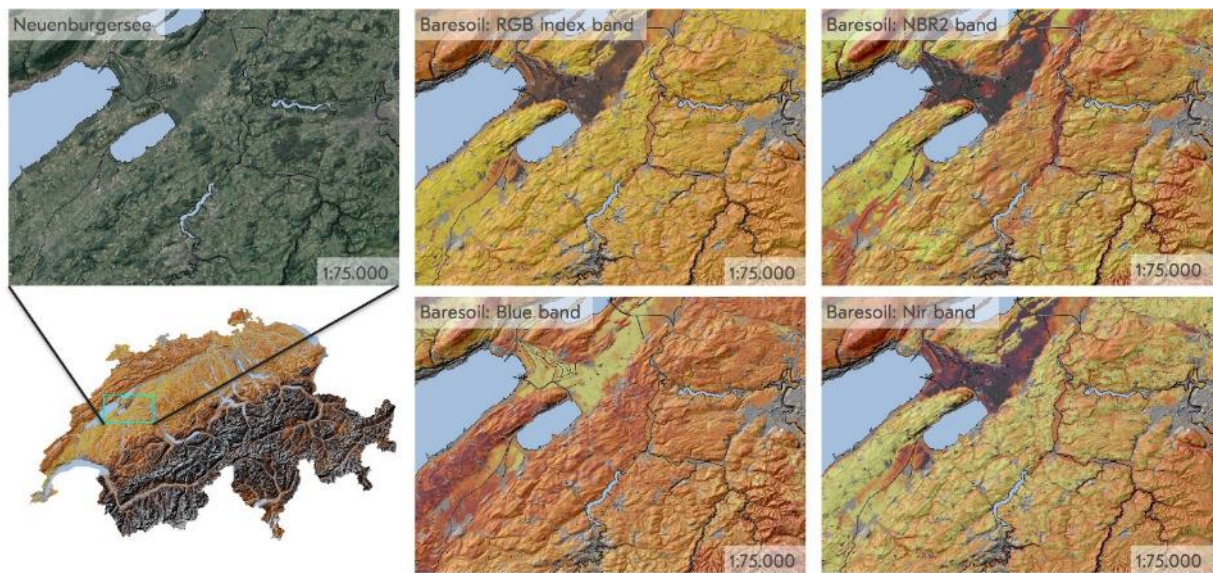


Figure 11 : Indices spectraux pour le sol nu (« bare soil »). Les illustrations représentent : le canal spectral « RGB index » pour l'ensemble de la Suisse (en bas à gauche), ainsi que les canaux spectraux « RGB index » (en haut au centre), « BLUE » (en bas au centre), « NBR2 » (en haut à droite) et « NIR » (en bas à droite) pour la région du sud-est du lac de Neuchâtel. Plus d'explications sur les abréviations : cf. texte et Tableau 4.

Modélisation spatiale
des propriétés des sols

Les variables cibles de la cartographie numérique sont les propriétés pédologiques mesurées en laboratoire du Fichier de données pédologiques de Suisse version V6 (argile, limon, sable et teneur en carbone ainsi

que pH et capacité d'échange cationique). Les covariables utilisées pour la modélisation spatiale comprennent les variables environnementales matricielles disponibles à l'échelle du territoire sur le relief, le climat, la végétation et l'utilisation du sol, ainsi que

des informations spectrales sur les sols (cf. chapitre 2 ; total $n = 668$ covariables).

La conception du modèle repose sur le modèle ensembliste non paramétrique « Quantile Regression Forest » (QRF, Breiman, 2001 ; Meinshausen, 2006). Le principe consiste à générer par un algorithme un grand nombre d'arbres de décision randomisés, dont les nœuds finaux comprennent la répartition statistique complète des variables cibles. Des quantiles sont déduits en tant que prévisions finales et en tant qu'intervalles de prévision sur la base de ces répartitions en ensembles. La randomisation repose sur des sous-ensembles des données de calibrage établis de manière aléatoire et sur un choix aléatoire d'un sous-ensemble des covariables, qui est testé pour chaque bifurcation (nœuds) d'un arbre de décision. Le sous-ensemble des données de calibrage qui n'est pas utilisé pour calibrer le modèle (out-of-bag, données OOB) permet une évaluation interne. Celle-ci est basée sur le calcul de l'écart quadratique moyen en tant que moyenne de tous les arbres décisionnels (erreur OOB). La prévision finale est faite à partir de la médiane de la distribution statistique dans les nœuds finaux des arbres de décision. L'incertitude de prévision se base sur l'intervalle de prévision à 90 %, défini par le centile 5% et 95% de la distribution dans les nœuds finaux. Elle est exprimée de manière relative par rapport à la prévision (RPI : « Relative Prediction Interval »).

Un modèle distinct intégrant la profondeur comme covariable supplémentaire a été élaboré pour chaque propriété pédologique.

Cela permet d'établir des prévisions et des incertitudes de prévision pour chaque niveau de profondeur sur la base d'un seul modèle.

La validation a été réalisée au moyen d'une approche « split data » en cinq répétitions. Dans un premier temps, le jeu de données a été stratifié par niveau de profondeur (0 – 30 cm; 30 – 60 cm; 60 – 120 cm) et par couverture du sol (« terres assolées », « herbages », « forêt ») pour chaque propriété pédologique. Ensuite, un sous-ensemble aléatoire des données validées a été sélectionné dans chaque strate selon un rapport de 20 % (validation) à 80 % (entraînement). Le modèle a été calibré à l'aide des données d'entraînement, les paramètres du modèle étant optimisés au moyen de l'erreur OOB et d'une approche « Grid-Tuning ». Les données de validation indépendantes ont été utilisées pour déterminer la qualité, respectivement l'incertitude de prévision. Les paramètres utilisés pour définir la qualité des prévisions sont le « Root Mean Square Error » (RMSE) et le coefficient de détermination (R^2), l'incertitude étant déterminée quant à elle avec le RPI. Cette procédure a été répétée cinq fois afin d'analyser la variabilité des paramètres et de calculer un modèle final. La résolution spatiale des prévisions finales est de 90 x 90 m.

Le modèle tel qu'il est conçu permet d'analyser l'influence des covariables susmentionnées sur les prévisions des différentes propriétés pédologiques (feature importance). Une analyse « feature importance » permet de tirer des conclusions importantes sur les

covariables qui contribuent le plus à la variation spatiale d'une propriété pédologique. Etant donné le nombre élevé de covariables, celles-ci ont été regroupées selon les thèmes présentés plus haut (cf. point 2.3).

L'influence des groupes de variables respectifs sur la prévision d'une propriété pédologique résulte de la comparaison entre l'erreur OOB du modèle initial et l'erreur OOB des modèles dans lesquels les covariables ont été permutées de façon aléatoire (Gregorutti et al. 2015).

3. Cartes indicatives des propriétés des sols

Teneur en argile (clay)

La qualité/l'incertitude de prévision des cartographies numériques pour les teneurs en argile sur l'ensemble des profondeurs et des couvertures du sol présente un R^2 de 0,7, une RMSE de 6,06 et un RPI de 0,89. La qualité de prévision la plus élevée et l'incertitude de prévision la plus basse du modèle pour les niveaux de profondeur est atteinte avec la profondeur de 30-60 cm, suivie des profondeurs 0-30 cm et 60-120 cm. En ce qui concerne la couverture du sol, les meilleurs résultats sont obtenus pour les terres assolées, suivies des herbages et de la forêt. Les covariables se rapportant au terrain et au climat ont une plus grande influence sur la qualité des prévisions que celles relatives au « bare soil » et à l'utilisation du sol (Figure 12a).

La modélisation des teneurs en argile de la couche supérieure du sol montre une distribution spatiale entre les régions du Jura, du Plateau, du versant nord des Alpes, des Alpes centrales orientales et occidentales et du versant sud des Alpes. Les teneurs en argile les plus élevées (plus de 25 %) se rencontrent majoritairement dans le Jura et dans la zone des prairies alpines du versant nord des Alpes.

Les teneurs les plus faibles (moins de 20 %) se trouvent dans les Alpes centrales occidentales et dans la zone du versant sud des Alpes. Sur le Plateau, les teneurs en argile varient entre 20 % et 30 % (Figure 12b).

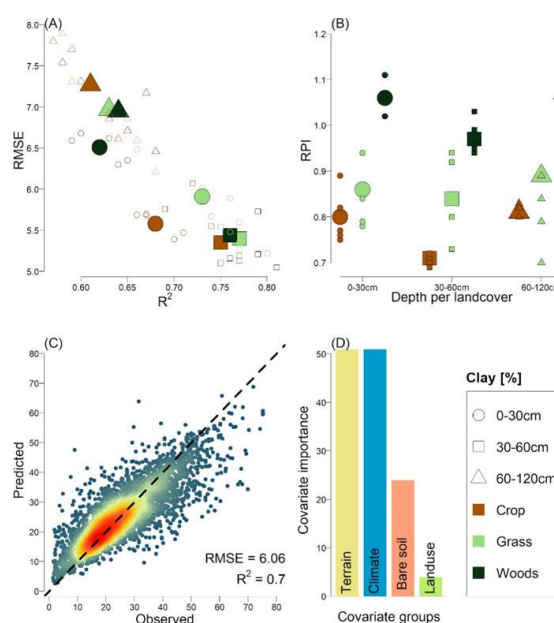


Figure 12a : Validation du modèle pour les teneurs en argile (clay). (A) et (B) : qualité (RMSE ; R^2) et incertitude (RPI) de prévision pour des profondeurs et des couvertures du sol distinctes (les petits symboles indiquent les résultats de la modélisation, les grands symboles leur moyenne). (C) : carte de chaleur (heatmap) des prévisions (Predicted) par rapport aux données de validation (Observed) pour toutes les profondeurs et toutes les couvertures du sol. (D) : influence des groupes de covariables sur la prévision.

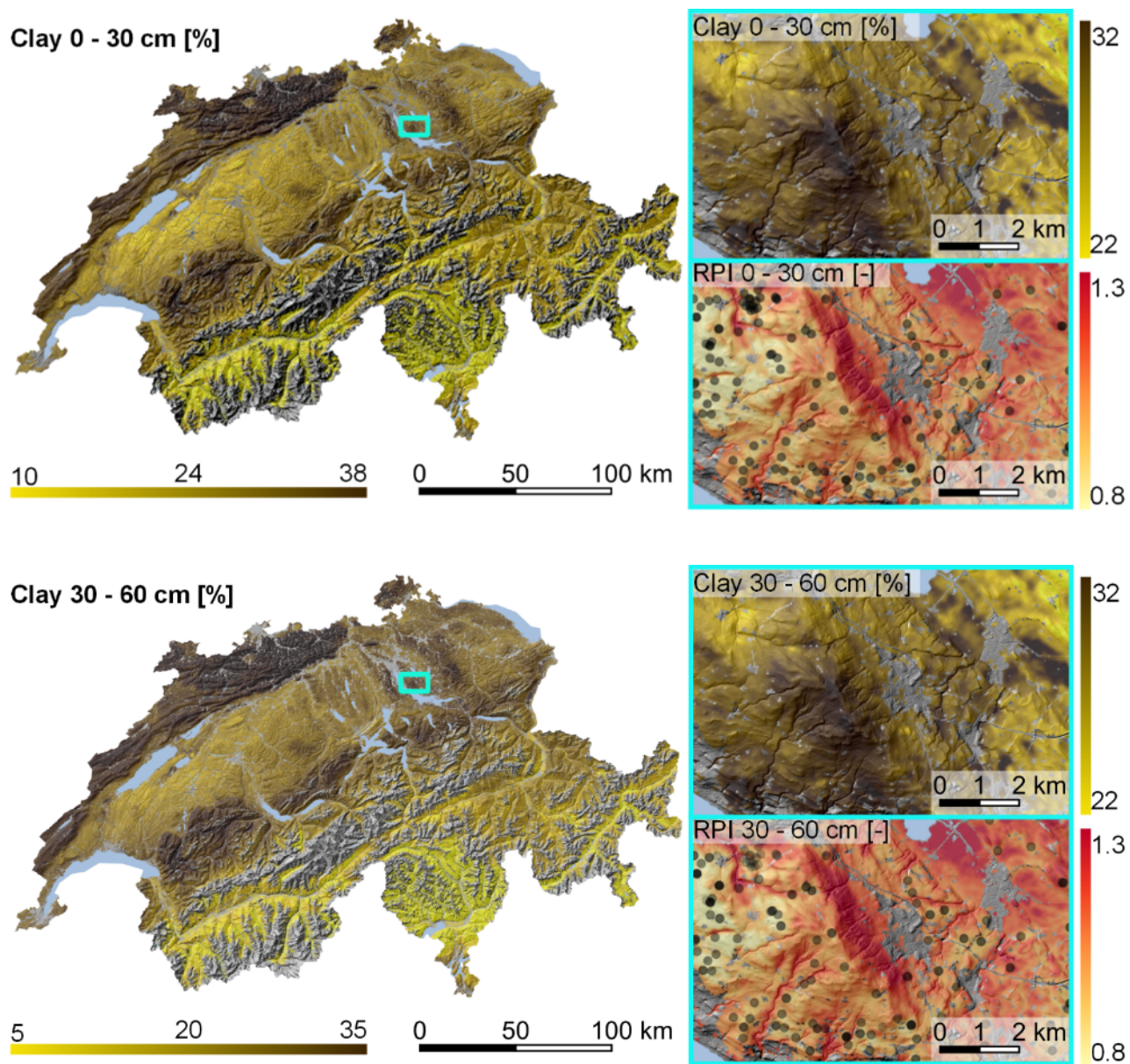


Figure 12b : Carte indicative de la teneur en argile (clay) à l'échelle du pays pour deux profondeurs et, à titre d'exemple, pour un extrait de l'Oberland zurichoises (prévision et incertitude de prévision RPI).

Teneur en limon (silt)

La qualité/l'incertitude de prévision des cartographies numériques pour les teneurs en limon sur l'ensemble des profondeurs et des couvertures du sol présente un R^2 de 0,66, une RMSE de 6,39 et un RPI de 0,65. La qualité de prévision la plus élevée du modèle pour les niveaux de profondeur est atteinte avec la profondeur de 30-60 cm, suivie de 0-30 cm et de 60-120 cm. Les différences de l'incertitude de prévision sont marginales pour toutes les profondeurs. En ce qui concerne la couverture du sol, le modèle fournit les meilleurs résultats pour les terres associées, alors que les qualités de prévision baissent légèrement et les incertitudes augmentent pour les herbages et la forêt. Les covariables se rapportant au terrain et au climat ont une plus grande influence sur la qualité de prévision que celles relatives au « bare soil » et à l'utilisation du sol (Figure 13a).

La distribution spatiale des teneurs en limon modélisées de la couche supérieure du sol montre que les valeurs les plus faibles (moins de 30 %) se situent dans la zone du versant sud des Alpes, des Alpes centrales orientales et dans certaines parties de l'ouest du Plateau. Les zones des Alpes centrales occidentales, du versant nord des

Alpes, de l'est du Plateau et du Jura présentent en général des teneurs en limon de 30 à 40 % plus élevées. Localement, les teneurs peuvent dépasser les 40 %, surtout dans certaines parties de l'est et du nord du Jura (Figure 13b).

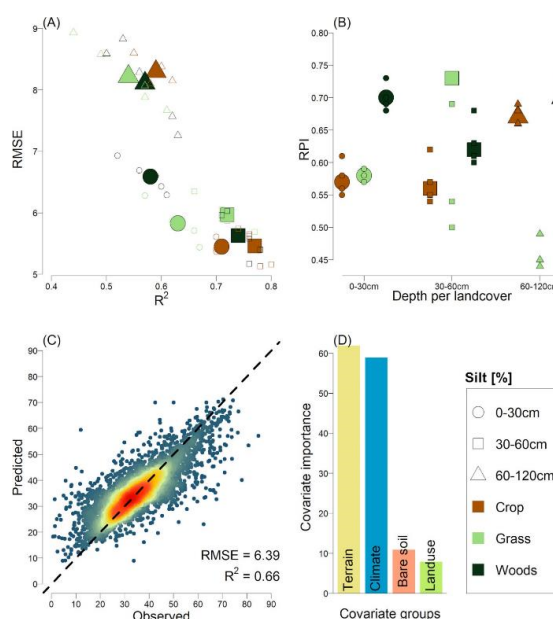


Figure 13a : Validation du modèle pour les teneurs en limon (silt). (A) et (B) : qualité (RMSE ; R^2) et incertitude (RPI) de prévision pour des profondeurs et des couvertures du sol distinctes (les petits symboles indiquent les résultats de la modélisation, les grands symboles leur moyenne). (C) : carte de chaleur (heatmap) des prévisions (Predicted) par rapport aux données de validation (Observed) pour toutes les profondeurs et couvertures du sol. (D) : influence des groupes de covariables sur la prévision.

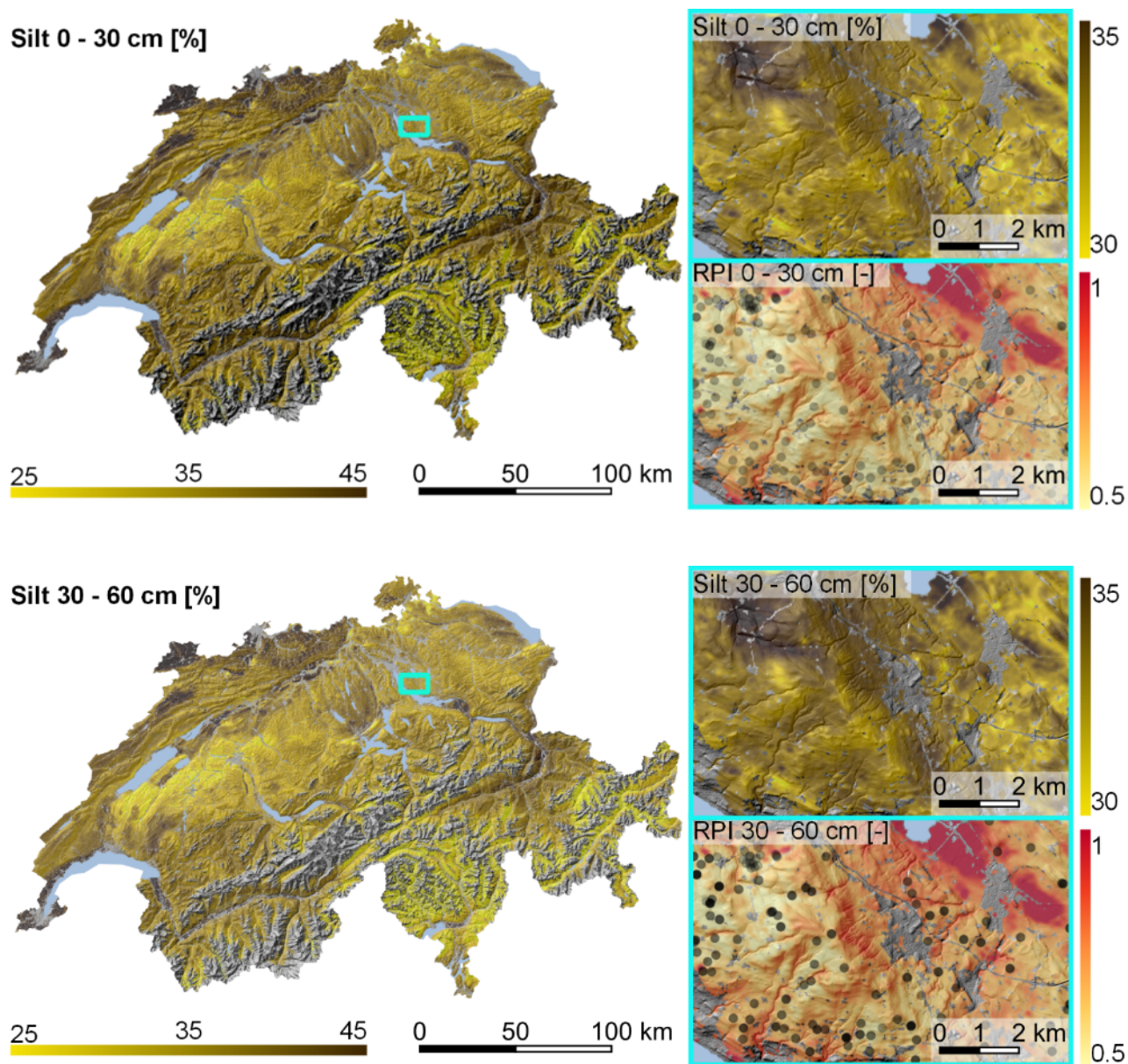


Figure 13b : Carte indicative de la teneur en limon (silt) à l'échelle du pays pour deux profondeurs et, à titre d'exemple, pour un extrait de l'Oberland zurichoises (prévision et incertitude de prévision RPI).

Teneur en sable (sand)

La qualité/l'incertitude de prévision des cartographies numériques pour les teneurs en sable sur l'ensemble des profondeurs et des couvertures du sol présente un R^2 de 0,76, une RMSE de 8,59 et un RPI de 0,96. La qualité de prévision la plus élevée du modèle pour les niveaux de profondeur est atteinte avec la profondeur de 30-60 cm, suivie de 0-30 cm et de 60-120 cm. Cette tendance est en opposition avec l'incertitude de prévision ; les différences entre les profondeurs sont toutefois marginales. En ce qui concerne la couverture du sol, ce sont les terres assolées qui présentent les qualités de prévision les plus élevées, suivies des herbages et de la forêt. Quant aux incertitudes de prévision, elles sont les plus élevées chez les herbages, alors que les terres assolées et la forêt affichent des valeurs moindres. Les covariables se rapportant au terrain et au climat ont une plus grande influence sur le modèle que celles relatives au « bare soil » et à l'utilisation du sol (Figure 14a).

La distribution spatiale des teneurs en sable modélisées de la couche supérieure du sol montre que les valeurs les plus faibles (moins de 25 %) se situent dans la zone de l'est et du nord du Jura. Sur le Plateau, le versant nord des Alpes et dans certaines parties des Alpes centrales orientales, les teneurs en sable augmentent et atteignent de 25% à 50%, avec des valeurs en général plus basses dans la zone des prairies alpines. C'est dans la zone des Alpes centrales occidentales et du versant sud des Alpes que les

teneurs en sable sont les plus élevées. Elles peuvent dépassées les 50 % (Figure 14b).

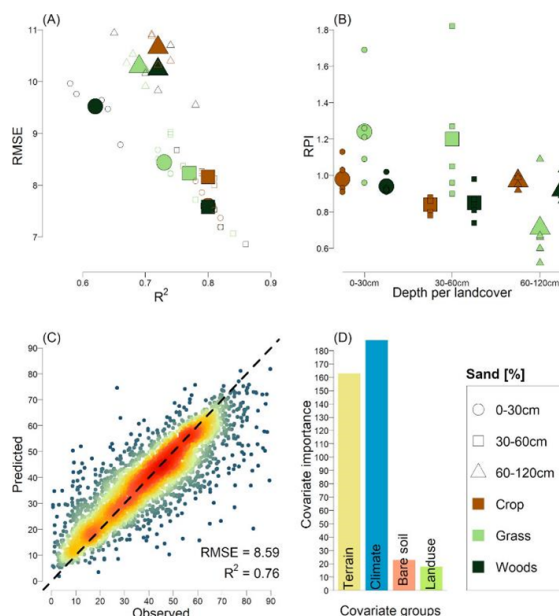


Figure 14a : Validation du modèle pour les teneurs en sable (sand). (A) et (B) : qualité (RMSE ; R^2) et incertitude (RPI) de prévision pour des profondeurs et des couvertures du sol distinctes (les petits symboles indiquent les résultats de la modélisation, les grands symboles leur moyenne). (C) : carte de chaleur (heatmap) des prévisions (Predicted) par rapport aux données de validation (Observed) pour toutes les profondeurs et couvertures du sol. (D) : influence des groupes de covariables sur la prévision.

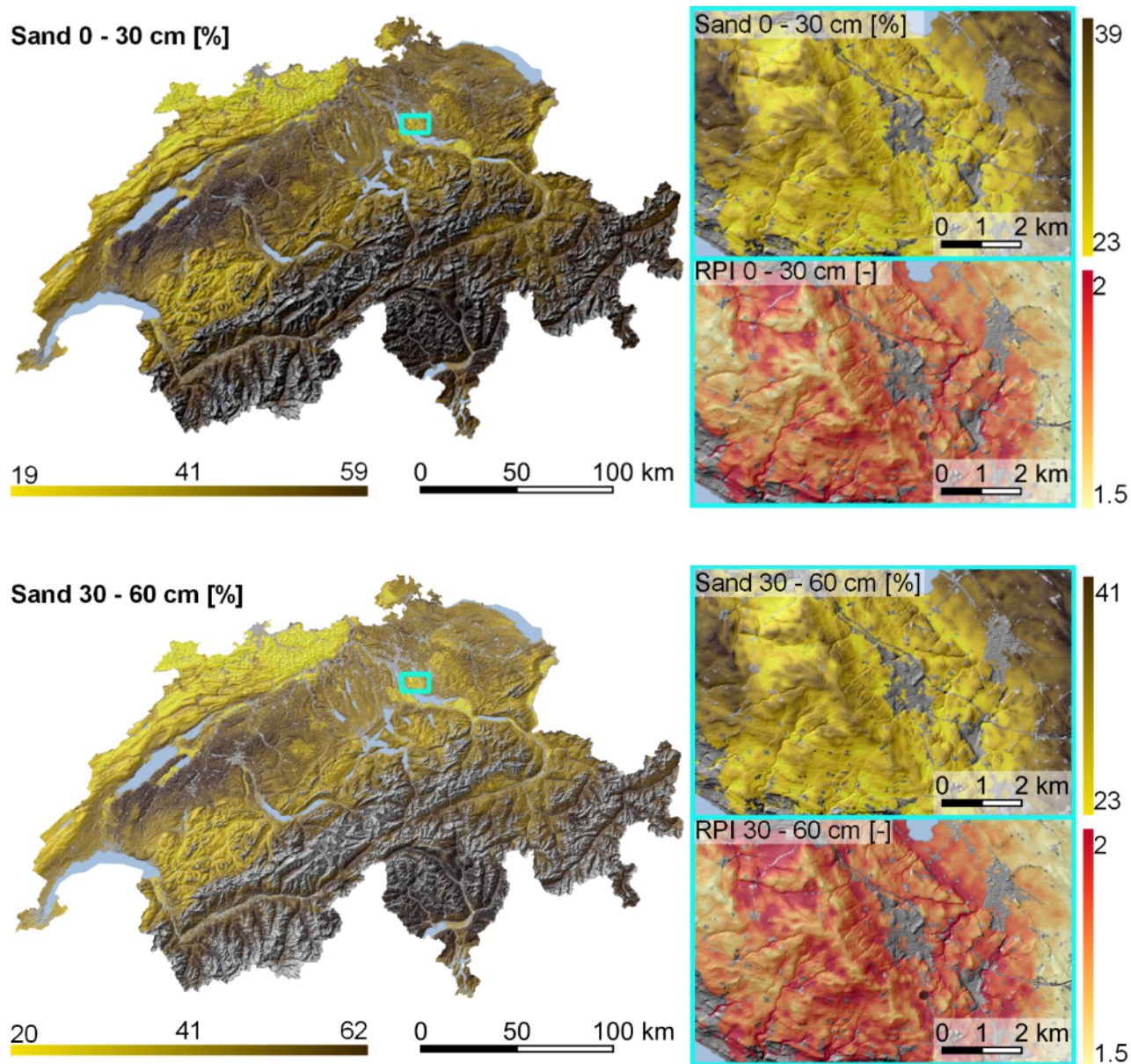


Figure 14b : Carte indicative de la teneur en sable (sand) à l'échelle du pays pour deux profondeurs et, à titre d'exemple, pour un extrait de l'Oberland zurichoises (prévision et incertitude de prévision RPI).

Teneur en carbone (SOC)

La qualité/l'incertitude de prévision des cartographies numériques pour les teneurs en carbone sur l'ensemble des profondeurs et des couvertures du sol présente un R^2 de 0,64, une RMSE de 1,06 et un RPI de 3,04. La qualité de prévision la plus élevée (valeurs R^2) du modèle pour les niveaux de profondeur est atteinte avec la profondeur de 0-30 cm, suivie de 30-60 cm et de 60-120 cm. En revanche, selon l'évaluation avec la RMSE, c'est la couche sous-jacente du sol qui atteint les meilleurs résultats. Les incertitudes de prévision suivent la tendance des valeurs R^2 . En ce qui concerne la couverture du sol, la meilleure qualité de prévision du modèle selon les valeurs R^2 est atteinte avec les herbages, suivis des terres assolées et de la forêt. Avec la RMSE, les terres assolées présentent une meilleure qualité que les herbages, l'incertitude de prévision suit la même tendance. Les covariables se rapportant au « bar soil » et au terrain ont une plus grande influence sur la qualité de prévision que celles relatives au climat et à l'utilisation du sol (Figure 15a).

La distribution spatiale des teneurs en carbone modélisées de la couche supérieure du sol montre que les valeurs les plus basses (moins de 2 %) se trouvent en principe sur le Plateau. Les terres assolées affichent généralement des valeurs plus basses que les herbages. Les teneurs de la couche supérieure du sol sont légèrement plus élevées dans le Jura que sur le Plateau où elles varient en moyenne entre 2 et 3 %. Les sols dans les zones du versant nord des Alpes,

des Alpes centrales et du versant sud des Alpes tendent à présenter des valeurs plus élevées que sur le Plateau (Figure 15b).

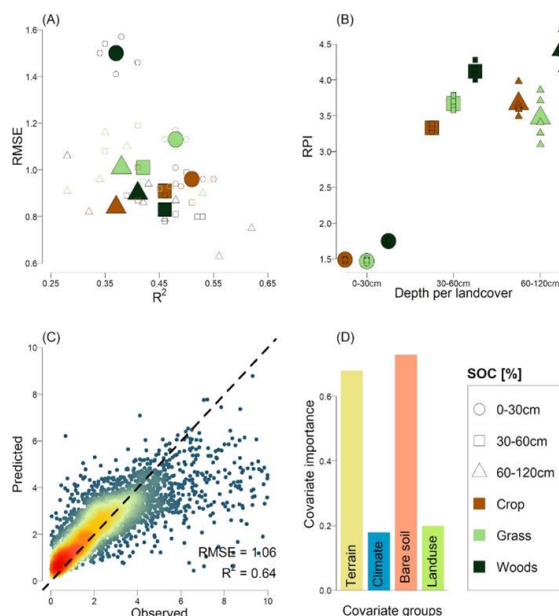


Figure 15a : Validation du modèle pour les teneurs en carbone (SOC). (A) et (B) : qualité (RMSE ; R^2) et incertitude (RPI) de prévision pour des profondeurs et des couvertures du sol distinctes (les petits symboles indiquent les résultats de la modélisation, les grands symboles leur moyenne). (C) : carte de chaleur (heatmap) des prévisions (Predicted) par rapport aux données de validation (Observed) pour toutes les profondeurs et couvertures du sol. (D) : influence des groupes de covariables sur la prévision.

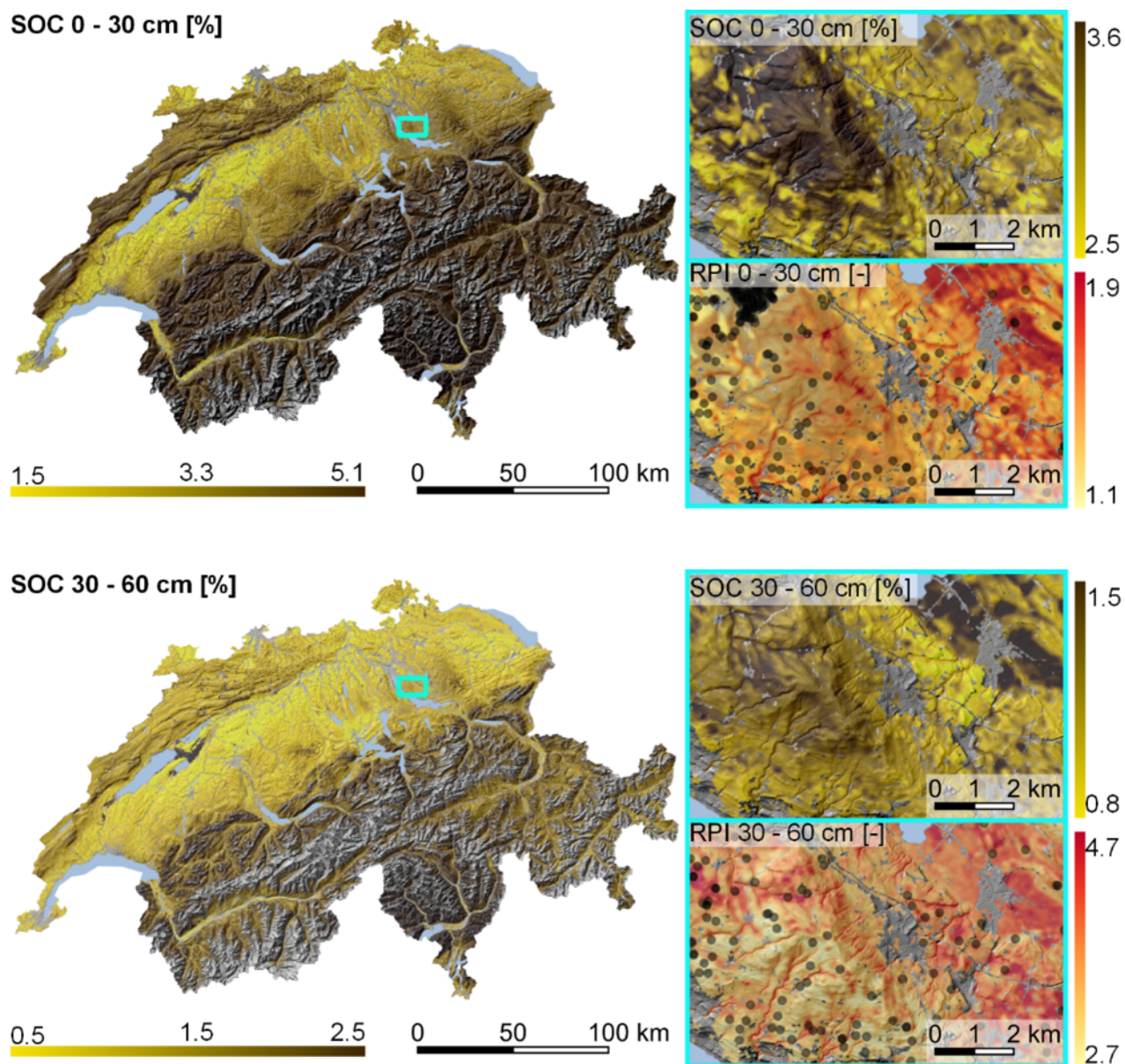


Figure 15b : Carte indicative de la teneur en carbone (SOC) à l'échelle du pays pour deux profondeurs et, à titre d'exemple, pour un extrait de l'Oberland zurichoises (prévision et incertitude de prévision RPI).

pH

La qualité/l'incertitude de prévision des cartographies numériques pour le pH sur l'ensemble des profondeurs et des couvertures du sol présente un R^2 de 0,77, une RMSE de 0,55 et un RPI de 0,39. La qualité de prévision la plus élevée pour les niveaux de profondeur est atteinte avec la profondeur de 30-60 cm, suivie de 60-120 cm et de 0-30 cm. En revanche, l'incertitude de prévision est la plus forte à la profondeur de 60-120 cm, suivie de 0-30 cm et de 30-60 cm.

En ce qui concerne la couverture du sol, les différences de qualité de prévision selon les valeurs R^2 sont marginales. Avec la RMSE, ce sont les terres assolées qui affichent la meilleure qualité de prévision devant les herbages et la forêt, l'incertitude de prévision suit la même tendance. Les covariables se rapportant au terrain et à l'utilisation du sol ont une plus grande influence sur la qualité de prévision que celles relatives au « bare soil » et au climat (Figure 16a).

Dans la zone du Jura occidental, les valeurs de pH se situent entre 4,5 et 6. Les valeurs de pH les plus élevées (plus de 6) se trouvent dans le Jura occidental et dans les surfaces agricoles du Plateau, du versant nord des Alpes et des Alpes centrales (Figure 16b). La distribution spatiale des valeurs de pH modélisées de la couche supérieure du sol est clairement liée à la couverture du sol. Les régions entièrement boisées du versant

sud des Alpes, certaines parties du Plateau ainsi que les zones d'altitude des Alpes centrales et du versant nord des Alpes présentent les valeurs de pH les plus basses (moins de 4,5).

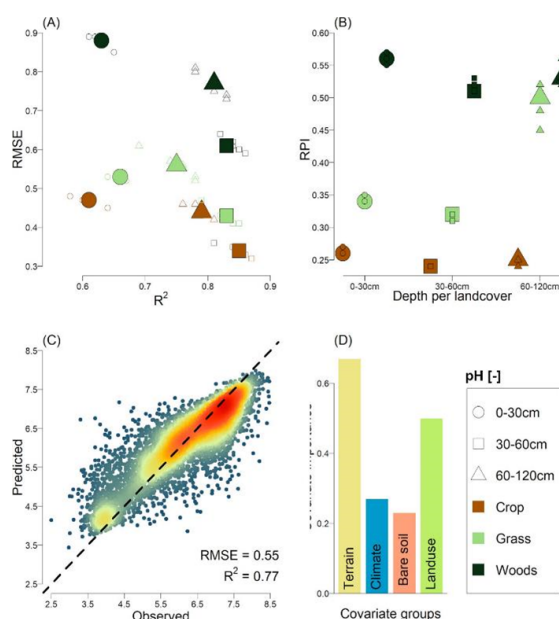


Figure 16a : Validation du modèle pour le pH. (A) et (B) : qualité (RMSE ; R^2) et incertitude (RPI) de prévision pour des profondeurs et des couvertures du sol distinctes (les petits symboles indiquent les résultats de la modélisation, les grands symboles leur moyenne). (C) : carte de chaleur (heatmap) des prévisions (Predicted) par rapport aux données de validation (Observed) pour toutes les profondeurs et couvertures du sol. (D) : influence des groupes de covariables sur la prévision.

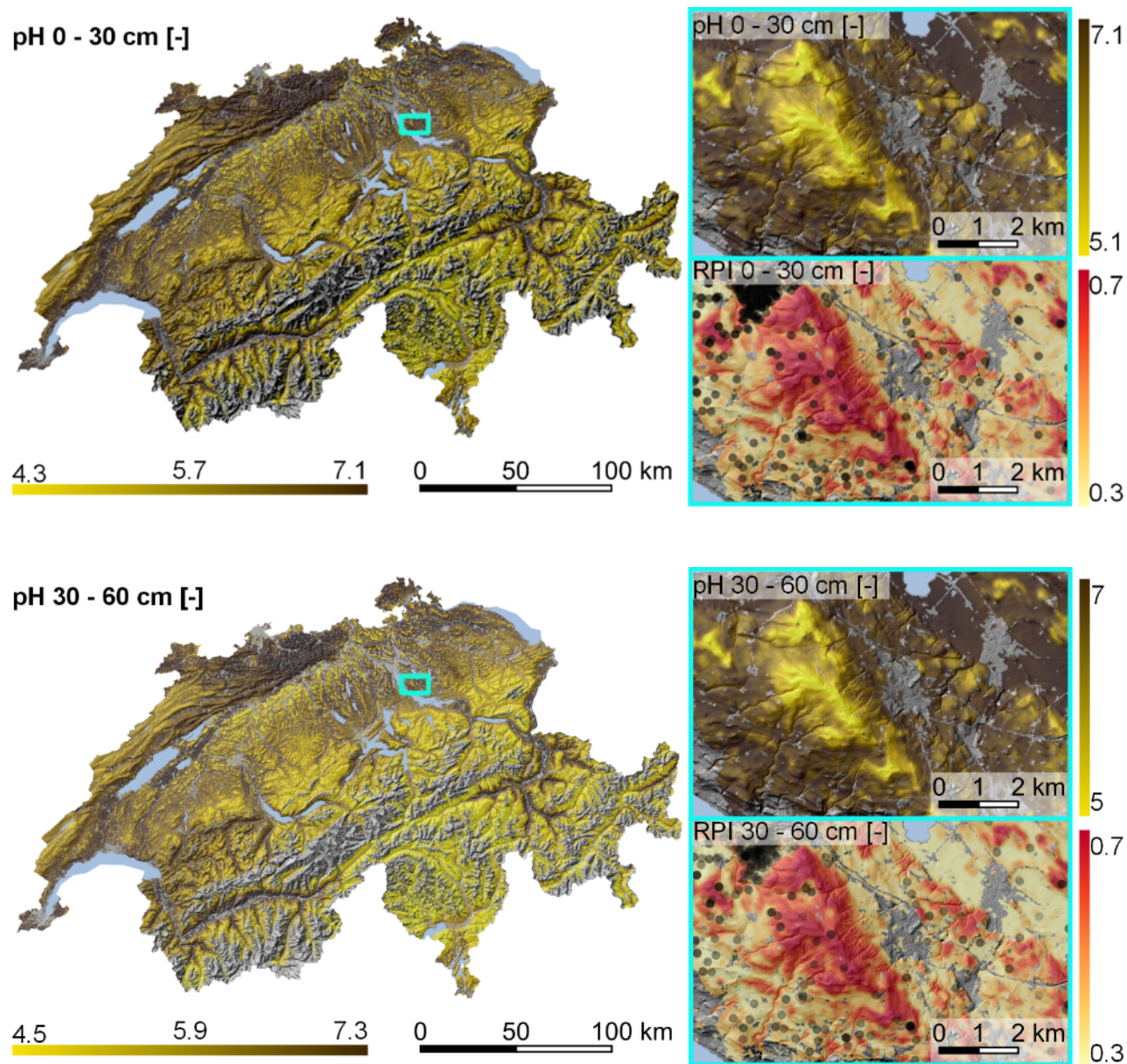


Figure 16b : Carte indicative du pH à l'échelle du pays pour deux profondeurs et, à titre d'exemple, pour un extrait de l'Oberland zurichoises (prévision et incertitude de prévision RPI).

Capacité d'échange cationique potentielle (CEC_{pot})

La qualité/l'incertitude de prévision des cartographies numériques pour la capacité d'échange cationique potentielle sur l'ensemble des profondeurs et des couvertures du sol présente un R^2 de 0,7, une RMSE de 49,55 et un RPI de 1,31. La qualité de prévision la plus élevée (valeur R^2) du modèle pour les niveaux de profondeur est atteinte avec la profondeur de 0-30 cm, suivie de 30-60 cm et de 60-120 cm. La RMSE relève la qualité de prévision la plus élevée à 30-60 cm et la plus basse à 0-30 cm. L'incertitude de prévision est la plus faible à 0-30 cm et à 60-120 cm. En ce qui concerne la couverture du sol, le modèle présente la meilleure qualité de prévision dans les terres assolées, suivies des herbages et de la forêt. Quant à l'incertitude de prévision, c'est dans les herbages qu'elle est la plus élevée. Les covariables se rapportant au terrain et au « bare soil » ont une plus grande influence sur la qualité de prévision que celles relatives à l'utilisation du sol et au climat (Figure 17a).

La distribution spatiale de la capacité d'échange cationique potentielle modélisée de la couche supérieure du sol montre que c'est dans les zones d'agriculture intensive du Plateau et des grandes vallées alpines du sud de la Suisse que les valeurs sont les plus basses (moins de 200 mmol_ckg⁻¹).

Dans le Jura et les prairies du versant nord des Alpes, les valeurs se situent entre 200 et 250 mmol_ckg⁻¹. Les valeurs les plus élevées se trouvent dans les régions d'altitude du versant nord des Alpes, des Alpes centrales et du versant sud des Alpes (Figure 17b).

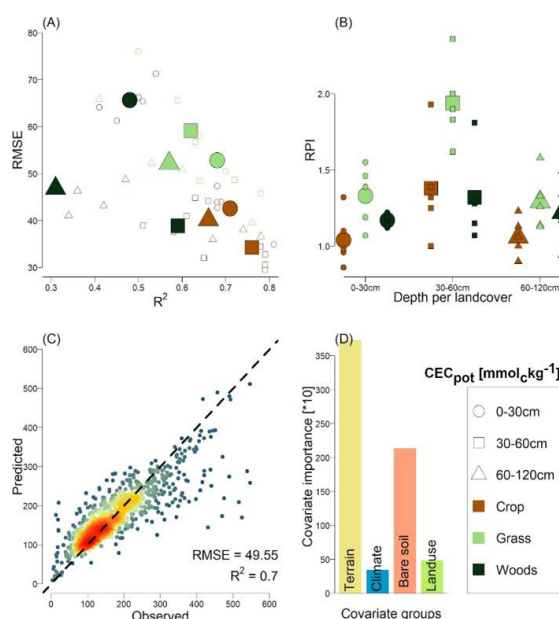


Figure 17a : Validation du modèle pour la capacité d'échange cationique potentielle (CEC_{pot}). (A) et (B) : qualité (RMSE ; R^2) et incertitude (RPI) de prévision pour des profondeurs et des couvertures du sol distinctes (les petits symboles indiquent les résultats de la modélisation, les grands symboles leur moyenne). (C) : carte de chaleur (heatmap) des prévisions (Predicted) par rapport aux données de validation (Observed) pour toutes les profondeurs et couvertures du sol. (D) : influence des groupes de covariables sur la prévision.

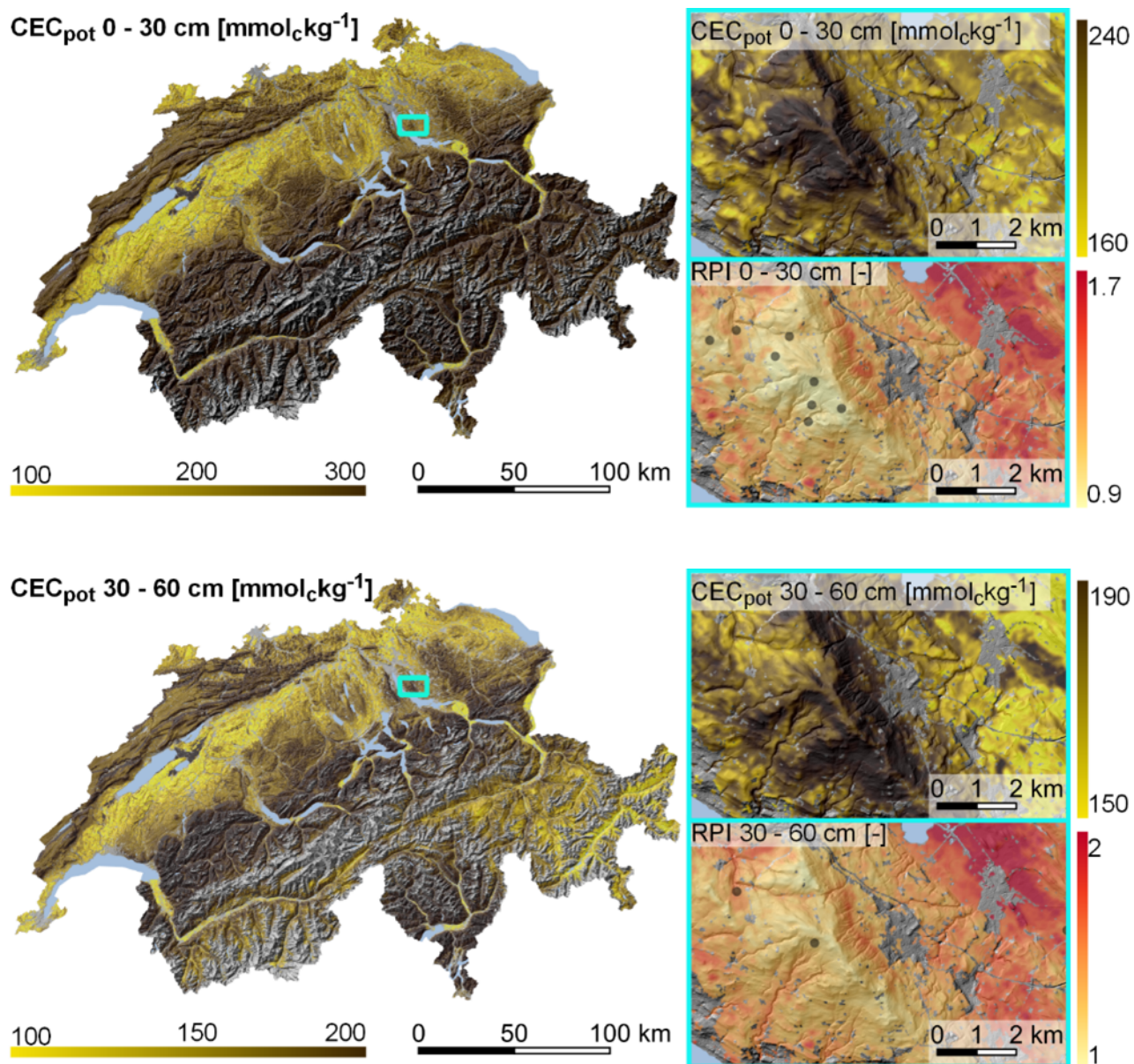


Figure 17b : Carte indicative de la capacité d'échange cationique potentielle (CEC_{pot}) à l'échelle du pays pour deux profondeurs et, à titre d'exemple, pour un extrait de l'Oberland zurichoises (prévision et incertitude de prévision RPI).

4. Mise en perspective des résultats

La qualité de prévision en comparaison internationale

Au cours des trois dernières décennies, les méthodes de cartographie numériques ont de plus en plus souvent été utilisées au niveau mondial et régional pour fournir des informations pédologiques à large échelle pouvant être actualisées et interprétées. Dans une étude de synthèse internationale, Chen et al. (2022) ont analysé 244 études consacrées à des cartographies numériques des sols de régions étendues (plus de 10000 km²) réalisées entre 2003 et 2021.

Les résultats de l'étude de synthèse permettent de conclure que les qualités de prévision de la présente étude se situent dans la zone supérieure pour toutes les propriétés pédologiques. Comparée à la médiane des qualités de prévision des 244 études, la qualité de prévision est du même ordre de grandeur pour la carte indicative de la SOC et nettement supérieure pour les cartes indicatives des autres propriétés pédologiques.

Tableau 5 : Comparaison des qualités des prévisions de la présente étude (R^2 - Suisse) avec la médiane des études à l'échelle mondiale portant sur des régions étendues (> 10000 km²) menées entre 2003 et 2021 (R^2 – médiane des études à l'échelle mondiale) pour la profondeur de 0-30 cm (cf. Chen et al., 2022).

Propriété du sol	R^2 - Suisse	R^2 - médiane études à l'échelle mondiale	Variation
Argile	0.69	0.50	+28%
Limon	0.65	0.50	+23%
Sable	0.75	0.50	+33%
SOC	0.50	0.49	+2%
pH	0.70	0.60	+14%
CEC _{pot}	0.71	0.37	+45%

Densité d'échantillonnage et qualité de prévision

La densité spatiale des sites d'échantillonnage est très hétérogène sur tout le territoire suisse et pour toutes les propriétés des sols analysés. La densité d'échantillonnage la plus élevée est atteinte avec le pH (0,55 par km² en moyenne), alors que celles des propriétés texturales (teneur en argile, en limon et en sable) et de la teneur en carbone (SOC) varient entre 0,25 et 0,35 par km². C'est la capacité d'échange cationique potentielle qui affiche la densité d'échantillonnage la plus basse (0,06 par km²). Pour toutes les propriétés des sols, les densités d'échantillonnage sont en moyenne cinq fois plus élevées dans les terres assolées que dans les herbages et les forêts (Tableau 1). D'autre part, la densité spatiale des sites d'échantillonnage est relativement élevée sur le Plateau et dans certaines parties du nord du Jura, alors que le sud du Jura, le versant nord des Alpes, les Alpes centrales et le versant sud des Alpes présentent une densité d'échantillonnage nettement plus faible (Figures 1 à 6). La qualité prévisionnelle de la cartographie numérique des sols doit tenir compte de l'hétérogénéité spatiale de la densité d'échantillonnage. Plus cette dernière est élevée, plus la qualité prévisionnelle est bonne. Les résultats de la présente étude le confirment, puisque la qualité s'améliore globalement lorsque la densité d'échantillonnage (forêts — herbages — terres assolées) et pour les profondeurs de

60-120 cm et 0-30 cm par rapport à 30-60 cm (Figures 12a à 17a).

Profondeur et sols organiques

Dans de nombreuses régions de Suisse, surtout dans le Jura, sur le versant nord des Alpes, dans les Alpes centrales et sur le versant sud des Alpes, la profondeur des sols est souvent inférieure à 120 cm. La présente version de la cartographie numérique, basée sur trois profondeurs 0-30 cm, 30-60 cm et 60-120 cm, ne peut pas (encore) reproduire la profondeur effective des sols, faute de données plus détaillées. Cela limite l'utilisation des cartes indicatives en particulier dans les régions aux sols superficiels. Il convient d'en tenir compte lors de l'interprétation des cartes indicatives, surtout pour la profondeur 60-120 cm.

D'autre part, la cartographie numérique des teneurs en carbone ne fait pas de différence entre sols minéraux et organiques. Dans la version actuelle, les modèles prévisionnels se limitent aux sols minéraux, car pour les sols organiques, la densité d'échantillonnage est disproportionnellement faible. Il s'ensuit que la qualité de prévision pour les sols organiques est sensiblement réduite par rapport aux sols minéraux, même si la variation spatiale des teneurs en carbone est décrite de manière plausible. On estime que les sols organiques représentent moins de 5% de la surface des sols en Suisse (Wüst-Galley et al. 2015).

Perspectives

À l'avenir, les cartes indicatives des propriétés des sols seront actualisées en fonction des mises à jour régulières du Fichier de données pédologiques de Suisse NABODAT ainsi que des actualisations et améliorations des variables environnementales à l'échelle du territoire. La prochaine version intégrera par ailleurs de nouveaux développements méthodologiques en rapport notamment avec les aspects susmentionnés de la profondeur des sols et de la meilleure prise en compte des sols organiques. Les versions ultérieures permettront ainsi une meilleure interprétation spatiale des cartes indicatives des propriétés des sols.

5. Préparation des cartes matricielles

Les cartes indicatives couvrant l'ensemble du territoire peuvent être utilisées en soutien aux cartographies cantonales durant la phase conceptuelle et les travaux de terrain, mais sont aussi souvent demandées pour des projets de recherche nationaux et régionaux. Le traitement et la livraison des cartes indicatives peut être effectuées selon **la commune, le canton ou pour l'ensemble de la Suisse**.

Les données sont fournies dans un document zip. Celui-ci contient dans un sous-dossier, pour chaque propriété des sols et chaque profondeur, une carte avec les valeurs prévisionnelle et une carte supplémentaire avec l'incertitude de prévision (RPI : « Relative Prediction Interval », cf. p. 21). Il en résulte donc six cartes par propriété pédologique. Par exemple, pour la teneur en argile (clay), les noms des fichiers se présentent ainsi :

Soil_clay_0_30_cm.tif

(Teneur en argile 0-30 cm)

– Soil_clay_0_30_cm_uncertainty.tif

(Incertitude de prévision pour cette profondeur)

– Soil_clay_30_60_cm.tif

(Teneur en argile 30-60 cm)

– Soil_clay_30_60_cm_uncertainty.tif

(Incertitude de prévision pour cette profondeur)

– Soil_clay_60_120_cm.tif

(Teneur en argile 60-120 cm)

– Soil_clay_60_120_cm_uncertainty.tif

(Incertitude de prévision pour cette profondeur)

Les demandes d'utilisation de ce service sont à envoyer à l'aide du formulaire en ligne figurant sur le site internet du CCSols. Après traitement de la demande, les données sont mises à disposition des utilisateurs et des utilisatrices sous forme d'un lien de téléchargement. Vos retours sont très importants pour nous. Ils nous permettent de tenir compte de vos suggestions et de poursuivre en continu le développement des cartes indicatives des propriétés des sols. Nous serions donc heureux que vous nous fassiez connaître vos expériences et vos propositions d'amélioration. Vous pouvez utiliser pour cela le contact :

service@ccsols.ch.

6. Bibliographie

- _ Agroscope, 2023. Swiss reference methods of the research institutes Agroscope. <https://www.agroscope.admin.ch/agroscope/en/home.html>. (Accessed April 2023).
- _ BDM, 2023. Monitoring de la biodiversité en Suisse (MBD) <https://biodiversitymonitoring.ch/index.php/fr/>.
- _ Behrens T., Schmidt K., MacMillan R.A., Viscarra Rossel R.A., 2017. Multiscale contextual spatial modelling with the Gaussian scale space. *Geoderma* , 310, 128–137.
- _ Behrens T., Schmidt K., MacMillan R.A., Viscarra Rossel R.A., 2018. Multi-scale digital soil mapping with deep learning. *Scientific reports*, 8 (1), 15244.
- _ Behrens T., Schmidt K., Zhu A.X., Scholten T., 2010: The ConMap approach for terrain-based digital soil mapping. *European Journal of Soil Science* 61, 133-143.
- _ Behrens T., Viscarra Rossel R. A., Kerry R., MacMillan R.A., Schmidt K., Lee J., Scholten T., Zhu A.-X., 2019: The relevant range of scales for multi-scale contextual spatial modelling. *Scientific Reports* 9: 14800.
- _ Behrens T., Viscarra Rossel R.A., 2020. On the interpretability of predictors in spatial data science: the information horizon. *Scientific Reports*, 10 (1), 16737.
- _ Bishop T.F.A., McBratney A.B., Laslett G.M., 1999. Modelling soil attribute depth functions with equal-area quadratic smoothing splines. *Geoderma* 91, 27-45.
- _ Breiman L., 2001. Random Forests. *Machine Learning* 45, 5-32.
- _ Brevik EC., 2013: The potential impact of climate change on soil properties and processes and corresponding influence on food security. *Agriculture* 3, 398-417.
- _ Chen S., Arrouays D., Mulder V.L., Poggio L., Minasny B., Roudier P., Libohova Z., Lagacherie P., Shi Z., Hannam J., Meersmans J., Richer-de-Forges A.C., Walter C., 2022: Digital mapping of GlobalSoilMap soil properties at broad scale: A review. *Geoderma* 409, 115567.
- _ De Vries FT., Thebault E., Liiri M., Birkhofer K., et al., 2013 : Soil food web properties explain ecosystem services across European land use systems. *PNAS* 35, 14296-14301.
- _ Demattê J.A.M., Fongaro C.T., Rizzo R., Silvero N.E.Q., Safanelli J.L., 2018. Geospatial Soil Sensing System (GEOS3): A powerful data mining procedure to retrieve soil spectral reflectance from satellite images. *Remote Sensing of Environment* 212, 161-175.
- _ Dokuchaev V.V., 1883. Russian chernozem. In: *Selected Works of V.V. Dokuchaev*, Volume 1. Moscow, 1948 (ed. S. Monson), pp. 14– 419. Israel Program for Scientific Translations Ltd. (for USDA-NSF), Jerusalem, Israel.
- _ ESA, 2023: European Space Agency: Sentinel- 2. https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-2.
- _ Frei C., 2014: Interpolation of temperature in a mountainous region using non-linear profiles and Euclidean distances. *International Journal of Climatology* 34, 1585-1605.
- _ Frei C., Schöll R., Fukutome S., Schmidli J., Vidale P., 2006: Future change of precipitation extremes in Europe – Intercomparison of scenarios from regional climate tools. *Journal of Geophysical Research* 111, D6.

- _ Frei C., Willi M., Stöckli R., Dürri B., 2015. Spatial analysis of sunshine duration in complex terrain by non-contemporaneous combination of station and satellite data. *International Journal of Climatology* 35, 4471-4790.
- _ García M.J.L., Caselles V., 1991. Mapping burns and natural reforestation using thematic Mapper data. *Geocarto International* 6, 31-37.
- _ Gee G.W., Bauder J., Klute A., 1986. Methods of soil analysis, part 1, physical and mineralogical methods. *Soil Science Society of America Book Series, Inc. Madison, Wisconsin*, 404-410.
- _ Gray J.M., Bishop T.F.A., Wilford J.R., 2016. Lithology and soil relationships for soil modelling and mapping. *Catena* 147, 429-440.
- _ Gregorutti B., Michel B., Saint-Pierre P., 2015. Grouped variable importance with random forests and application to multiple functional data analysis. *Computational Statistics & Data Analysis* 90, 15-35.
- _ Gubler A., Wächter D., Schwab P., 2018. Homogenisierung von Bodenkohlenstoff-Daten: Harmonisierung der Resultate aus Nassoxydation (FAL-Methode) und Trockenveraschung. *Agroscope Science* 62, 2018.
- _ Guisan, A., Weiss, S.B., Weiss, A.D., 1999: GLM versus CCA spatial modelling of plant species distribution. *Plant Ecology* 143, 107-122.
- _ Haghighi F., Gorji M., Shorafa M., 2010: A study of the effects of land use changes on soil physical properties and organic matter. *Land degradation and development* 21, 496-502.
- _ Jenny H., 1941. Factors of soil formation. McGraw-Hill, N.Y. & London.
- _ Keller A., Franzen J., Knüsel P., Papritz A., Zürrer M. 2018: Plateforme d'information des sols suisse (PIS-CH). Synthèse thématique 4 du Programme national de recherche « Utilisation durable de la ressource sol » (PNR 68) (pnr 68), Berne. 130 p. <http://www.nfp68.ch/de/news-medien/publikationen>
- _ Kiss R., 2004. Determination of drainage network in digital elevation model, utilities and limitations *Journal of Hungarian Geomathematics*, vol.2, p.16-29.
- _ Knecht M., Lüscher C., Borer F. 2017. Bedürfnisabklärungen Bodeninformationen. Zuhanden Bundesamt für Umwelt BAFU. Ambio GmbH, Zürich.
- _ Loiseau T., Richer-de-Forges A.C., Martelet G., Bialkowski A., Nehlig P., Arrouays D., 2020. Could airborne gamma-spectrometric data replace lithological maps as covariate for digital soil mapping of topsoil particle-size distribution? A case study in Western France. *Geoderma Regional* 22, 200295.
- _ Lüscher C. 2004. Leitfaden Bodenkartierung Bodendaten – ein Werkzeug für Planung,
- _ McBratney A.B., Mendonça-Santos M.L., Minasny B., 2003. On digital soil mapping. *Geoderma* 117, 3–52.
- _ Meinshausen N., 2006. Quantile Regression Forests. *Journal of Machine Learning Research* 7, 983-999.
- _ Meteoswiss, 2023. Office fédéral de météorologie et de climatologie, Suisse : Analyses spatiales du climat. <https://www.meteosuisse.admin.ch/climat/climat-de-la-suisse/analyses-spatiales-du-climat.html>.
- _ NABODAT. 2023 Système national d'information pédologique, Suisse. <https://nabodat.ch/index.php/fr/>.
- _ Poggio L., Gimona A., 2017. 3D Mapping of soil texture in Scotland. *Geoderma Regional* 9, 5-16.
- _ Pribyl D.W., 2010. A critical review of the conventional SOC to SOM conversion factor. *Geoderma* 156, 75-83.

- _ Quinn P.F., Beven K.J., Chevallier P., Planchon O., 1991. The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modelling using digital terrain models. *Hydrological Processes* 5, 59–79.
- _ Rehbein K., Ch. Sprecher, A. Keller. 2019. Übersicht Stand Bodenkartierung in der Schweiz— Ergänzung des Bodenkartierungskataloges Schweiz um Bodeninformationen aus (Agroscope, Servicestelle NA-BODAT) Meliorationsprojekten.
- _ Riley, S.J., DeGloria, S.D., Elliot, R., 1999. A terrain ruggedness index that quantifies topographic heterogeneity. *Intermountain Journal of Sciences* 5, 23-27.
- _ Rouse J.W., Haas R.H., Schell J.A., Deering D.W., 1974: Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. Third ERTS-Symposium, Washington D.C. 1973
- _ Sen, P.K., 1968: Estimates of the regression coefficient based on Kendall's Tau. *Journal of the American Statistical Association* 63, 1379-1389.
- _ Swisstopo, 2023. Office fédéral de topographie, Suisse : Le modèle topographique du paysage MTP <https://www.swisstopo.admin.ch/fr/information-modele-topographique-du-paysage>.
- _ USGS, 2023: U.S. Geological Survey: Landsat Data Products. <https://www.usgs.gov/core-science-systems/nli/landsat/landsat-collection-2-level-2-science-products>.
- _ Vökt U., Pazeller A. (2002): Bodeneignungskarte der Schweiz 1:200 000 – Qualität und Aussagekraft der Archivdokumente. SSP (éd.)
- _ Wilson M.F.J, O'Connell B., Brown C., Guinan J.C., Grehan A.J., 2007. Multiscale terrain analysis of multibeam bathymetry data for habitat mapping on the continental slope. *Marine Geodesy* 30, 3–35.
- _ Wu, D., Wu H., Zhao, X., Zhou, T., Tang, B., Zhao, W., Jia, K., 2014: Evaluation of spatiotemporal variations of global fractional vegetation cover based on GIMMS NDVI data from 1982 to 2011. *Remote Sensing* 6, 4217-4239.
- _ Wüst-Galley C., A. Grünig, J. Leifeld. 2015. Locating Organic Soils for the Swiss Greenhouse Gas Inventory. *Agroscope Science* n° 26 / 2015.
- _ Zevenbergen L.W., Thorne C.R., 1987: Quantitative analysis of land surface topography. *Earth Surface Processes Landforms* 12, 47-56.
- _ Žížala D., Minařík R., Skála J., Beitlerová, H., Juřicová A., Reyes Rojas J., Penížek V., Zádorová T., 2022. High-resolution agriculture soil property maps from digital soil mapping methods, Czech Republic. *Catena* 212, 106024.

Centre de compétences sur les sols

BFH-HAFL

Länggasse 85 3052 Zollikofen

info@ccsols.ch ccsols.ch