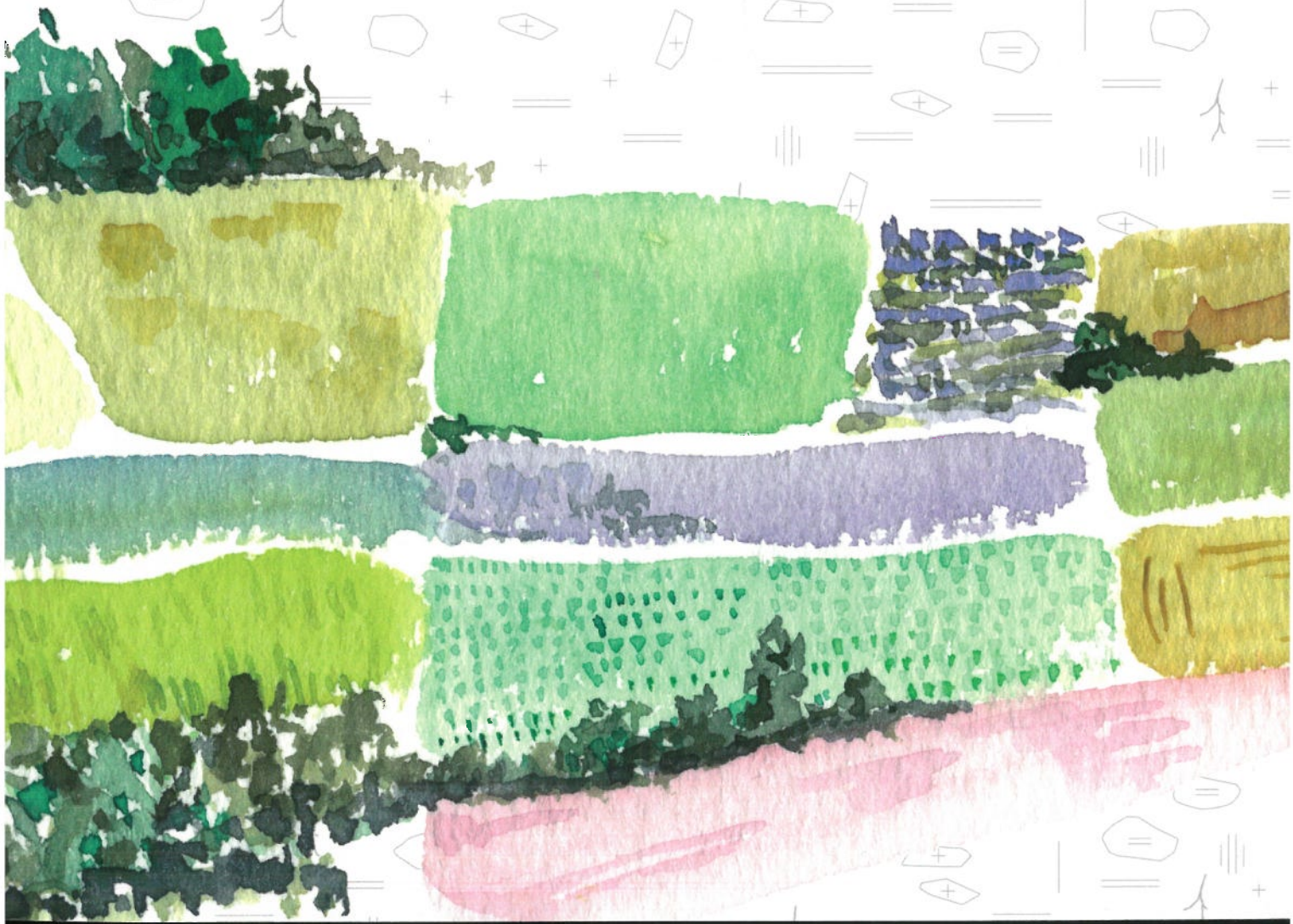


# SOLS ET PAYSAGES

Types de sols, fonctions et  
usages en Europe moyenne

Jean-Michel Gobat  
Claire Guenat



La collection « Science et ingénierie de l'environnement » est publiée sous la direction du professeur Suren Erkman (UNIL).

Autres titres au catalogue :

**Les grands sols du monde**

Jean-Paul Legros

**Hydrologie**

*Une science de la nature*

André Musy, Christophe Higy

**Hydrologie 2**

*Une science de l'ingénieur*

André Musy, Christophe Higy

**Hydrologie fréquentielle**

*Une science prédictive*

Paul Meylan, Anne-Catherine Favre, André Musy

**Ingénierie des eaux et du sol**

*Processus et aménagements*

Marc Soutter, André Mermoud, André Musy

**Mettre en oeuvre l'écologie industrielle**

Adoue Cyril

**Changements climatiques et impacts**

*De l'échelle globale à l'échelle locale*

Martin Beniston

**Le sol vivant**

*Bases de pédologie – Biologie des sols*

Jean-Michel Gobat, Michel Aragno et Willy Matthey

Mise en page : Kim Nanette

Aquarelle de couverture : Sylvette Gobat

Infographie, dessins : Sandrine Eberlé

Photographies des sols décrits : Nicolas Dufaux, Jean-Michel Gobat

Schémas des profils : Loraine Martignier

La Fondation des Presses polytechniques et universitaires romandes (PPUR) publie principalement les travaux d'enseignement et de recherche de l'École polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL), des universités et des hautes écoles francophones.

PPUR, EPFL-Rolex Learning Center, CP 119, CH-1015 Lausanne,  
ppur@epfl.ch, tél.: +41 21 693 21 30; fax: +41 21 693 40 27.

**www.ppur.org**

Première édition

ISBN 978-2-88915-295-7

© Presses polytechniques et universitaires romandes, 2019

Tous droits réservés.

Reproduction, même partielle, sous quelque forme

ou sur quelque support que ce soit, interdite sans l'accord écrit de l'éditeur.

Imprimé en République tchèque

# TABLE DES MATIÈRES

Préface .....	VII
Introduction générale .....	1

## I. Paysages caractéristiques ..... 5

Introduction.....	6
1. Douze paysages représentatifs.....	8
1.1 L'Ajoie, un paysage agricole de plaine.....	8
1.2 Agriculture intensive du Moyen Pays : la plaine de l'Orbe.....	11
1.3 Le bassin genevois : de la campagne à la ville.....	14
1.4 La garide d'Onnens : une ambiance subméditerranéenne.....	17
1.5 Le Valais central, sec et ensoleillé.....	20
1.6 La vallée alluviale de la Sarine en Haute-Gruyère.....	23
1.7 Les forêts du versant sud-est du Jura.....	26
1.8 Hautes vallées à tourbières : la vallée des Ponts.....	29
1.9 Les pâturages boisés : des paysages façonnés par l'homme.....	32
1.10 Chasseral, image des sommets du Jura.....	35
1.11 De l'étage subalpin à l'étage alpin : la région du Toûno.....	38
1.12 Paysage de haute altitude : les environs de Zermatt.....	41
2. Facteurs et structure du paysage.....	44

## II. Portrait des sols ..... 47

Introduction.....	48
3. Références de base.....	52
3.1 Alocrisol Humique.....	52
3.2 Alocrisol Typique*.....	54
3.3 Anthroposol Archéologique.....	65
3.4 Anthroposol Artificiel.....	72
3.5 Anthroposol Construit.....	76
3.6 Anthroposol Reconstitué*.....	84
3.7 Anthroposol Transformé.....	94
3.8 Arénosol.....	98
3.9 Brunisol Dystrique*.....	108
3.10 Brunisol Eutrique.....	119
3.11 Calcisol.....	129
3.12 Calcisol*.....	138
3.13 Colluviosol.....	149
3.14 Cryosol Minéral.....	158
3.15 Dolomitosol.....	170
3.16 Fluviosol Brunifié.....	180
3.17 Fluviosol Brut.....	188
3.18 Fluviosol Juvénile.....	192
3.19 Fluviosol Typique*.....	200
3.20 Histosol Composite.....	211
3.21 Histosol Fibrique*.....	222
3.22 Histosol Leptique.....	238
3.23 Histosol Mésique.....	240
3.24 Histosol Saprique.....	242
3.25 Lithosol*.....	244
3.26 Luvisol Typique*.....	253
3.27 Magnésisol.....	263
3.28 Néoluvisol.....	265
3.29 Organosol Calcaire.....	274
3.30 Organosol Holorganique*.....	283
3.31 Organosol Insaturé.....	294
3.32 Organosol Saturé.....	296
3.33 Pélosol Brunifié.....	304
3.34 Pélosol Typique.....	312

3 35 P	I	.....	314
3.39	Podzsol Ocrique	.....	340
3.40	Post-Podzsol	.....	356
3.41	Rankosol*	.....	358
3.42	Rédoxisol	.....	366
3.43	Réductisol Stagnique	.....	377
3.44	Réductisol Typique*	.....	386
3.45	Régosol	.....	396
3.46	Rendisol	.....	401
3.47	Rendosol*	.....	403
<i>Note: Les * signalent les «sols-repères» des groupes fonctionnels (cf. p. 51)</i>			
<b>4.</b>	<b>Sols à processus particuliers</b>	.....	<b>415</b>
4.1	Arénosol podzolisé	.....	415
4.2	Lithosol anthropique	.....	421
4.3	Réductisol Typique épihistique	.....	426
<b>5.</b>	<b>Sols à rattachement double</b>	.....	<b>430</b>
5.1	Calcosol-Calcarisol	.....	430
5.2	Podzsol Meuble développé dans un Rédoxisol	.....	436
<b>6.</b>	<b>Sols sur matériaux superposés</b>	.....	<b>440</b>
6.1	Brunisol Eutrique à Calcosol	.....	440
6.2	Podzsol Meuble-Peyrosol sur paléoBrunisol Eutrique	.....	452
<b>III.</b>	<b>Diversité des sols</b>	.....	<b>461</b>
7.	La diversité des types de sols	.....	462
8.	Facteurs de pédogenèse	.....	466
9.	Les processus de formation des sols	.....	472
<b>IV.</b>	<b>Les sols, fonctions et usages</b>	.....	<b>477</b>
10.	Les usages du sol: généralités	.....	478
11.	Les sols forestiers et leurs usages (Pascal Junod)	.....	483
12.	Les sols agricoles et leurs usages (Michel Gratier et Jean-Pierre Clément)	.....	493
13.	Les sols viticoles et leurs usages (Isabelle Letessier)	.....	502
14.	Les sols urbains et leurs usages (Elena Havlicek et Géraldine Bullinger)	.....	512
15.	Valeur patrimoniale et statut du sol	.....	521
<b>V.</b>	<b>Annexes</b>	.....	<b>525</b>
A1.	La fertilité du sol et son évaluation	.....	526
A2.	Méthodes analytiques et symboles	.....	528
A3.	Noms français et latins des plantes	.....	531
A4.	Glossaire	.....	535
A5.	Clés de détermination des sols de Suisse	..... (cahier séparé)	
	Bibliographie	.....	543
	Crédits photographiques	.....	557
	Remerciements	.....	559
	Soutiens	.....	562

## LE SOL URBAIN EXISTE !

Selon un rapport des Nations Unies (United Nations, 2018), en 2018, plus de la moitié de la population mondiale (55,3%) vit en zone urbaine. Ce pourcentage atteint 78,7% pour l'ensemble des pays les plus développés, plus précisément 74,5% en Europe et 73,8% en Suisse. Mais comment se nourrit toute cette population, qui augmente en permanence et qui devient de plus en plus urbaine ? L'Organisation des Nations Unies pour l'agriculture et l'alimentation (FAO&ITPS, 2015) estime qu'environ 95% de l'alimentation mondiale provient de la culture des sols, alors que la surface de ces derniers diminue régulièrement et est peu à peu convertie en aires d'habitat, en infrastructures de transport ou en grands centres commerciaux péri-urbains... où les citoyens viennent s'approvisionner. C'est aussi le cas en Suisse, où les zones urbaines ont enregistré une croissance notable entre 1985 et 2009 (+ 23,4%), un gain supérieur à la superficie du Léman (OFS, 2015). La compétition entre ville et campagne, entre habitat et alimentation, est un défi majeur pour la société du XXI<sup>e</sup> siècle, entre préservation des sols agricoles et valorisation des sols urbains. Ces derniers peuvent en effet avoir un autre destin que celui d'être totalement bétonnés et sont aptes à fournir d'autres fonctions essentielles au bien-être des citoyens (Blanchart *et al.*, 2017). Pour cela, il est nécessaire de les connaître et de les faire connaître, à l'instar de deux publications récentes qui montrent le fort intérêt porté, depuis peu il est vrai, par les pédologues aux anthrosols (Levin *et al.*, 2017, Lal & Stewart, 2018).

## LE SOL URBAIN : DE QUOI PARLE-T-ON ?

Par rapport aux sols forestiers, agricoles ou viticoles, le sol urbain est de manière paradoxale le plus difficile à définir. Sa caractérisation la plus simple, voire simpliste, est malheureusement aussi la moins informative : *un sol urbain est un sol qui se trouve en milieu urbain*. Cette définition (tautologique) du sol urbain a tout de même le mérite de délimiter spatialement les sols urbains par rapport aux autres sols. Néanmoins, elle ne renseigne pas sur l'état des surfaces concernées, puisque cette notion liée à l'usage inclut toutes les surfaces urbaines, qu'elles soient recouvertes de matériaux divers, comme le goudron, le béton ou les pavés, ou qu'il s'agisse de sols plus « naturels », – que l'on rencontre par exemple dans les espaces verts – c'est-à-dire un milieu de vie des organismes du sol et des racines des végétaux, un réservoir d'eau et d'éléments nutritifs pour les plantes et les organismes qui y vivent.

Les sols urbains sont indissociables du processus d'urbanisation, qui est défini primordialement comme un phénomène démographique menant à une augmentation et à une concentration des habitants dans les villes. Dès le début de la sédentarisation, à l'époque néolithique, la densification de la population provoque une transformation de l'environnement due à la construction d'un habitat regroupé et de voies de circulation, et donc la modification des sols naturels (Bednarz *et al.*, 2006 ; Gallay, 2008). Les recherches archéologiques offrent un bon exemple de ces premiers impacts, avec la construction de voies de circulation empierrées (fig. 14.1) ou avec la compaction des sols due au piétinement dans l'enceinte des villages, qui modifient déjà les propriétés originelles des sols naturels (cf. p. 70). Toutefois, ces impacts, dont l'extension spatiale est faible, restent modérés ; il ne s'agit pas d'une véritable atteinte mais plutôt d'une modification, conduisant à des Anthrosols Transformés. Les actions humaines anciennes, lentes mais répétées, se matérialisent souvent par une succession de couches de matériaux apportés progressivement au cours de l'occupation des premières cités et conduisent à l'épaississement artificiel des sols.

Lorsque ces matériaux, qualifiés d'archéo-anthropiques (horizon Zar), ont une épaisseur de plus de 50 cm, le sol est considéré comme un Anthrosol Archéologique.

Ensuite, l'augmentation de la population et sa sédentarisation génèrent une extension et une intensification des atteintes aux sols suite à l'évolution des outils et des procédés techniques. Par exemple, les activités industrielles, comme l'extraction de minerais, ont profondément bouleversé les sols, par décapage, par rejet des matériaux résiduels ou encore par la contamination (cf. p. 95).

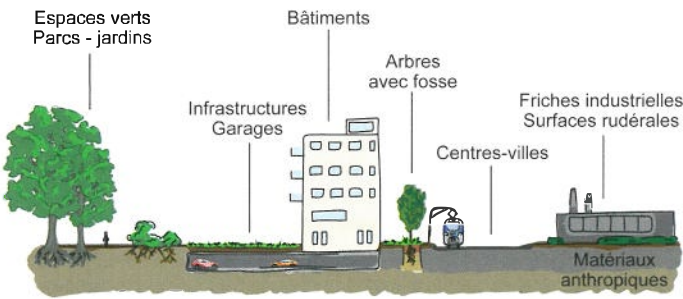
Dès que l'usage des machines de chantiers a permis de réaliser des excavations profondes et des transferts de matériaux sur de longues distances, une transformation radicale a touché les sols urbains ; aujourd'hui, le paysage souterrain de la ville est essentiellement formé de remblais, parcouru par un réseau dense de canalisations et de conduites, occupé par les fondations des bâtiments ou par des constructions souterraines (métro, centres d'achat sous les gares, etc.) (fig. 3.4.11B). En surface, le décapage des sols agricoles se trouvant en périphérie de la ville a permis l'apport de matériaux terreux excédentaires et leur valorisation en milieu urbain, dans les parcs, les espaces verts ou les jardins. Les constructions urbaines, visibles en surface, sont le reflet d'une urbanisation souterraine tout aussi intense, mais rarement perçue.

À l'exception de quelques lambeaux reliques de sols naturels ou quasi-naturels, ou de sols mis en place sur des remblais, les sols urbains ont perdu une partie plus ou moins importante de leurs fonctions, de production et de régulation notamment. Trop souvent, l'écosystème urbain peut être qualifié d'écosystème « cul-de-jatte » (selon l'expression de Willy Matthey, ancien professeur d'écologie à l'université de Neuchâtel).

Mais les sols urbains sont également considérés *dans un sens restrictif*, c'est-à-dire comme des sols *anthropogéniques intra-urbains*, très fortement influencés par les activités humaines (fig. 14.2 ; Lehmann & Stahr 2007). Les zones urbaines incluent ainsi les aires de bâtiments, les surfaces de transports et d'infrastructures spéciales ainsi que les espaces verts et les lieux de détente ; elles représentent 7,5% de la surface de la Suisse (OFS, 2015).



14.1 Route empierrée datant de l'époque de La Tène (second âge du Fer, II<sup>e</sup> siècle avant J.-C.). Petit Ruz, Cortaillod NE. © Laténium.



14.2 La ville, entre espaces verts et sols scellés.

## FORMATION ET CARACTÉRISTIQUES DES SOLS URBAINS

### Une formation à partir des sols naturels

À quelques exceptions près – par exemple les Anthrosoles Construits, certains Anthrosoles Artificiels et Lithosols anthropiques – les sols urbains sont issus de sols naturels, ou du moins ils ont débuté leur pédogenèse dans un contexte naturel, généralement forestier. Globalement, les sols urbains sont soumis aux mêmes facteurs de pédogenèse que les sols naturels (climat, matériau parental, relief, organismes, temps) mais les activités humaines les modifient en modulant les facteurs pédogénétiques (tab. 14.3; Lehmann & Stahr, 2007; Huot *et al.* in Levin *et al.*, 2017). En complément voire en substitution des agents naturels, l'homme devient alors un facteur primordial de la pédogenèse en milieu urbain (Morel *et al.*, 2015). Au cours du temps, l'homme a ainsi changé la morphologie des sols

originels, leur composition physique (troncature, dépôts), chimique (alcalinisation, pollution), biologique, mais également leur fonctionnement hydrique, thermique, etc.

Comparée aux sols naturels et semi-naturels, la pédogenèse des sols urbains anthropogéniques non scellés est plus rapide en raison du déséquilibre entre le sol et son environnement. Dans ces conditions, les propriétés physico-chimiques du sol sont susceptibles d'évoluer plus rapidement (Blanchart *et al.* 2017).

### Caractéristiques des sols urbains

Tous les sols urbains, plus ou moins anthropisés, partagent une forte hétérogénéité spatiale et des perturbations physiques, chimiques et biologiques plus intenses que celles des sols non urbains.

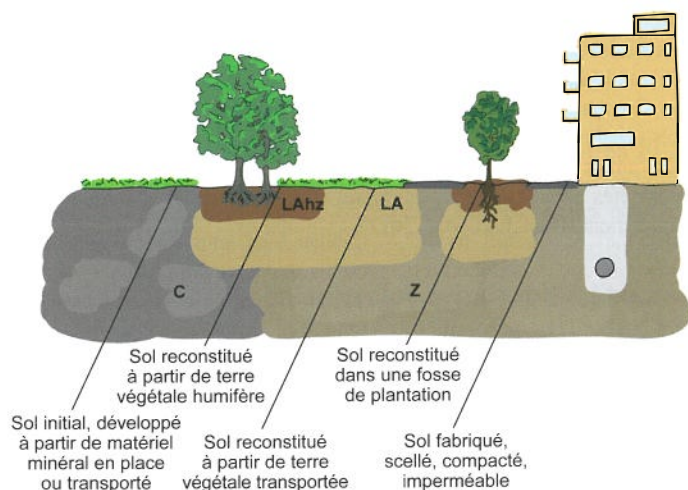
#### *Des sols à forte hétérogénéité spatiale*

De manière générale, l'hétérogénéité spatiale, tant horizontale que verticale, est due à l'importation, à l'exportation et au mélange de matériaux, des processus qui modifient la séquence et la composition des horizons, en particulier celles des horizons de surface (fig. 14.4). Dans un premier temps, le centre historique des villes et les sols ont grandi verticalement par apports successifs de matériaux (voir plus bas). Puis, suite à une pression démographique accrue et à un besoin de modernisation des infrastructures, la fréquence des modifications d'usage du sol s'est accélérée et a augmenté cette hétérogénéité, ainsi que la fragmentation de la couverture pédologique.

En Suisse occidentale, la canalisation et la mise sous terre de cours d'eau, le comblement partiel ou total de vallées par des déchets puis par des matériaux d'excavation, la création d'espaces terrestres aux dépens des lacs ont bouleversé de manière durable le paysage urbain, la topographie des villes et l'organisation et la composition des sols urbains.

Facteur de pédogenèse	Action humaine	Modification anthropique du facteur	Effets possibles sur le sol originel
<b>Matériau minéral parental</b>	Excavation ou addition de couches de matériaux minéraux naturels ou de déchets de construction	Apport de tous matériaux naturels (sables, roches, etc.) et de tous types de déchets inertes fragmentés (briques, poteries, roches concassées, etc.)	Exhaussement ou enfouissement du sol en place Modification des propriétés chimiques (pH, potentiel redox) ou physiques (perméabilité, régime hydrique)
	Addition de couches de matériaux terreux provenant du décapage de sols	Apport d'horizons organo-minéraux de surface et d'horizons sous-jacents provenant d'un autre sol	Augmentation de l'épaisseur du sol Modification du type de sol
	Addition et mélange avec des matériaux contaminés	Apport de déchets industriels solides (sols contaminés, résidus de mines, cendres, etc.) ou liquides (huiles, résidus industriels, etc.)	Exhaussement ou enfouissement du sol en place Modification des propriétés chimiques (pH, potentiel redox) ou physiques (perméabilité, régime hydrique) Contamination chimique
	Recouvrement par des matériaux continus. Scellement du sol	Imperméabilisation par du béton, du goudron, etc.	Destruction du sol. Déconnexion entre les parties aérienne et souterraine
<b>Organismes vivants et matière organique</b>	Apport de compost	Augmentation du taux de matière organique dans l'horizon de surface	Augmentation du taux de matière organique Création de conditions propices à la vie du sol Amélioration de la structure du sol
	Apport de produits phytosanitaires	Introduction de produits chimiques non naturels dans le sol, parfois persistants	Toxicité des intrants et de leurs produits de dégradation pour des espèces végétales ou des organismes du sol non visés. Contamination des eaux
	Plantations	Modification de la végétation et des apports de matière organique dans les sols	Modification des communautés d'organismes du sol Modification des communautés végétales Introduction d'espèces non indigènes (néophytes)
<b>Climat</b>	Entretien de la végétation par tonte et fauchage	Exportation de la litière	Appauvrissement en matière organique Destabilisation des communautés d'organismes du sol
	Augmentation de la température de l'air et atténuation des extrêmes thermiques Modification de la « pluviosité » par des changements climatiques ou l'arrosage	Augmentation de la température du sol Changement du régime hydrique du sol	Modification des processus chimiques (altération des minéraux) et biologiques (modification des communautés vivantes). Survie d'espèces allochtones potentiellement envahissantes. Modification du régime hydrique
<b>Relief</b>	Travaux de génie civil avec déblais, remblais, etc. Pose des infrastructures souterraines (tuyaux, canalisations)	Exhaussement ou abaissement du sol Drainages. Déconnexion spatiale	Déconnexion de la nappe phréatique Modification du régime hydrique Fragmentation de la couverture pédologique
<b>Temps</b>	Remodelages du terrain	Exhaussement ou enfouissement du sol en place	Généralement, retour à un sol moins évolué

14.3 Effets des actions humaines sur les facteurs de formation et de développement des sols urbains. Havlicek, inédit.



14.4 L'hétérogénéité spatiale des sols urbains. Horizon C : matériel minéral en place (roche ou sédiments); couche Z : matériel minéral apporté (remblais); horizon LA : matériau pédologique en place ou apporté; horizon LAhz : matériau pédologique en place ou apporté, enrichi en compost. D'après Girard *et al.*, 2005.



14.5 Comblement de la vallée du Flon au début du XX<sup>e</sup> siècle. Lausanne. A. L'impressionnant remblayage de la vallée originelle (© Frédéric Mayor, 1913, coll. Musée historique Lausanne). B. Des moyens parfois rudimentaires (© Anonyme, vers 1905, coll. Musée historique Lausanne).

Tous ces remaniements successifs de matériaux minéraux et terreux sont des facteurs qui contribuent fortement à la diversité et à la variabilité spatiale actuelles des sols en ville, par exemple à Neuchâtel (fig. 3.6.3) ou à Lausanne (fig. 14.5).

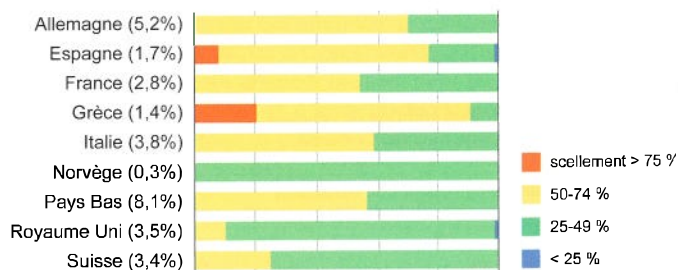
Ces sols remaniés sont jeunes et dotés de propriétés physiques extrêmes (masse volumique très élevée, structure dégradée, faible teneur en argile et forte en sable et en éléments grossiers) et de propriétés chimiques très contrastées avec une grande variabilité des teneurs en phosphore, azote total, carbone organique (Blanchart *et al.*, 2017).

#### Des sols souvent déconnectés du substrat et de l'atmosphère

Le sol urbain repose fréquemment sur des remblais apportés ou des matériaux technologiques compactés. S'il reste généralement sous une certaine influence des éléments provenant de la surface, qu'ils soient d'origine naturelle (par exemple l'air, les eaux de pluie, les organismes vivants) ou anthropique (contaminants atmosphériques), la connexion avec le sous-sol géologique est souvent entravée par la présence d'horizons compactés ou par le scellement partiel ou total du sol.

Le scellement nécessite un décapage préalable des couches superficielles qui prive le sol de sa partie la plus fertile. Le revêtement appliqué en surface (béton, asphalte ou bâtiments) limite les transferts vers la profondeur tels que l'infiltration des eaux, les déplacements des organismes du sol; il coupe les échanges entre le sol et l'atmosphère et s'accompagne de la diminution de la biomasse, de l'activité biologique et de la diversité fonctionnelle des microorganismes. Il ralentit le développement du sol qui entre dans une sorte « d'hibernation » (Charzynski *et al.* in Lal & Stewart, 2018). Le scellement a pour conséquence la diminution voire la perte des fonctions et services écosystémiques remplis par les sols urbains (tab. 14.17; cf. p. 72)

Le scellement des sols urbains est un problème grandissant dans tous les pays d'Europe où les villes sont de plus en plus vastes et densément peuplées; le degré de scellement du sol est fortement corrélé à la densité de la population (European Environmental Agency, 2016). La proportion de surfaces scellées et le degré de scellement des sols varient selon les pays et les villes (fig. 14.6). En Suisse, le niveau de scellement des sols est dans la moyenne européenne: la surface totale scellée représente 3,4% du territoire national, alors que 75% des villes ont un taux de scellement moyen compris entre 25 et 49% de la surface urbaine. Il n'y a aucune ville avec un taux de scellement extrêmement élevé (> 75%) ou très bas (< 25%).



14.6 Les sols scellés dans quelques pays d'Europe: proportion de la surface de sols scellés par rapport à la surface totale du pays (importance relative selon quatre degrés de scellement, en %), en 2012. D'après European Environmental Agency, 2016.

#### Des sols pollués

De manière générale, les sols urbains présentent des taux de contamination plus élevés que les sols situés à l'extérieur du périmètre de la ville. Cette pollution est due à la contamination diffuse par l'air suite aux activités industrielles passées et actuelles, au trafic routier ou à une gestion inadaptée des déchets (Marchant *et al.*, 2011). Ceci est particulièrement le cas en Europe où l'industrie s'est fortement développée dès les années 1850 (FAO & ITPS, 2015). Les apports directs par les « agriculteurs urbains » qui, par méconnaissance, ont utilisé ou utilisent de manière excessive des engrais (scories, cendres, composts, boues contaminées) ou des produits phytosanitaires sont une deuxième source importante de contamination.

Les polluants sont variés, de types inorganiques comme les éléments traces métalliques (Zn, Cd, Pb, As, Cr, Hg et Ni) ou organiques (HAP, PCB, pesticides, hydrocarbures, dioxines, etc.) (Norra & Cheng in Levin *et al.*, 2017; Menefee & Hettiarachchi in Lal & Stewart, 2018). Leur devenir et leur vitesse de dégradation dépendent en partie de la

composition et du fonctionnement du sol (teneur en matière organique, régime hydrique et thermique, activité biologique). Les métaux lourds et les métalloïdes contenus dans les poussières atmosphériques s'accumulent peu à peu dans les sols. Ils sont piégés et immobilisés grâce au pH élevé des sols urbains, souvent riches en carbonates (cf. p. 481).

#### Une étude de cas : les sols de la ville de Fribourg

Les données relatives à la pollution des sols urbains en Suisse occidentale sont encore très fragmentaires ; l'étude cartographique la plus documentée est celle du canton de Fribourg qui a inclus, depuis 2004, des sites urbains dans son réseau de surveillance (places de jeux, espaces verts, prairies permanentes et jardins familiaux), avec un suivi des métaux lourds, des HAP et des PCB (État de Fribourg, 2017).

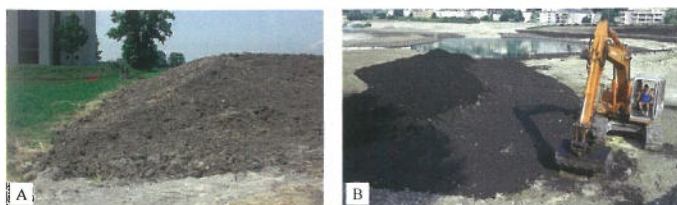
En ville de Fribourg, la valeur indicative fixée par la loi (Ordonnance sur les atteintes portées aux sols, OSol ; cf. p. 481) est dépassée dans la majorité des cas pour tous les métaux lourds, exceptés Ni et Cr. Les teneurs en polluants varient selon les quartiers de la ville et leur usage. Les jardins, surtout les plus anciens, contiennent des quantités importantes de métaux lourds comme le plomb ; la teneur de cet élément atteint exceptionnellement le seuil d'investigation fixé par l'OSol. Plusieurs sources de pollution combinées ont été identifiées : engrais, cendres ou scories épandues, remblais, émissions industrielles, essence, etc. Les métaux lourds, des éléments très peu mobiles, se sont accumulés dans les sols et y persistent même si leurs sources principales sont désormais taries, grâce à l'application d'autres lois environnementales (par exemple l'interdiction du plomb dans l'essence). Les éléments nutritifs, appliqués en excès, peuvent devenir également toxiques et provoquer des dommages environnementaux. Le phosphore soluble, par exemple, dépasse largement le niveau « satisfaisant » selon les normes agricoles dans les jardins familiaux dans le canton de Fribourg. Ces valeurs peuvent être comparées à celles des sols agricoles régionaux, connues de manière précise grâce à la vaste étude entreprise dans ce canton (Rossier *et al.*, 2012 ; Roger *et al.*, 2014).

## TYOLOGIE ET CLASSIFICATION DES SOLS PROFONDÉMENT MODIFIÉS PAR L'HOMME

Depuis quelques années, plusieurs classifications, éléments de base de cartographie nécessaires à la compréhension et à la gestion des sols urbains, ont vu le jour (Charzynski *et al.* in Levin *et al.*, 2017). Toutefois, compte tenu de la complexité de leur origine, de la diversité de leurs usages, de l'importance des perturbations, aucune classification internationale détaillée des sols intensément influencés par l'homme n'a encore pu être établie.

### Classification selon l'origine des matériaux

De manière simple, on peut regrouper les sols intensément modifiés par les activités humaines en fonction des apports de matériaux qui les constituent : terre végétale, compost, divers matériaux de construction, déchets, etc. (fig. 14.7).



14.7 Hétérogénéité des matériaux apportés. A. Matériau terreux (« terre végétale »). B. Compost de boues d'épuration et terre noire de marais.

### Classification selon le Référentiel pédologique

Le *Référentiel pédologique* (AFES, 2009) propose cinq références d'anthrosols pour décrire les sols fortement modifiés par les activités humaines, de manière volontaire ou non (tab. 3.6.15). Cette influence doit s'exercer sur au moins 50 cm d'épaisseur. Les Anthrosols Reconstitués (cf. p. 88) et les Anthrosols Construits (cf. p. 81), fruits d'actions volontaires instantanées par apports de matériaux pédologiques ou technologiques, sont les plus fréquents en milieu urbain. Les sols très minces (< 10 cm) créés par l'homme, par exemple sur les toitures végétalisées, font partie des Lithosols anthropiques (cf. p. 424). Des qualificatifs s'appliquent à ces différents types, comme scellé, décapé, contaminé, etc.

### Classification selon la World Reference Base (IUSS, 2015)

La classification mondiale WRB propose deux grandes catégories, les *Anthrosols* et les *Technosols*. Les *Anthrosols* sont des sols modifiés profondément par des activités agricoles sur une longue durée, par l'apport de matériau organique ou minéral, de charbon de bois ou de résidus ménagers, par l'irrigation ou par les pratiques culturales. Situés principalement dans les zones urbaines et industrielles, les *Technosols* regroupent des sols dont les propriétés et la pédogenèse sont dominées par leur origine technique. Ils comportent une quantité importante d'artéfacts ou sont colmatés par un matériau technique dur. Ils comprennent des sols sur déchets, des sols à géomembrane (fig. 3.5.20) et des sols construits. Les *Technosols* sont scindés en sous-catégories et des qualificatifs (*constructed, paved, sealed, etc.*) précisent leurs propriétés.

### Classification SUITMA

Les SUITMAS – acronyme de *Soils of Urban, Industrial, Traffic, Mining and Military Areas* – ont été proposés par Burghart en 1998 (Levin *et al.*, 2017) pour classer les sols anthropisés. Les groupes sont définis selon leur degré d'anthropisation et leur aptitude au développement d'un couvert végétal :

- sols pseudonaturels (*pseudo-natural SUITMAS*) (proches des sols naturels, généralement situés dans les forêts urbaines ;
- sols construits (*engineered SUITMAS*) (restauration de sites et de sols dégradés, toits végétalisés) ;
- sols issus de déchets (*dumping sites SUITMAS*) (ordures ménagères, gravats, résidus miniers, boues de décantation) ;
- sols bruts scellés (*sealed SUITMAS*), en totalité (sols cimentés imperméabilisés) ou partiellement (sols pavés).

Une grande variabilité de types existe au sein de chaque groupe. Morel *et al.* (2015) attribuent à chacun de ces SUITMAS des fonctions et des services écosystémiques différents (tab. 14.17).

## DIVERSITÉ DES SOLS EN MILIEU URBAIN : ENTRE NATURE ET ARTIFICE

Dans l'espace urbain, des sols plus ou moins proches de l'état naturel peuvent cohabiter dans un espace très restreint avec des sols dont le fonctionnement est profondément modifié par les activités humaines, voire qui ont été créés par l'homme. La proportion des différents types de sols varie selon les villes en fonction de leur histoire, de leur densité de population, de leur surface d'espaces boisés, etc. Dans les villes de Suisse, la proportion de surfaces boisées et d'aires de détente est comprise entre 12% de la superficie de la ville, comme à Bâle, et 68%, à Lugano ; avec 19%, Genève est proche de Bâle, alors que Lausanne figure parmi les villes les plus boisées avec 47% (OFS, 2016 ; cf. p. 119). À titre d'exemple, la figure 14.8 illustre la diversité des formations végétales et des sols urbains en ville de Neuchâtel.



**Sol forestier en place, proche de l'état naturel**  
Ce type de sol caractérise les zones naturelles résiduelles de la ville, par exemple les forêts intra-urbaines. En raison de sa topographie, cet endroit n'a pas été construit, et probablement jamais défriché.



Îlot de chênaie buissonnante



Calcosol

**Sol forestier, artificiel**  
Pour permettre le développement d'une forêt en zone de loisirs, des matériaux pédologiques découpés sur un chantier de construction d'autoroute ont été utilisés pour reconstituer un sol épais, nécessaire au développement des racines des arbres. Il possède les caractéristiques physico-chimiques d'un Calcosol.



Forêt établie en espace de loisirs



Anthroposol Reconstitué

**Sol jeune, artificiel, proche de l'état naturel**  
Sol initial, développé sur un substrat grossier, mis en place lors de l'aménagement du rond-point. Il possède une faible teneur en matière organique et une structure particulière. Il supporte une végétation pionnière plantée.



Rond-point routier



Lithosol anthropique

**Sol mince, développé naturellement au milieu de pavés**  
Ce sol est issu de la décomposition de la végétation pionnière spontanée qui colonise les espaces entre les pavés, et des particules minérales piégées. Il peut posséder un taux de matière organique humifiée élevé et une structure grumeleuse.



Placette urbaine pavée



Anthroposol Artificiel pavé

**Sol de parc urbain, anthropisé**

Sol installé vers 1775, sur des remblais gagnés sur le lac. Après 250 ans, le sol a acquis des propriétés proches d'un sol naturel, d'où son rattachement double.



Parc d'agrément



Calcosol-Anthroposol Reconstitué

**Sol de parc urbain, artificiel**

Pour un aménagement de prairie sèche, le sol a été « fabriqué » à partir de déblais minéraux et d'une couche de compost vert. Ces couches ont été déposées, mélangées et ont subi un processus de pédogenèse naturel.



Prairie sèche aménagée sur des remblais



Anthroposol Construit

**Sol artificiel, plantation d'arbres**

Le sol est uniquement formé d'un horizon de surface humifère apporté, posé sur un remblai minéral. En raison de la compaction du substrat, les racines colonisent la partie supérieure du sol et ne peuvent que faiblement pénétrer dans la partie minérale.



Plantation d'arbre



Anthroposol Reconstitué

**Sol de toiture plate**

Sol construit à base de cailloux calcaires concassés, sur une dalle de béton. La minceur voulue du sol le destine à accueillir une végétation de lieux très secs, riches en espèces des dalles de rochers.



Pelouse semée dans un but de biodiversité



Lithosol anthropique de toiture

14.8 La diversité des sols urbains et de leur contexte, à l'image de quelques situations en ville de Neuchâtel.

## FONCTIONS DES SOLS URBAINS : À QUOI SERT UN SOL EN VILLE ?

En raison de cette complexité, il est plus aisé de considérer les différents sols, anthropisés ou non, sous l'angle de leurs fonctions, de leurs usages ou des services écosystémiques dont l'homme tire des bénéfices directs ou indirects.

Les sols urbains peuvent en théorie remplir les six fonctions d'habitat, de régulation, de production, de support, de source de matières premières et d'archive (cf. p. 479). Toutefois, tout citoyen est intuitivement conscient que certaines fonctions prédominent en ville, alors que d'autres ont disparu, ou sont devenues insignifiantes. Il est à relever que les fonctions socio-économiques (support, archive, matières premières), quasi indépendantes de la qualité des sols, sont les fonctions principalement réalisées en ville, alors que les fonctions écologiques (production, régulation, milieu de vie), fortement dépendantes des processus naturels et de l'activité biologique du sol, sont souvent altérées en milieu urbain. Quelques aspects de ces fonctions sont décrits ci-dessous ; un panorama plus complet est fourni par Blanchart *et al.*, 2017.

## Fonction d'habitat : bonne nouvelle, le sol urbain est vivant

Contrairement à bien des idées reçues, la ville est loin d'être un désert biologique et elle peut abriter une biodiversité considérablement plus élevée que les zones agricoles voisines (McKinney, 2008 ; Sapijanskas *et al.* in Bispo *et al.*, 2016). L'introduction de nombreuses espèces exotiques et la gestion intensive des zones vertes sont responsables de la modification des communautés au-dessus du sol : mais quelle est la situation sous les pieds des citoyens ? Et surtout, comment caractériser l'état biologique des sols alors que ce domaine est très largement inexploré, une *terra incognita* dont la majeure partie des habitants est invisible à l'œil nu, voire inconnue de la science (Decaëns, 2010) ?

En Suisse, dans un parc urbain de la ville de Berne, le Kocherpark, le prélèvement de vers de terre dans une zone de pelouse, régulièrement fertilisée, arrosée et tondue une fois par semaine, et une zone boisée composée d'arbres feuillus et de buissons avec une couche de litière non perturbée, a révélé une différence notable entre les populations lombriciennes des deux sites (Maurer, 2015). Si la zone boisée abrite

une biocénose diversifiée et similaire à celle des zones forestières naturelles, la diversité spécifique et la biomasse des vers de la pelouse sont nettement inférieures à celle des prairies du Moyen Pays voisin. Néanmoins, l'herbe tondue et laissée sur place fournit une alimentation abondante à l'espèce *Lumbricus terrestris*; par ailleurs, dans les deux sites, l'activité des lombrics permet une bonne structuration du sol et une infiltration des eaux de pluie par les galeries des vers. Le rôle des parcs et jardins urbains dans le maintien de la vie souterraine a également été mis en évidence pour les communautés microbiennes : à Stuttgart, D, la biomasse totale des microorganismes des zones de jardin est d'environ 1,5 g C/kg de sol frais, dix fois plus élevée que celle des zones de trafic, très fortement perturbées (Lorenz & Kandeler, 2005).

L'hétérogénéité spatiale et temporelle des sols en ville, et leur degré d'anthropisation entravent la connaissance précise des communautés biologiques. Néanmoins, à l'instar des sols naturels, la formation et le fonctionnement, et donc les fonctions écologiques des sols urbains, dépendent foncièrement de leurs organismes.

Si la connaissance précise des organismes des sols, tant urbains qu'agricoles, viticoles ou naturels, est pour le moment encore fragmentaire, il est toutefois possible d'utiliser certaines espèces ou groupes fonctionnels pour évaluer la qualité des sols des villes. Il a été récemment démontré que les vers de terre, les enchytréides et les nématodes sont des bioindicateurs efficaces de certaines propriétés des sols urbains, comme leur stabilité structurale, ou de leur mode de gestion (apports de compost, arrosage) (Amossé 2014; Amossé *et al.*, 2016, 2017). Certaines pratiques permettent de promouvoir la biodiversité des sols et de maintenir leurs fonctionnalités. Le taux de matière organique en particulier joue un rôle clé comme réserve nutritive pour les microorganismes (Lorenz & Kandeler, 2005; Wang *et al.*, 2011) mais aussi pour les arthropodes (Santorufò, 2012), facilitant ainsi l'immobilisation des contaminants (Craul, 1985). Indirectement, la mise en place de toits végétalisés, même si ceux-ci ne remplacent pas les systèmes naturels, accroît également la biodiversité (cf. p. 82 et 425). Au final, le domaine des organismes des sols urbains (diversité, biomasse, fonctions) reste peu exploré, mais leur statut d'« ingénieurs » des villes, pour certains d'entre eux, est justifié (Havlicek, 2016).

## Fonction de régulation : le sol urbain régule le climat

### Régulation thermique

L'effet de l'îlot de chaleur urbain est caractérisé par une élévation significative des températures des zones métropolitaines par rapport aux zones rurales adjacentes. La différence des températures est particulièrement perceptible pendant les saisons estivale et hivernale, et elle est plus accentuée durant la nuit. Ce phénomène n'est pas récent, puisqu'il a déjà été décrit dans la deuxième moitié du XIX<sup>e</sup> siècle par Luke Howard (Mills, 2008), qui a reconnu l'impact des activités humaines sur le climat urbain. Les causes majeures de l'effet d'îlot de chaleur urbain sont la diminution de la couverture végétale et l'augmentation des surfaces forcées comme le goudron, qui absorbent la radiation solaire et la renvoient sous forme de rayonnement infrarouge réchauffant l'atmosphère.

Une partie des études dévolues aux méthodes de réduction des températures en ville a été consacrée aux solutions technologiques par la réduction de l'albédo des bâtiments ou du pavage (Rossi *et al.*, 2014; Santamouris, 2014). Cependant, par des échanges de gaz à effet de serre et d'énergie avec l'atmosphère, un système sol-végétation fonctionnel peut aussi jouer un rôle décisif dans l'action rafraîchissante de l'air en milieu urbain. L'évapotranspiration de la végétation ou l'évaporation de l'eau du sol contribue à la réduction de la température (Akbari *et al.*, 2001; Jacobson & Ten Hoeve, 2012). Dans ce contexte, une étude à l'échelle d'un quartier de Genève a confirmé l'importance du type de surface (revêtement minéral artificiel ou surface végétalisée) sur le rafraîchissement lors de périodes de canicule (voir l'encadré).

### La régulation thermique : exemple de deux sites en ville de Genève

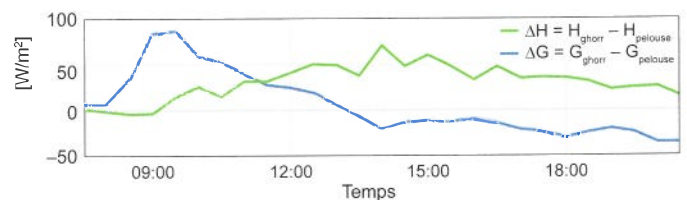
L'objectif du projet THER-SOL (Bullinger *et al.*, 2016) était de comparer, en terme énergétique, l'effet de rafraîchissement de deux types de sols urbains lors de la canicule de 2015, où les températures maximales de l'air étaient situées durant plusieurs jours entre 30°C et 37°C (fig. 14.9).

Sur l'ensemble de la journée (fig. 14.10), le site «ghorr» (un revêtement minéral gravillonné) libère plus de chaleur ( $\Delta H = 32\%$ ) que la pelouse, sous forme de chaleur sensible. En raison de son caractère drainant (sable grossier) et de son faible albédo (couleur rouge), il réagit plus rapidement que le site «pelouse» lors de gain et de perte de chaleur transportée dans le sol ( $\Delta G$ ). Lors de journées de grande chaleur sans précipitations, le site «ghorr» exposé au soleil provoque ainsi une forte augmentation de la température ressentie par les citoyens. Inversement, la capacité d'évaporation du sol sous pelouse et l'évapotranspiration de la végétation, couplées à un arrosage bi-journalier, induisent un potentiel de rafraîchissement plus important.

Ainsi, même dans un espace vert de taille réduite, de moins d'un hectare, un sol végétalisé permet un effet rafraîchissant notable en cas de canicule. La transformation de certaines surfaces imperméables (parking, îlots routiers, trottoirs et ronds-points, chemins, lignes de tramway) en sol végétalisé à horizon organo-minéral même peu développé permettrait une nette atténuation de la sensation de chaleur lors de canicule. En cas de doublement des surfaces perméables actuelles, la réduction de l'îlot de chaleur est estimée à 1,1°C dans le contexte urbain de ce quartier de Genève.



14.9 Étude de la régulation thermique du sol à Plainpalais, Genève. A. Site «ghorr». Anthrosoles Construit composé d'une couche de 8 cm d'épaisseur de ghorr du Beaujolais, sur un mélange de ghorr et de cailloux. B. Site «pelouse». Anthrosoles Artificiel composé d'un horizon Zt de 50 cm d'épaisseur avec un horizon organo-minéral de 5 cm en surface, sous une pelouse avec un arrosage bi-journalier.



14.10 Différences des moyennes de flux H ( $\Delta H$ ) et G ( $\Delta G$ ) entre les sites «ghorr» et «pelouse» lors de jours de canicule. H = flux de chaleur entre la surface du sol et l'air; G = chaleur transportée dans le sol par conduction. Plainpalais, Genève. D'après Bullinger *et al.*, 2016.

Le potentiel du sol à réguler le climat global par émission ou par stockage du carbone est largement discuté pour les sols agricoles et forestiers, alors que les sols urbains n'ont été que peu étudiés de ce point de vue (Lorenz & Shaw *in* Levin *et al.*, 2017; Vasenev *et al.* *in* Lal & Stewart, 2018), partant de l'idée que les villes sont des milieux artificiels où les services écosystémiques sont fortement perturbés.

C d t l ' t ' l t d b dans le sol rban est

de carbone organique de cette zone urbaine sont plus élevés que ceux des régions agricoles avoisinantes (Edmondson *et al.*, 2012). Plus étonnant encore, cette recherche a montré qu'il n'y avait pas de différence significative entre les sols des espaces urbains verts et ceux recouverts par des matériaux imperméables comme le goudron ! Pour l'heure, il est difficile de déterminer si le stock de carbone organique sous les surfaces imperméabilisées est hérité du sol ou des matériaux préexistants, ou s'il résulte de la colonisation par les racines et les organismes du sol (fig. 3.4.3).

### Régulation hydrique

De manière générale, les sols anthropisés, comparés aux sols naturels, présentent une capacité de régulation hydrique amoindrie (tab. 14.11). Leur épaisseur, la présence de matériaux grossiers, les discontinuités limitent leur capacité de rétention en eau et la remontée capillaire et favorisent les écoulements latéraux plutôt que verticaux. Les écoulements, généralement rapides, sont fortement ralentis dans le cas de sols compactés. La capacité de ces sols à amortir la variation des flux lors d'apports d'eau massifs (pluies intenses, orages) ou de déficit d'eau est donc faible. Or, une bonne régulation hydrique est également un atout sur le plan de la régulation thermique.

La capacité de régulation hydrique varie considérablement d'un sol urbain à l'autre et d'un revêtement du sol à l'autre ; des alternatives sont ainsi testées pour favoriser l'infiltration, le stockage d'eau voire l'épuration dans les sols urbains. Il s'agit de choix de revêtements (tab. 14.12), d'adaptation des usages du sol ou de l'implantation de noues. Les noues, petits fossés partiellement constitués de sol, remanié ou non, puis végétalisés, sont destinées à stocker provisoirement les eaux de ruissellement, à réguler leur écoulement par infiltration et évapotranspiration et à améliorer leur qualité par immobilisation voire dégradation biologique des polluants organiques. L'implantation de noues comme systèmes régulateurs et épurateurs des eaux de chaussées se généralise en Europe, dans des agglomérations comme Genève, en particulier lors de la création de nouveaux quartiers (fig. 14.13).

	Sol naturel	Sol urbain
Évapotranspiration	50%	15-30%
Infiltration dans le sol	35%	0-15%
Ruissellement	15%	55-75%

**14.11** Dans le sol urbain, le ruissellement augmente au détriment de l'infiltration en raison : (i) de la dégradation de la structure du sol suite à la perte d'activité biologique et de matière organique ; (ii) du tassement dû au piétinement et aux passages répétés d'engins ; (iii) du scellement partiel ou total de la surface du sol. D'après Lusk & Toor *in* Lal & Stewart, 2018.



Revêtement	Goudron traditionnel	Pavés perméables	Alvéoles en ciment	Pelouse
Surface scellée (%)	100	80	60	0
Coefficient de ruissellement (0-1)	1	0,5-0,6	0,6-0,7	< 0,1

**14.12** Impact du type de revêtement sur le ruissellement hydrique. D'après European Environmental Agency, 2016.



**14.13** Noues conçues pour la rétention et le transport des eaux de surface dans le nouvel éco-quartier des Vergers à Meyrin GE.

Par ailleurs, dans l'ensemble de la Suisse, plusieurs communes incitent à la végétalisation des toitures, un aménagement qui participe à l'amortissement des pics de crues (cf. p. 82). Le projet SAGE mené à Genève teste le potentiel des différents sols et usages vis-à-vis de l'infiltration d'eau en ville, dans les quartiers existants (voir l'encadré).

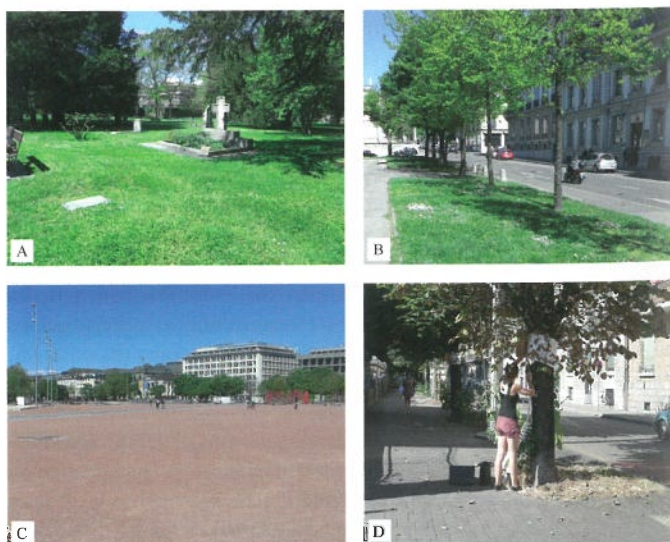
### L'infiltration de l'eau, exemples de sites en ville de Genève

L'objectif du projet SAGE (Boivin *et al.*, 2017) était de tester les quatre principales situations d'infiltration et de rétention d'eau actuellement présentes en ville : les sols dans les parcs ou les cimetières, les bandes herbeuses et arborisées, les surfaces minérales et les fosses de plantation d'arbres (fig. 14.14).

La capacité d'infiltration de l'eau, estimée par la conductivité hydraulique à saturation ( $K_{sat}$ ), est assez faible, comparée par exemple à celle de sables purs, située entre 36 et 36000 mm/h (Gerolin & Le Nouveau, 2014). Elle diffère selon les systèmes :

- pelouse de parc : très variable, de faible à moyenne, située entre 2 et 24 mm/h,
- bande herbeuse et arborisée : variable, entre 6 et 21 mm/h,
- surface minérale (ghorr) : moyenne, d'environ 12 mm/h,
- fosse de plantation d'arbre : faible, entre 6 et 8 mm/h.

En adaptant la qualité des substrats dans les fosses de plantation d'arbres, cette capacité d'infiltration pourrait être largement augmentée. Des premiers tests avec un substrat à base de déchets verts pyrolysés et compostés montrent une capacité d'infiltration atteignant 28 mm/h.



**14.14** Quatre situations d'infiltration d'eau à Genève. A. Pelouse dans un parc de cimetière. B. Îlots arborisés. C. Surface minérale (ghorr du Beaujolais). D. Fosse de plantation d'arbre.

## Fonction de production : le sol urbain peut être productif

La fonction de production se rapporte à l'obtention, dans des écosystèmes naturels ou cultivés, de denrées alimentaires végétales ou de matériaux comme le bois ou les fibres végétales. Cette fonction a toujours été réalisée en milieu urbain, essentiellement dans les parcs et jardins privés, pour des raisons ornementales et de délasserment. L'importance de cette fonction varie considérablement d'une ville à l'autre. À Genève par exemple, on compte 330 ha d'espaces verts disséminés dans tous les quartiers de la ville. Ils participent à la conservation du patrimoine végétal, servent de corridor biologique et améliorent le cadre de vie et la qualité de vie des Genevois (Service des espaces verts de la ville).

L'agriculture n'est pas absente des villes, même si le terme « agriculture urbaine » peut sembler paradoxal. En effet, dans l'imaginaire collectif actuel, l'agriculture est le propre du monde rural ; la ville est un lieu d'habitation dédié aux activités des secteurs secondaire et tertiaire. Or, les limites entre la ville et la campagne (fig. 1.3.1), l'usage du sol urbain et les pratiques culturelles ont au cours du temps fortement varié dans les villes européennes, à Genève notamment (Roud, 2013 ; voir l'encadré).

### Évolution de la pratique de l'agriculture à Genève-ville

Au Moyen Âge, la limite entre la ville de Genève et la campagne est nette, matérialisée par une enceinte ; l'usage agricole du sol est présent à l'extérieur mais également à l'intérieur des remparts. Les fortifications du XII<sup>e</sup> siècle englobent des champs, des vignes et des jardins. Lors de la Révolution industrielle du XIX<sup>e</sup> siècle, suite à l'augmentation de la population urbaine, à l'amélioration des transports (essor du chemin de fer) et de la conservation des denrées périssables, l'agriculture délaisse la ville et se concentre en milieu rural. Avec le démantèlement des fortifications en 1849 et l'extension de la ville, les jardins urbains se raréfient, ceux de Plainpalais disparaissant même totalement. On assiste en parallèle à une augmentation des rendements en zone agricole périphérique et à un appauvrissement des sols urbains, ceux-ci ne bénéficiant plus d'apports organiques issus de l'assainissement des villes (déjections animales des chevaux, recyclage des déchets de type ordures ménagères, eaux usées, etc.) (Roud, 2013).

À partir de 1932, l'arrivée massive de main d'œuvre ouvrière en ville s'accompagne de la création de jardins ouvriers urbains. L'agriculture urbaine proprement dite est toutefois remise à l'honneur lors de la Deuxième Guerre mondiale afin d'augmenter la capacité de production alimentaire du pays. Entre 1939 et 1943, dans le cadre du plan Wahlen, la surface des cultures est de 36,6 ha en ville de Genève (Archives de l'État de Genève). On dénombre alors plus de 4000 jardinets d'environ 200 m<sup>2</sup>, et les surfaces des parcs publics sont la plupart labourées et plantées de légumes et, surtout, de pommes de terre (fig. 12.16B). Dès les années 1950, on assiste au second déclin de l'agriculture urbaine, qui ne subsiste qu'exceptionnellement (fig. 14.15). Plus de la moitié des jardins ouvriers – rebaptisés jardins familiaux – disparaissent et/ou sont déplacés en périphérie de la ville.

Depuis les années 2000, on assiste à l'émergence ou à l'expansion de plusieurs formes d'agriculture urbaine (potagers urbains, jardins familiaux, jardins partagés) qui s'épanouissent dans les cités européennes et nord-américaines (Nugent, 2000). En Suisse occidentale, le type prédominant d'agriculture urbaine est organisé dans les jardins potagers privés ou les jardins familiaux (fig. 3.7.1). Habituellement assez intensive, la production est consommée à la maison ; ces « fermiers urbains » recherchent avant tout un bénéfice récréatif, des interactions sociales ou privilégient une production saine et biologique, avec pour conséquence une forte augmentation de la matière organique par l'apport de compost (Blanc, 1997).

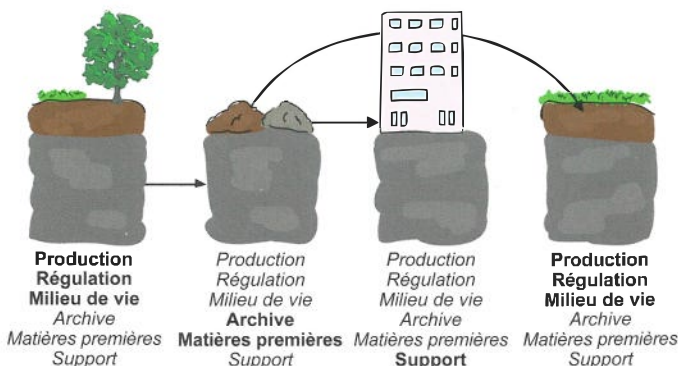
L'agriculture urbaine suscite un intérêt grandissant au niveau mondial, raison pour laquelle la FAO (1999) clarifie sa définition : « Elle se réfère à des petites surfaces (par exemple, terrains vacants, jardins, vergers, balcons, récipients divers) utilisées en ville pour cultiver quelques plantes et élever de petits animaux et des vaches laitières en vue de la consommation personnelle ou des ventes de proximité. » La tendance actuelle est à la planification de jardins plus économes en surface de sol, dans des espaces peu valorisés (au pied des immeubles par exemple), voire en périphérie de la ville. L'agriculture est également pratiquée sur les toits des bâtiments, à des fins de production alimentaire, selon une pratique venue des États-Unis mais encore peu développée en Suisse.



14.15 Un des derniers îlots d'agriculture en ville de Genève : la ferme Budé.  
A. Les champs cultivés face aux immeubles. B. Le sol : un Anthroposol Transformé.

## Fonctions de support et de source de matières premières

La fonction de support prédomine clairement en ville et les infrastructures comme les bâtiments, les voies de circulation, les sites industriels ou commerciaux recouvrent souvent plus de 50% de la surface urbaine dans les villes européennes (Fuller & Gaston, 2009), même si ce taux peut fortement varier d'une ville à l'autre. Cette fonction est exclusive car la destruction du sol abolit toutes les fonctions écologiques, comme la production, la régulation et le milieu de vie. La construction des infrastructures induit nécessairement la disparition du sol sous-jacent, en tous cas de sa partie supérieure, qui est caractérisée par une grande instabilité du point de vue du génie civil. Toutefois, le décapage des sols ne signifie pas une perte irrémédiable et définitive des fonctions écologiques. Les matériaux terreux peuvent être, et sont souvent transportés hors du site de construction et réutilisés en tant que sols ailleurs (Anthrosoles Reconstitués). Les fonctions potentielles de production, régulation et milieu de vie, liées à ces matériaux terreux, peuvent ainsi être valorisées dans un nouveau site (fig. 14.16). En outre, durant les phases de construction, les matériaux d'excavation minéraux peuvent être utilisés et constituent donc des sources de matières premières.



14.16 Transfert des fonctions lors de travaux de construction/génie civil (en gras : fonctions réalisées ; en italique : fonctions potentielles).

## Fonction d'archive : le sol urbain conserve l'histoire de l'homme

Selon ses propriétés et son état de conservation, le sol peut abriter des éléments qui permettent de retracer l'histoire humaine ou l'environnement naturel sur des millénaires. En ville, lors des fouilles archéologiques qui précèdent généralement les travaux de génie civil, l'accumulation des différentes couches de sols livre des traces de civilisations anciennes sous forme de déblais/remblais ou d'artefacts contenus dans les sols et les sédiments (Anthrosols Archéologiques). Durant des centaines d'années, en raison de l'absence des moyens technologiques, l'urbanisation a été synonyme d'accumulation progressive de couches diverses (fig. 3.4.11B). La construction ou la reconstruction de bâtiments s'est faite sur les anciennes structures dont l'évacuation était impossible avec les moyens de transports rudimentaires disponibles. Ainsi, particulièrement dans les centres historiques des villes, localisés au même endroit parfois depuis l'époque romaine, l'élévation de la surface s'est poursuivie au gré des nouvelles constructions ; elle peut atteindre une dizaine de mètres au-dessus du niveau initial, à l'exemple de remblais sur les alluvions de la Seine dans l'île Saint-Louis à Paris (Desforges & Fargier, 1990). Ces dépôts de matériaux ne sont pas tous formés de sols, il peut s'agir de sédiments et de roches naturels ou de déblais de déconstruction (Anthrosols Artificiels).

Les polluants persistants sont également de précieux enregistreurs des activités humaines. C'est le cas des métaux lourds dans les sols urbains de Domach SO (cf. p. 95) et de Fribourg (voir ci-dessus), dont les teneurs évoluent selon les activités humaines passées.

## D'une fonction à l'autre... selon le degré de naturalité des sols

En dépit de leur fort degré d'artificialisation, les sols urbains peuvent, à des degrés divers, assurer leurs fonctions. Si la construction des habitats et des infrastructures de transport (fonction de support)

annihile généralement les autres potentialités du sol en le détruisant, la production de biomasse, que ce soit à des fins d'alimentation ou d'embellissement paysager, va souvent de pair avec la régulation climatique et hydrique... tout en offrant un milieu de vie pour des communautés biologiques. Toutefois, les trois fonctions écologiques liées à l'activité biologique (production, régulation et milieu de vie) des sols urbains dépendent principalement de l'état des sols, c'est-à-dire de leurs propriétés naturelles conservées ou non et des modifications anthropiques.

Globalement, les sols proches de leur état naturel, qu'ils soient en place (Anthrosols Transformés) ou qu'ils aient été reconstitués à partir de matériaux terreux importés (Anthrosols Reconstitués), possèdent des propriétés qui leur permettent de remplir les fonctions écologiques (tab. 14.17). À l'inverse, la faible profondeur et la teneur très faible en matière organique des sols artificialisés (Anthrosols Artificiels, certains Anthrosols Construits) réduit nettement leur potentiel à abriter une communauté biologique active et, par conséquent, leur capacité à assurer la croissance des végétaux et à réguler les différents cycles d'eau et de matières, d'autant plus en cas de scellement de leur surface. La fonction de régulation hydrique, thermique mais également de purification de l'air mérite d'être particulièrement soulignée ; ses effets bénéfiques pour le citoyen ne peuvent en effet être externalisés, contrairement à la production alimentaire par exemple, car les aliments sont généralement produits en dehors des villes.

## LAISSER LIBRES ET VALORISER LES SOLS URBAINS...

Les villes sont loin d'être un milieu sans sol ! Établir un bilan sur l'état quantitatif et qualitatif fonctionnel des sols urbains est devenu une absolue nécessité à l'évaluation du fonctionnement global du milieu de vie d'environ 75% de la population suisse ! Une gestion raisonnée des surfaces en ville, fondée aussi sur la qualité et la multifonctionnalité des sols, est une contribution à la qualité de vie des citoyens. Le sol urbain, proche de l'état naturel ou correctement reconstitué, ne mérite pas d'être totalement bétonné !

### Services écosystémiques

### SUITMAs (S1 à S4). Types selon le Référentiel pédologique

		S1. Sols pseudonaturels	S2. Sols construits ou non, avec végétation artificielle	S3. Sols issus de déchets	S4. Sols bruts scellés
		Divers références et anthrosols modifiés	Anthrosols Transformés, A. Reconstitués	Anthrosols Artificiels, A. Construits, A. Archéologiques	Anthrosols Artificiels scellés
Approvisionnement	Production de nourriture	++	++	0	0
	Autre biomasse	+++	++	++	0
	Réservoir de minéraux	+	+	+++	0
	Apport d'eau	0	+	0	+++
Régulation	Contrôle du ruissellement et des crues	+++	+++	++	+
	Contrôle de l'érosion	++	+	++	0
	Diminution de la pollution	++	+++	++	0
	Recyclage des déchets	+	+++	+++	0
	Régulation du climat global	+++	++	++	+
	Régulation du climat local	+++	++	+	0
	Purification de l'air	+++	++	+	0
	Contrôle du bruit	++	+++	++	+
Services culturels	Récréation	+++	++	0	0
	Archive de l'histoire	+	+	+++	++
	Valeur paysagère	++	+++	+	+
	Éducation	+++	+++	++	+
Fonctionnement écosystèmes	Réservoir de biodiversité	+++	+++	++	0
	Support de végétation	+++	+++	++	0

14.17 Évaluation semi-quantitative des services écosystémiques assurés par quatre catégories de sols urbains. De 0 = service non assuré à +++ = service très bien assuré. D'après Morel *et al.*, 2015.

# REMERCIEMENTS

Note : Les fonctions et rattachements institutionnels mentionnés correspondent généralement à la période de collaboration à cet ouvrage.

Ce livre est une véritable œuvre collective. Les auteurs principaux ont pu compter sur les apports précieux de plus de deux cents personnes qui, à des titres divers, ont contribué à l'ouvrage. Que toutes soient chaleureusement remerciées... ainsi que celles que nous aurions involontairement oubliées !

Nos remerciements chaleureux et amicaux s'adressent en premier lieu aux coauteurs de cet ouvrage, qui l'ont enrichi de leurs compétences dans le domaine appliqué que constitue l'usage des sols. Chacun, dans sa thématique, a judicieusement mis en lumière les interactions entre l'homme et les sols : une orientation indispensable à toute protection efficace du sol. Ces personnes nous ont également fait de nombreuses suggestions lors de réunions de préparation, en salle ou sur le terrain. Notre profonde gratitude va ainsi à :

Géraldine Bullinger, professeure en sciences de l'environnement à la Haute école d'ingénierie et d'architecture de Fribourg/HES-SO, coauteure du chapitre sur les sols urbains ; Géraldine a aussi fourni de nombreuses informations pédologiques et plusieurs photographies ;

Jean-Pierre Clément, ingénieur agronome, ancien adjoint scientifique à l'Office fédéral de l'environnement, section Sols, à Berne, coauteur du chapitre sur les sols agricoles, qui a étoffé le livre sur les aspects juridiques et politiques de la protection du sol en Suisse ;

Michel Gratier, ancien responsable de la protection des sols du canton de Vaud, à Lausanne, coauteur du chapitre sur les sols agricoles ; Michel a en outre participé à plusieurs visites de terrain et fourni de nombreuses informations pédologiques et des photographies ;

Elena Havlicek, collaboratrice scientifique à l'Office fédéral de l'environnement, section Sols, à Berne, coauteure du chapitre sur les sols urbains ; Elena a de plus livré une documentation importante sur la protection des sols en Suisse et a contribué à la première version de la Clé de détermination des types de sols ;

Pascal Junod, ingénieur forestier d'arrondissement à Boudry NE et coresponsable du Centre de compétence en sylviculture à Lyss BE, auteur du chapitre sur les sols forestiers ; Pascal a également fourni des documents concernant la sylviculture et plusieurs photographies ;

Isabelle Letessier, pédologue spécialisée en sols viticoles, du bureau Sigales à Grenoble, France, auteure du chapitre sur les sols du vignoble ; Isabelle a procuré de nombreuses informations pédologiques et des photographies, et a facilité plusieurs contacts.

Ce livre n'aurait pas vu le jour sans les aides et contributions majeures des personnes ci-dessous. Nous les remercions très chaleureusement et amicalement de leurs apports dans les domaines analytiques, descriptifs, rédactionnels ou encore esthétiques qui ont consolidé cet ouvrage. Un très grand merci à :

Alexandre Buttler, directeur du Laboratoire ECOS-EPFL, pour l'appui sans faille de son laboratoire et la transmission d'informations pédologiques et de photographies ;

Nicolas Dufaux, pour les magnifiques photographies des profils de sols et de moult détails, ainsi que pour sa très agréable compagnie sur le terrain ;

Sandrine Eberlé, illustratrice scientifique indépendante, pour le soin et la sensibilité mis à la réalisation des dessins des transects paysagers, de divers graphiques, des cartes géologiques, pédologiques et phytosociologiques, ainsi que pour son aide sur le terrain et la livraison de photographies ;

Pierre Faivre, professeur émérite de pédologie à l'Université de Savoie, Chambéry, France, qui a assuré avec une grande compé-

tence la relecture scientifique et a apporté de précieux compléments au texte ;

Sylvette Gobat, dessinatrice artistique à Coffrane NE, pour la beauté de l'aquarelle de couverture, ses conseils iconographiques et de nombreuses relectures ;

Roxane Kohler, responsable du laboratoire d'analyses à l'Université de Neuchâtel, qui a organisé, coordonné et contrôlé avec grand soin plusieurs milliers d'analyses de sols ;

Claire Le Bayon, professeure titulaire à l'Université de Neuchâtel, dont le soutien indéfectible a été essentiel à l'achèvement de cet ouvrage, grâce à son aide sur le terrain, ses compétences en biologie du sol et la livraison de nombreuses photographies ; Claire a aussi vérifié l'ensemble des présentations des paysages et des sols et a réalisé la Clé de détermination des formes d'humus ;

Lorraine Martignier, docteur en Géosciences et environnement de l'Université de Lausanne, pour la parfaite réalisation des schémas des profils de sols, la fourniture d'informations pédologiques et de photographies ;

Dylan Tatti, collaborateur scientifique à la BFH-HAFL, Zollikofen BE, pour son aide précieuse sur le terrain, sa contribution à la réalisation de la Clé de détermination des formes d'humus, sa fourniture d'informations pédologiques et son enthousiasme contagieux ;

Gilles Tisserand, qui a relu d'un œil critique la totalité du texte et a suggéré maintes améliorations stylistiques ;

Augusto Zanella, professeur d'écologie forestière à l'Université de Padoue, Italie, pour sa préface originale et amicale et ses apports pertinents lors de nombreuses discussions scientifiques.

Nos vifs remerciements s'adressent aux personnes suivantes, qui se sont fortement et durablement investies lors de la préparation de cet ouvrage, notamment comme guides de terrain ou lors de la relecture de certains chapitres. Leur contribution a été déterminante :

Stéphane Burgos, BFH-HAFL, Zollikofen BE : expertise pédologique, photographies,

Judit Deák, Office du patrimoine et de l'archéologie, canton de Neuchâtel : expertise archéologique, relecture de chapitre, photographies, autorisations,

Reynald Delaloye, Université de Fribourg : guide de terrain, expertise géologique et climatique, relecture de chapitre,

Raymond Delarze, Bureau BEB, Aigle VD : expertise phytosociologique, relecture de chapitre,

François Füllemann, Direction générale de l'environnement, canton de Vaud : données pédologiques, expertise pédologique, photographies, autorisations,

Stéphanie Grand, Université de Lausanne : guide de terrain, informations pédologiques, relecture de chapitre,

Sébastien Morard, Bureau GeoAzimut, Fribourg : guide de terrain, expertise géologique et climatique, photographies,

Matteo Mota, HES en Viticulture et Œnologie, Changins, Nyon VD : expertise pédologique, informations pédologiques, photographies,

Luc Scherrer, Fondation rurale interjurassienne, Courtemelon JU : guide de terrain, expertise pédologique et agronomique, photographies,

Éric Verrecchia, Université de Lausanne : expertise géologique et pédologique, relecture de chapitre, photographies,

Pascal Vittoz, Université de Lausanne : aide de terrain, expertise phytosociologique, photographies,

Stephan Zimmermann, WSL, Birmensdorf ZH : données pédologiques, photographies, autorisations.