



Journée d'étude du 21 mars 2024

# Restaurer les fonctions des sols ?

Approches scientifiques  
et perspectives  
interdisciplinaires





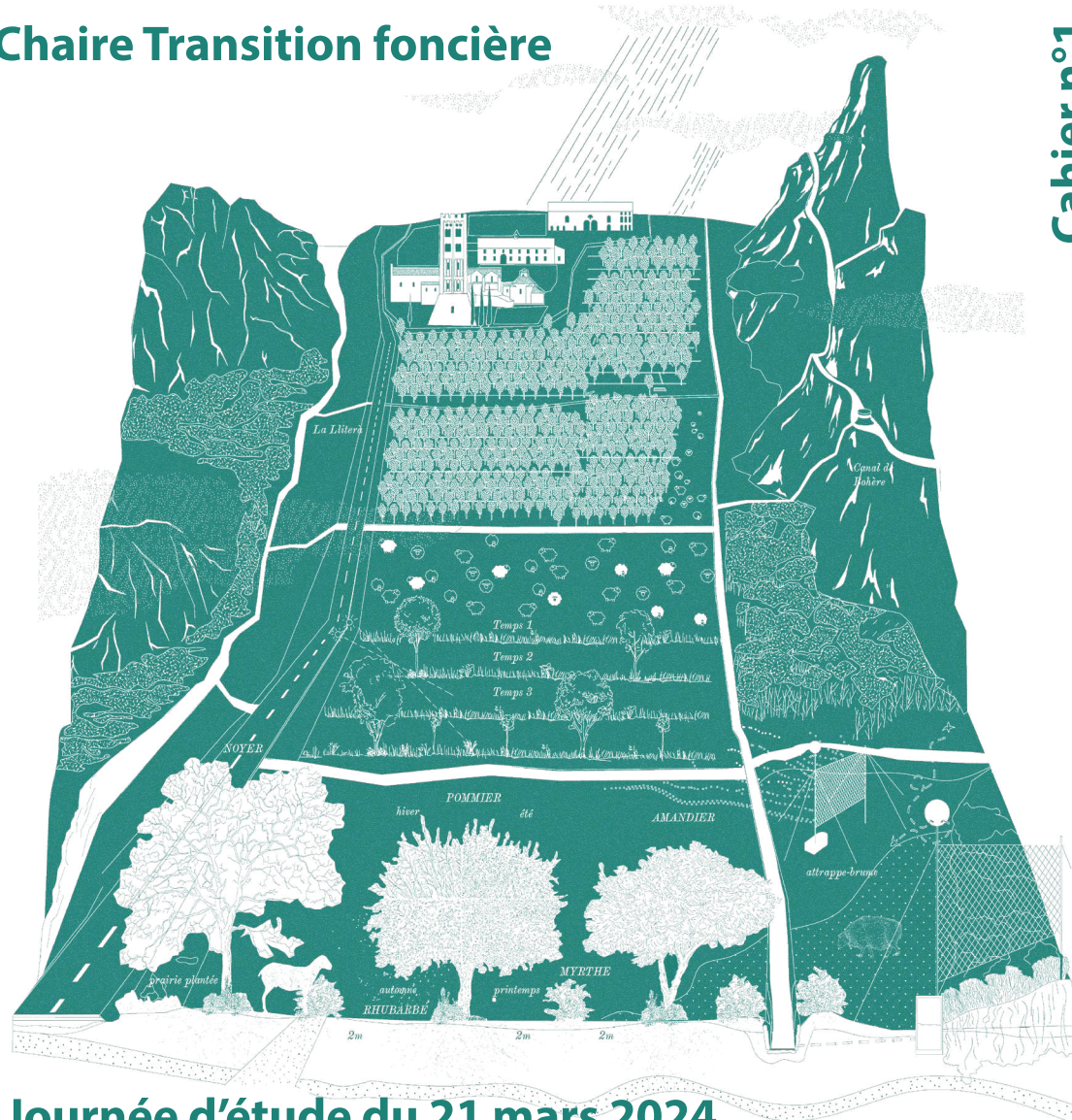




**Enjeu en débat :**  
**comment**  
**refonctionnaliser les**  
**sols?**







Journée d'étude du 21 mars 2024

# Restaurer les fonctions des sols ?

Approches scientifiques  
et perspectives  
interdisciplinaires









**Jean Guiony**

Président de l'Institut  
de la Transition foncière

**Michèle Pappalardo**

Présidente de la Fondation  
Université Gustave Eiffel

# PRÉFACE



**Les sols et leurs usages constituent la nouvelle frontière de la transition écologique. Dépasser le seul prisme foncier dans notre compréhension et notre action territoriale et urbaine, tel est l'objectif de la Chaire Transition foncière, qui aborde les sols pour ce qu'ils sont : une véritable matrice articulant, par ses différentes fonctions écologiques, les enjeux du carbone, de l'eau, de la biodiversité, de l'agronomie.**

**Ce projet scientifique, né à l'automne 2023, est le fruit du partenariat de l'Institut de la Transition foncière et de la Fondation de l'Université Gustave Eiffel, avec le soutien fort de l'Institut CDC pour la Recherche, de l'Ensa Paris-Est et de l'École des Ingénieurs de la Ville de Paris (EIVP), et des laboratoires associés. La Chaire a pour double objectif d'engager un intense dialogue de disciplines parfois lointaines autour de l'objet sol (de la pédologie à l'urbanisme, de l'agronomie au droit foncier, de la biologie à l'architecture et aux sciences politiques) ; et de favoriser le transfert de connaissances scientifiques vers l'opérationnel, vers ceux qui transforment au quotidien les sols par leur action : collectivités, acteurs du secteur agricole, foncières, promoteurs...**



**À l'heure de la mise en œuvre de l'objectif Zéro Artificialisation Nette (ZAN), de la loi Industrie Verte, ou encore de l'agenda européen du Règlement sur la Restauration de la nature, il nous a paru important de proposer une réflexion sur la notion de « renaturation », dans le cadre du premier cycle annuel de journées d'études.**

**Comment aborder avec rigueur cette ambition portée par les politiques publiques et les acteurs de l'aménagement ou de l'industrie ? Quelles sont les renaturations ? Leurs coûts et leurs limites ? Autant de questions discutées lors de la journée d'études du 21 mars 2024 par un panel de scientifiques d'une grande diversité, que nous souhaitons ici remercier pour leur engagement.**







## Édito

- 12 *Mathieu Delorme,  
Youssef Diab*

## Quelques définitions

- 17 **Fonctions, qualité et dégradations des sols urbains**  
*Béatrice Béchet*
- 23 **Renaturation ou restauration des sols ? Définitions et enjeux sémantiques**  
*Lukas Madl*

## Techniques et pratiques

- 31 **Les sols urbains : quelles dynamiques écologiques ?**  
*Sophie Joimel*
- 37 **Après le descellement, comment rendre les sols urbains multifonctionnels ?**  
*Laure Vidal-Beaudet*
- 43 **Construction de sols : le génie pédologique au service de la renaturation des sols urbains et industriels**  
*Geoffroy Séré*

## Échelles spatiales

- 53 **Quelles échelles spatiales, quels périmètres pour étudier les sols ?**  
*Adrien Baysse-Lainé, Mathieu Fernandez et Patrick Le Gouée*

## Acteurs et représentations

- 59 **Gestion des sols pour la nature en ville : un renouvellement des représentations et des pratiques**  
*Adrien Baysse-Lainé et Laure Cormier*
- 67 **Comment l'agriculture urbaine participative en Seine-Saint-Denis peut-elle s'approprier les techniques de construction de sol ?**  
*Thomas Lerch, Germain Meulemans, Henri Robain et Ana-Cristina Torres*
- 75 **Décrypter les coûts de la restauration des sols urbains**  
*Charles Claron et Mathilde Salin*

## Des recherches à la pratique

- 85 **Quelle articulation entre recherches scientifiques, cadre réglementaire et pratiques de gestion des sols ?**  
*Philippe Branchu, Camille Brussier, Stéphanie Herbé et Geoffroy Séré*

## Conclusion

## Bibliographie

## Index des figures









**Mathieu  
Delorme**

Paysagiste-urbaniste,  
directeur de l'Ensa Paris-Est,  
vice-président de l'université  
Gustave Eiffel, codirecteur de la Chaire  
Transition foncière

**Youssef  
Diab**

Professeur en génie  
urbain à l'Université  
Gustave Eiffel, directeur  
des Chaires et de la  
Prospective à l'EIVP,  
codirecteur de la Chaire  
Transition foncière

ÉDITO



La Chaire Transition foncière portée par l'Institut de la Transition foncière et l'Université Gustave Eiffel, à travers ses deux établissements composantes, l'École nationale supérieure d'architecture de Paris-Est et l'École des Ingénieurs de la Ville de Paris, est un lieu de croisement des recherches, pratiques et innovations en lien avec le foncier dans toutes ses dimensions. Elle se situe à l'interface des sciences humaines et sociales, des sciences du vivant, et des disciplines du projet spatial (ingénierie urbaine, paysage, architecture). Par son positionnement, elle porte l'objectif de fédérer et de devenir un lieu de rencontres de chercheurs de disciplines différentes, et de capitalisation des connaissances scientifiques sur les sols et le foncier.

Les journées d'études de la Chaire incarnent un lieu de rencontre entre ces chercheurs. Elles ont lieu deux fois par an autour d'une thématique annuelle. Pour l'année 2024, la notion de « renaturation » est à l'agenda des deux journées du 21 mars 2024 et du 12 décembre 2024.

L'utilisation du terme renaturation est récente, sa sémantique incertaine, son appropriation et sa déclinaison dans les documents de planification et le projet de transformation spatiale (territorial, urbain, architectural et de paysage) sont sujettes à controverses.

En effet, la renaturation désigne une large gamme d'actions d'aménagement destinées à réduire le degré d'anthropisation d'un espace et à toutes les échelles. Dans le langage courant, il s'agit, tout simplement d'apporter davantage de « nature » à un espace perçu comme trop artificiel. Cette simplification excessive dans les pratiques d'aménagement nous a poussés, lors de cette journée d'études, à décliner les significations scientifiques de cette notion. Nous avons mis l'accent sur la réparation et la restauration des sols que la notion de renaturation véhicule : c'est un processus par lequel les espèces vivantes recolonisent un milieu ayant subi des perturbations écologiques. Au cœur de ces processus de restauration, on retrouve la biodiversité, sa mise en récit et en espace. En effet, l'objectif de ces actions réside en une amélioration des fonctionnalités des sols, dans un processus de transformation spatiale qui questionne tout autant l'esthétique de nos espaces habités que son impact écologique.



Enfin, l'idée de renaturation laisse supposer un retour en arrière, alors qu'en écologie toute tentative de revenir à un état initial conduit à un nouvel état : celle-ci n'est pas élastique. Il conviendrait donc d'accepter l'irréversibilité des actions sociales sur les milieux, pour se demander comment mieux intégrer la pensée environnementale comme une donnée qui renouvelle les pratiques du projet de transformation spatiale de nos villes et nos territoires.

Après une première séquence de cadrage du sujet et de définitions (sols vivants, fonctions écologiques, renaturation), nous explorerons les enjeux de faisabilité technique des projets de renaturation, en donnant la parole à des écologues et pédologues. Il sera ensuite question d'articulation des échelles spatiales dans les recherches et les pratiques sur les sols vivants. La place des acteurs sociaux, économiques, et des riverains dans les pratiques de renaturation sera ensuite abordée, avant de conclure sur les besoins de croisement entre recherches scientifiques et pratiques opérationnelles de gestion des sols.

Bonne lecture !



**Qu'est-ce qu'un sol ? Quels sont les mécanismes de dégradation des sols, et comment y faire face ? Peut-on restaurer les fonctions des sols ? Quels termes utiliser : renaturation, restauration, refonctionnalisation, réhabilitation, remédiation ?**







# QUELQUES DÉFINITIONS



# Fonctions, qualité et dégradations des sols urbains

**Béatrice Béchet**

Directrice de recherche  
en hydrogéochimie  
environnementale,  
département GERS,  
Université Gustave Eiffel



Après avoir été longtemps « invisibles » sous nos pieds, ou considérés comme un matériau inerte par les aménageurs, les sols urbains connaissent un regain d'intérêt de la part des collectivités, poussées en cela par la contrainte du « zéro artificialisation nette » de la loi Climat et Résilience [01], ou par d'autres aspects de la réglementation, comme le zonage pluvial. Parallèlement, la demande sociétale de « nature en ville », portée notamment au travers d'une demande d'accès facilité à des espaces de jardinage, incite les services techniques des villes à s'interroger sur les propriétés des sols, qu'ils peuvent mettre à la disposition des citoyens [02].

En 1992, l'Association Américaine de Science du Sol propose le concept de qualité des sols pour caractériser la valeur et le bon fonctionnement des sols. Conscients des risques liés à la contamination des milieux par les activités industrielles, artisanales et de transport, les acteurs des villes se soucient généralement en priorité de la qualité chimique des sols. Mais quand il s'agit de mettre en œuvre des opérations de renaturation d'espaces dégradés ou à revaloriser, la qualité physique des sols devient un critère de réussite de l'implantation d'espèces végétales, à inclure dans les projets d'aménagement paysager, au regard de l'hétérogénéité des sols urbains et des degrés d'exigence divers des végétaux. Quant à la qualité biologique des sols urbains, ce n'est que dans la dernière décennie, dans un contexte de mise en exergue de pertes drastiques de la biodiversité mondiale, que les études scientifiques se sont amplifiées pour caractériser les organismes et la biodiversité des sols urbains [03] [04].

« Compartiment des écosystèmes souvent invisibilisé parce que situé sous les surfaces urbaines revêtues ou sous le bâti, le sol urbain fait l'objet de multiples représentations. »

Cette introduction est l'occasion de reposer les bases de ce que sont les sols urbains, leurs fonctions et comment les services que nous en attendons sont dépendants de leur fonctionnement, qui peut être évalué à l'aide d'indicateurs de qualité. L'occasion aussi de préciser les altérations de leurs fonctions, que les activités anthropiques induisent et certaines des conséquences qui en découlent.

- [01] Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des Territoires (2023). *Zéro Artificialisation Nette, Guide synthétique*, version 27/11/2023.
- [02] Bodénan P., Doux H., Béchet B., Cannavo P., Jean-Soro L., Lebeau T., Le Guern C., et Vidal-Beaudet L., 2022. *Le jardinage urbain : le défi de la qualité des sols urbains pour les collectivités*, in Projets de paysage, p. 27. <https://doi.org/10.4000/paysage.31684>
- [03] Béchet B. (coord.), Le Bissonnais Y. (coord.), Ruas A. (coord.), Desrousseaux M. (coord.) et Schmitt, B. (coord) (2017) *Sols artificialisés et processus d'artificialisation des sols, Déterminants, impacts et leviers d'action*, INRA (France), 609 pages.
- [04] Joimel S., Schwartz C., Hedde M., Kiyota, S., Henning P., Nahmani J., Pérès G., Vergnes A., et Cortet J. (2017b). *Urban and industrial land uses have a higher soil biological quality than expected from physicochemical quality*, in *Science of the Total Environment*, p.584–585, p.614–621. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.01.086>



## Le sol, une diversité de représentations

Compartiment des écosystèmes souvent invisibilisé parce que situé sous les surfaces urbaines revêtues ou sous le bâti, le sol urbain fait l'objet de multiples représentations. Pour les planificateurs, le sol est une surface, dans une vision 2D. Une vision 3D se développe lors du passage à l'aménagement. Pour les constructeurs, en génie civil, le sol est un matériau inerte à excaver ou à évaluer d'un point de vue de ses propriétés géotechniques, pour éviter des sinistres potentiels aux constructions. Les aménageurs d'espaces verts implantent quasi-systématiquement les végétaux dans un substrat rapporté (mélange terre-pierre, sol reconstitué...). Le sol urbain est donc considéré comme un support, mais rarement comme une ressource. C'est pourtant cette approche du sol urbain, qui est à privilégier en réponse au besoin de foncier pour cultiver, pour infiltrer les eaux pluviales, pour maintenir la biodiversité... un sol vivant, qu'il convient de préserver ou de refunctionaliser pour rendre les villes plus aptes à faire face aux changements globaux.

### Quelle(s) définition(s) et services rendus par les sols urbains ?

La définition du sol donnée par l'Association Française pour l'Étude des Sols nous donne à voir le sol dans son épaisseur et sa complexité, en tant que système biogéochimique. Entre sous-sol et atmosphère, cette couche superficielle que certains nomment la « peau » de la Terre, est une interface fragile et non-renouvelable à l'échelle humaine. Il faut pourtant veiller à la préserver, pour son rôle primordial, entre autres, de support de culture et composante du cycle de l'eau. Pour autant, en milieu urbain, l'évaluation de sa qualité est requise avant tout usage sensible (par exemple sol de jardin dans les écoles). Pour optimiser les aménagements, il est important d'intégrer une réflexion globale sur la qualité de l'environnement dans une zone à aménager. Pouvoir disposer de cartographies sur la typologie des sols urbains et leurs propriétés est nécessaire pour mettre en œuvre une gestion des sols optimisée et durable. Cet objectif est difficile à atteindre et coûteux mais des avancées méthodologiques récentes sont à noter [05].

« Entre sous-sol et atmosphère, cette couche superficielle que certains nomment la "peau" de la Terre, est une interface fragile et non-renouvelable à l'échelle humaine. »

Les défis scientifiques actuels en milieu urbain relèvent de la compréhension des mécanismes de l'évolution urbaine et de ses impacts sur l'écosystème urbain, pour optimiser les mesures d'atténuation et d'adaptation aux changements globaux. La pression anthropique sur les ressources (eau, sol, air, végétation, vivant) et les cycles biogéochimiques dans les zones urbaines a conduit à l'introduction de la

[05] Ducommun C., Duvigneau C., et Vidal-Beaudet, L. (2023). *Cartographie des sols urbains : Méthode de caractérisation d'une couverture pédologique soumise à différentes formes de dénudation et d'anthroposolisation*, in *Étude et Gestion des Sols*, 30, p. 127-143.



notion de Zone Critique Urbaine [06]. Dans cette approche intégrée, il est important de considérer le sol, depuis sa composante naturelle autosuffisante (*Soil natural capital*) jusqu'à sa capacité à rendre des services écosystémiques (ou des disservices), eux-mêmes basés sur les fonctions des sols. Les services bien documentés sont les services d'approvisionnement et de régulation, les services culturels sont moins étudiés. Les disservices vont avoir trait par exemple à la présence de pollution dans les sols.

## Des menaces sur les sols, liées au processus d'artificialisation

Les sols urbains sont fragilisés et dégradés par des processus d'artificialisation qui se mettent en place d'une échelle locale (par exemple à l'échelle d'une parcelle de jardin) à une échelle plus globale (par exemple celle du bassin versant). L'échelle globale est intéressante en ce qu'elle repositionne le sol comme élément d'un paysage et de support de continuité : on parlera de trame brune. Toutefois, cela ne doit pas occulter la grande hétérogénéité spatiale et temporelle (dans l'épaisseur du profil) des sols urbains. L'acquisition de données sur la nature et les propriétés des sols urbains s'est amplifiée depuis quelques années, permettant d'avancer sur la cartographie à l'échelle du quartier. La représentation classique d'un gradient d'anthropisation du centre urbain dense vers la périphérie est amenée à évoluer, vers une représentation plus en « patchs » de sols qualifiés de pseudo-naturels, jusqu'à des sols très anthropisés.

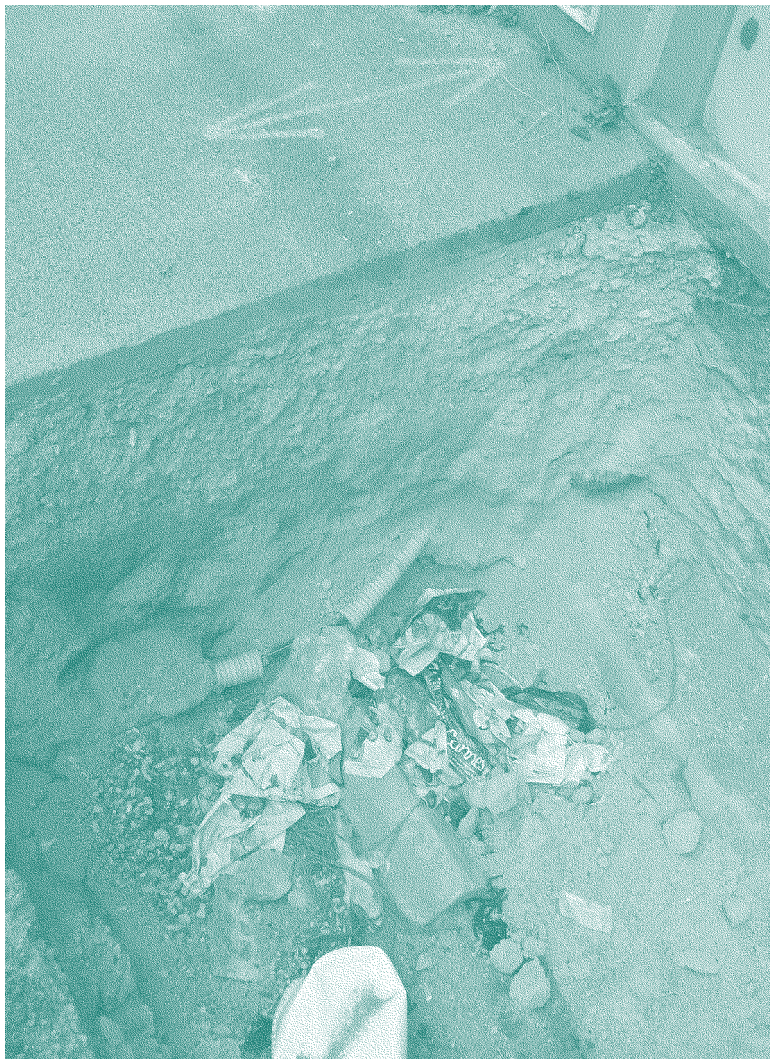
« La question qui se pose est de savoir s'il faut « faire avec » les sols en place ou si des méthodes de management des sols peuvent être mises en œuvre. »

Imperméabilisation des sols, perte de biodiversité, faible stock de matière organique, pollution... sont parmi les conséquences principales de l'artificialisation des sols. La désimperméabilisation est un levier majeur, préconisé pour retrouver un cycle de l'eau plus proche du cycle naturel en favorisant l'infiltration. Les concepts associés sont ceux de la ville perméable (*sponge city* en anglais). Mais les conséquences sont encore à évaluer scientifiquement sur le cycle de l'eau, le transfert de polluants, le confort thermique, la végétation... Par rapport à la pollution ou à d'autres altérations, la question qui se pose est de savoir s'il faut « faire avec » les sols en place ou si des méthodes de management des sols peuvent être mises en œuvre (dépollution, reconstruction de sols...). Une approche différenciée de gestion des sols selon les niveaux de contamination est déjà pratiquée grâce aux outils de mesure *in-situ* de contaminants (spectrométrie aux rayons X portable) sur des sites de type « sites et sols pollués ». La reconstruction de sols est aussi une piste d'actualité forte pour restaurer les sols [07].

[06] L'étude de la Zone Critique Urbaine est notamment l'objet du Service national d'observation Observil, créé en 2020 par le CNRS, dans le cadre du réseau OZCAR (Observatoires de la Zone Critique : Application et Recherche).

[07] Damas O. et Coulon A. *Créer des sols fertiles – du déchet à la végétalisation urbaine*, Paris, Éditions du Moniteur, 2016.





[Fig. 1] Sol scellé présent sous la surface imperméabilisée d'un trottoir et accueillant des réseaux mais servant aussi de «poubelle» le temps de l'ouverture de la tranchée pour des travaux (Nantes) (© Béatrice Béchet).

## Enjeu en débat : comment refonctionnaliser les sols ?

Préserver et restaurer les sols sont les deux voies dans lesquelles les acteurs des villes, tant publics que privés s'engagent de diverses façons, avec l'objectif de maintenir la multifonctionnalité des sols qui sous-entend de pouvoir l'évaluer. Plusieurs projets de recherche achevés ou en cours font maintenant référence au niveau national tels que DESTI-SOL, SUPRA, SITERRE, MUSE..., avec des développements d'outils, valorisés par exemple dans le cadre de l'objectif ZAN de l'ADEME.







# Renaturation ou restauration des sols ? Définitions et enjeux sémantiques

**Lukas Madl**

Doctorant en génie urbain  
(AREP; Lab'Urba,  
Université Gustave Eiffel ;  
OCS AUSser, ENSA Paris-Est)



## La renaturation au titre du ZAN : une définition incertaine

Depuis la promulgation de la loi Climat et Résilience et la stipulation d'un objectif de zéro artificialisation nette pour 2050, les discussions sur l'interprétation de cette loi ont été nombreuses, notamment autour du terme de « renaturation ». Dans le cadre du ZAN, la définition du terme est, en premier lieu, déterminée par une classification binaire en sols artificialisés et sols non artificialisés, classification qui sera vraisemblablement établie en fonction du type d'occupation du sol et de son usage [08].

[08] « Décret n° 2023-1096 du 27 novembre 2023 relatif à l'évaluation et au suivi de l'artificialisation des sols » (2023).

[09] Casagrande D.G. et Vasquez M. Restoring for cultural-ecological sustainability in Arizona and Connecticut. In *Restoration and History: The Search for a Usable Environmental Past* (193-207), Londres, Routledge Taylor and Francis Group, 2009. <https://doi.org/10.4324/9780203860373> ; Sarabi S., Frantzeskaki N., Waldenberger J., Alvarado O., Raaimakers D., Runhaar H., Stijnen C., Toxopeus H., et Vrinceanu, E. (2023). *Renaturing cities : from utopias to contested realities and futures*, in *Urban Forestry & Urban Greening*, p. 86, 127999. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2023.127999>.

En absence d'une spécification plus précise, des questions subsistent sur ce que désigne une renaturation en dehors d'un changement de couverture et/ou de type d'usage d'un sol. Dans les publications scientifiques anglophones, le terme re(-)naturing est rarement utilisé, et dans un sens différent de celui du ZAN : l'homonyme anglais décrit la restitution des liens entre l'homme et les processus naturels qui s'ajoutent à l'objectif de rétablir la santé d'un écosystème [09].

« La renaturation est une réponse à la destruction ou à la dégradation des habitats, de la flore et de la faune. »

[10] Science for Environment Policy, *No net land take by 2050?* Future Brief 14. Produced for the European Commission DG Environment by the Science Communication Unit, UWE, Bristol, 2016.

[11] Bonnefond M. et Fournier M. *Maîtrise foncière dans les espaces ruraux. Un défi pour les projets de renaturation des cours d'eau*, in *Économie Rurale*, 334, 2013, p. 55-68. <https://doi.org/10.4000/economierurale.3908> ; Ravot C., Laslier M., Hubert-Moy L., Dufour S., Le Cœur D., et Bernez I. *Apports d'une observation précoce de la végétation spontanée pionnière pour la renaturation des rives de la rivière Sélune*, in *Sciences Eaux & Territoires*, (Articles hors-série 2020), p. 1-9, 2020. <https://doi.org/10.14758/SET-REVUE.2020.HS.02>

À la différence du terme *renaturing*, l'usage français de la renaturation dans le cadre du ZAN semble faire référence à l'objectif de l'UE « No Net Land Take by 2050 » [10], où la renaturation est employée dans le contexte du recyclage des zones construites et de la compensation des travaux de construction. Dans le cas de l'UE comme pour l'objectif français, la renaturation est une réponse à la destruction ou à la dégradation des habitats, de la flore et de la faune. On pourrait donc avancer que la renaturation - définie dans le ZAN (2021) comme la « restauration, ou l'amélioration de la fonctionnalité d'un sol » - renvoie à une terminologie similaire à celle utilisée dans le monde académique dans le contexte de l'écologie de la restauration, discipline visant à contrer la perte d'habitats en restaurant les écosystèmes. En effet, certaines publications utilisent le mot renaturation de manière interchangeable avec le terme restauration, notamment dans les publications concernant la restitution des fonctions écologiques des cours d'eau [11].

## Éclairages depuis l'écologie de la restauration : des nuances sémantiques

Pour éclairer davantage ces différents termes, qui peuvent *a priori* sembler similaires, une parenthèse sur l'écologie de la restauration s'impose. Celle-ci désigne une série d'activités qui visent à améliorer les conditions environnementales et à inverser la dégradation des écosystèmes. Ces activités, appelées activités restauratrices, se différencient par les niveaux de biodiversité et fonctions écosystémiques visées, et par leur champ d'application, qui dépend fortement de l'état de dégradation du site concerné.

La **restauration écologique** désigne une activité restauratrice qui a pour objectif d'atteindre des conditions environnementales maximales. Elle décrit le processus d'assistance à la récupération d'un écosystème qui a été dégradé, endommagé ou détruit, visant la récupération des écosystèmes indigènes et l'intégrité de l'écosystème [12]. La restauration écologique a donc pour objectif de ramener un écosystème à l'état précédant sa dégradation. Celui-ci est établi par rapport à une référence historique et/ou un site de référence qui décrit l'état du site avant la perturbation anthropique ayant entraîné une dégradation. Le déroulement d'une restauration écologique dépend fortement de l'état de dégradation, du contexte environnemental et du niveau de menaces ou des pressions qui s'exercent sur l'écosystème.

« La réhabilitation ne vise pas le retour à l'intégrité d'un écosystème préexistant. »

Si ces facteurs sont trop importants, et qu'une restauration semble impossible, l'amélioration de l'écosystème peut s'effectuer par une **réhabilitation**. Celle-ci concerne des écosystèmes fortement perturbés et décrit un rétablissement ou une amélioration du fonctionnement de l'écosystème [13]. La réhabilitation ne vise donc pas le retour à l'intégrité d'un écosystème préexistant, et peut conduire à des niveaux inférieurs de biodiversité ou de fonctionnement. Elle peut aussi conduire à intégrer de nouvelles espèces, absentes de l'écosystème historique. La notion de « **refonctionnalisation** », davantage utilisée au sujet des sols, semble faire écho à cette idée de réhabilitation [14].

Le terme de **réaffectation** est aussi utilisé dans un contexte similaire à celui des deux précédents concepts, et décrit l'attribution d'un nouvel usage à un site fortement dégradé [15]. Ce nouvel usage peut être sans ou avec lien fonctionnel ou structurel avec l'écosystème préexistant [16]. Alors que cette définition semble renvoyer à une approche plus anthropique, dans la pratique ce terme décrit majoritairement l'amélioration des conditions écologiques sur un site fortement dégradé, par exemple en augmentant le niveau de fonctions écologiques [17]. Dans ce sens, la réaffectation renvoie donc plutôt à la réhabilitation, ou à la refunctionnalisation.

[12] Gann G.D., McDonald T., Walder B., Aronson J., Nelson C.R., Jonson J., Hallett J.G., Eisenberg C., Guariguata M.R., Liu J., Hua F., Echeverria C., Gonzales E., Shaw N., Declerck K., et Dixon K.W. (2019). *International principles and standards for the practice of ecological restoration*, Second edition, Restoration Ecology, p.27(S1). <https://doi.org/10.1111/rec.13035>

[13] Gann et al. (2019)

[14] Schwartz C., Cortet J., Laurent F., Morel J.-L., et Sère, G. *La refunctionnalisation écologique des sols par la revégétalisation : une autre manière d'utiliser le végétal*, in Phytotechnologies appliquées aux sites pollués, 2012, 115 pages.

[15] Corlett R.T. *Restoration, Reintroduction, and Rewilding in a Changing World*, in Trends In Ecology and Evolution, 31(6), 2016, p.453-462. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2016.02.017>

[16] Aronson J., Floret C., Le Floch E., Ovalle C., et Pontanier, R. *Restauration et réhabilitation des écosystèmes dégradés en zones arides et semi-arides : le vocabulaire et les concepts*, in L'homme peut-il refaire ce qu'il a défait ? (p. 11-29), Paris, John Libbey Eurotext, 1995.

[17] Gerwing T.G., Hawkes, V.C., Gann, G.D., et Murphy, S.D. (2021). *Restoration, reclamation, and rehabilitation : on the need for, and positing a definition of, ecological reclamation*, in Restoration Ecology, 30(7). <https://doi.org/10.1111/rec.13461>



Finalement, avant qu'une réhabilitation ou restauration soit mise en œuvre, s'impose souvent l'enjeu de réduire l'impact et/ou d'y **remédier**. Ces deux activités restauratrices incluent la réduction, pour le premier, et l'élimination, en ce qui concerne le deuxième, des impacts négatifs environnementaux et sociaux, comme la pollution ou l'exploitation non-durable d'une ressource [18].

Activité	Description
Renaturation	Des actions de restauration ou d'amélioration de la fonctionnalité d'un sol, ayant pour effet de transformer un sol artificialisé en un sol non artificialisé.
Restauration écologique	L'assistance à la récupération d'un écosystème qui a été dégradé, endommagé, ou détruit, visant à la récupération des écosystèmes indigènes et de l'intégrité de l'écosystème.
Réhabilitation écologique	Le rétablissement ou amélioration du fonctionnement et du niveau de biodiversité d'un écosystème, sans revenir à l'état d'un écosystème préexistant.
Refonctionnalisation d'un sol	La récupération des fonctions écologiques d'un sol.
Remédiation	L'élimination des impacts négatifs environnemental et social, comme la pollution ou l'exploitation non-durable d'une ressource.
Réaffectation	L'attribution d'un nouvel usage, qui peut être sans ou avec lien fonctionnel ou structurel avec l'écosystème préexistant, à un site fortement dégradé.

[Fig. 2] Différents termes utilisés dans le contexte de la renaturation et de la restauration.

## La renaturation comprise dans une approche fonctionnelle des sols

Cette analyse des différents termes utilisés en écologie de la restauration devrait permettre de mieux identifier les activités auxquelles la renaturation – au sens du ZAN – pourrait être comparée. La loi Climat et Résilience décrit aussi la renaturation comme une désartificialisation, à savoir la transformation d'un espace artificialisé en non-artificialisé. Au-delà de la nomenclature binaire des espaces artificialisés ou non, l'artificialisation est aussi définie dans la loi « comme l'altération durable de tout ou partie des fonctions écologiques d'un sol » [19]. La renaturation, ou désartificialisation, implique donc la récupération des fonctions écologiques ci-dessus, altérées ou perdues. Sachant que les espaces artificialisés sont souvent fortement dégradés, ces deux facteurs semblent suggérer que la renaturation, dans sa forme actuelle, pourrait s'apparenter à un contexte de réhabilitation, refonctionnalisation, ou réaffectation. Quels termes faut-il donc utiliser lors d'un projet de renaturation ?

[18] Gann et al. (2019)

[19] « Loi n° 2021-1104 du 22 août 2021 portant lutte contre le dérèglement climatique et renforcement de la résilience face à ses effets » (2021).

Le terme manque encore de précision et est employé de manière inflationniste pour des projets très différents : il semble nécessaire de clarifier ces questions sémantiques pour bien définir les actions incluses dans un projet. D'un point de vue scientifique, il apparaît que le choix d'un terme pertinent dépend nécessairement du contexte. Même si cela semble improbable, un projet de renaturation pourrait viser un objectif de restauration écologique, ou bien s'inscrire dans une logique de réhabilitation, si l'état de dégradation et le contexte environnemental le permettent et qu'il existe suffisamment de données pour définir l'état projeté.

Cette tendance scientifique à la précision, qui exigerait une adaptation de la terminologie au contexte, se confronte cependant à une logique pratique selon laquelle une simplification linguistique pourrait éviter la confusion parmi les acteurs de la planification et de l'aménagement urbain. Dans la mesure où une telle confusion est principalement issue d'un manque de connaissances sur la signification des différents termes, il semble important de promouvoir une sensibilisation générale des acteurs à ces éléments de vocabulaire. Pour clore ces discussions relatives à la terminologie, il serait particulièrement efficace de préciser le terme de renaturation dans la loi.







**Restaurer les fonctions des sols pour garantir des villes plus vivables : oui, mais à quelles conditions ? Comment peut-on restaurer des sols ? Avec quelles techniques ? Pour quelles finalités : renforcer la capacité d'infiltration de l'eau, construire des réservoirs de biodiversité, améliorer la fertilité des sols ?**







# TECHNIQUES ET PRATIQUES



# Les sols urbains : quelles dynamiques écologiques ?

**Sophie Joimel**

Maîtresse de conférences  
en écologie des sols,  
laboratoire ECOSYS,  
AgroParisTech



Pour introduire ce chapitre dédié aux pratiques de restauration des fonctions des sols, nous vous invitons à un voyage sous la terre : penchons-nous sur le sol, couche superficielle de la croûte terrestre qui abrite la troisième frontière biotique, appelée « biodiversité des sols ».

### Un manque de représentation de la biodiversité des sols

Si les lecteurs et lectrices peuvent éprouver des difficultés à visualiser les organismes faisant partie de la « biodiversité des sols », c'est le résultat d'un manque de représentation de ces espèces dans les imaginaires collectifs. Une simple recherche internet permet de s'en apercevoir : le terme biodiversité amène des résultats d'images de mammifères, de plantes, voire d'insectes couramment représentés comme les papillons ou les abeilles. Des représentations de vers de terre ou de collemboles, vous n'en verrez guère.

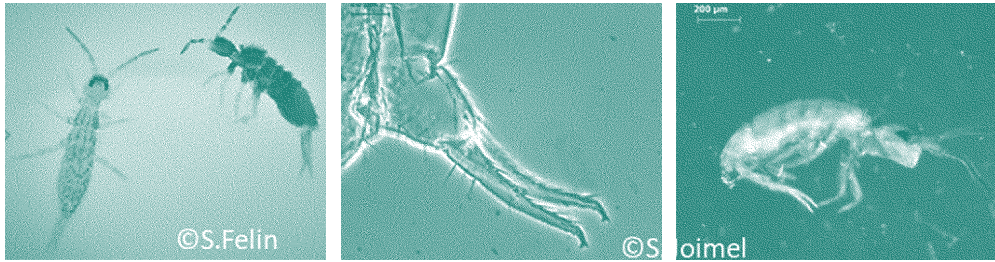
Nous pourrions penser que les porteurs de projets d'aménagement dans les collectivités territoriales sont davantage sensibilisés à ces questions. Pourtant, seul 25 % des porteurs de projets en Île-de-France (n=40 interviewés) vont mentionner la « vie dans le sol » comme partie prenante de la biodiversité urbaine, contre 98 % pour les plantes ou 78 % pour les oiseaux [20].

« Par mètre carré, nous marchons sur des dizaines d'espèces de vers de terre, nématodes ou collemboles, sur des centaines d'espèces de bactéries, voire des milliers d'espèces de champignons. »

[20] Decroix *et al.* Unpublished.

[21] Cortet J., Paquet S., Billet P., Bougon N., Calvet C., Charmet J.-F., Chenu C., Gascuel-Odoux C., Damas O., Desrousseaux M., Monod K., Poinçot F., Raous S., Rigou L., Sarrazin F., et Schwartz C. (2023). *Mieux intégrer les sols dans la séquence « Éviter-Réduire-Compenser. »*, in *Étude et Gestion des Sols*, 30, p. 347-363.

Si nous évoquons *Folsomia Candida*, il est peu probable qu'une image vienne en tête aux lecteurs et lectrices. Pourtant, il s'agit des collemboles, que nous pouvons retrouver parfois dans les plantes d'intérieur : ces petites bêtes blanches qui sautent ! Ce manque d'intérêt pour la biodiversité du sol se retrouve aussi dans la littérature scientifique et technique. Lorsqu'il est question d'empreinte biodiversité ou de conservation de la biodiversité, la biodiversité du sol est rarement, voire jamais incluse. Par exemple, la faune du sol n'est jamais mentionnée dans les dossiers Éviter-Réduire-Compenser [21].



[Fig. 3] Les collemboles (mésosfaune du sol c.-à-d. inférieur à 2 mm) jouent un rôle dans la dégradation de la matière organique dans les sols (©S. Felin, S. Joimel).

Pourtant, la biodiversité du sol représente 25 % à 60 % des espèces sur terre [22][23]. Par mètre carré, nous marchons sur des dizaines d'espèces de vers de terre, nématodes ou collemboles, sur des centaines d'espèces de bactéries, voire des milliers d'espèces de champignons. En abondance, cela représente plusieurs tonnes de vers de terre, bactéries ou champignons ou encore des kilos de collemboles ou nématodes par hectare de prairie. Dans un contexte d'extinction de la biodiversité, liée aux changements globaux, il apparaît absolument nécessaire de protéger cette biodiversité du sol, *a minima* pour sa valeur intrinsèque.

Précisons également que cette biodiversité du sol est responsable de nombreuses fonctions et services écosystémiques. Production de biomasse alimentaire, régulation de l'eau, du climat, dégradation des polluants organiques, autant de fonctions recherchées, notamment dans l'objectif de renaturation des sols. L'OFB (Office français de la biodiversité) a en effet réaffirmé, en 2022 [24], la place des sols vivants au cœur des nouveaux modes d'aménagement des territoires dans le cadre de la loi Climat et résilience.

Pour inviter la biodiversité des sols en ville, encore faut-il la connaître. Alors que seulement 1 % des études sur les sols se penchent sur les sols urbains [25], c'est tout un pan de la connaissance qui reste à construire. Certains bio-indicateurs prioritaires ont été validés par l'ADEME dans le cadre du programme du même nom [26]. Les microorganismes, les nématodes, les collemboles ou encore les vers de terre sont ainsi mis en avant pour leur capacité à renseigner l'état des sols, leur fonctionnement biologique et donc la renaturation de ces derniers. Au sein de ces groupes taxonomiques, plusieurs métriques, souvent complémentaires, sont nécessaires pour rendre compte des communautés : abondance relative de chaque groupe ou espèce, nombre d'espèces (richesse spécifique), biomasse ou encore proportion de traits fonctionnels.

« Seulement 1 % des études sur les sols se penchent sur les sols urbains. »

- [22] Anthony M. A., Bender S.F., et Van Der Heijden M. G. A. *Enumerating soil biodiversity*, in *Proceedings Of The National Academy Of Sciences*, 120(33), 2023. <https://doi.org/10.1073/pnas.2304663120>
- [23] Decaëns T., Jiménez J., Gioia C., Measey G., et Lavelle P. (2006). *The values of soil animals for conservation biology*, in *European Journal Of Soil Biology*, 42, S23-S38. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2006.07.001>
- [24] CDC Biodiversité & Office Français de la Biodiversité (2022), *Renaturer les sols, des solutions pour ménager les territoires*. Castaing J., Monod K., Noreve V. Dossier de la MEB N°42, Mission Economie de la Biodiversité, Paris, France.
- [25] Guillard C., Maron P., Damas O., et Ranjard, L. *Biodiversity of urban soils for sustainable cities*, in *Environmental Chemistry Letters*, 16(4), 2018, p. 1267-1282. <https://doi.org/10.1007/s10311-018-0751-6>
- [26] Le programme « Bioindicateurs de qualité des sols » a été lancé par l'ADEME en 2004.



L'exemple des collemboles, organisme millimétrique de la faune du sol, servant de bioindicateur par ses réponses aux pratiques et son rôle dans le fonctionnement des sols (e.g. recyclage des matières organiques), permet de questionner plus finement la place de la biodiversité des sols au sein des villes.

## Les sols urbains : des sols vivants, mais hétérogènes

La ville est un milieu très hétérogène surtout constitué d'espaces imperméabilisés, plus ou moins entrecoupés par des espaces de nature. Cet agencement peut différer entre les villes en fonction de l'histoire ou du contexte socio-culturel. En écologie, l'hétérogénéité d'un milieu est souvent une opportunité d'accueillir une forte biodiversité. S'il est vrai que 60 % de la population humaine se concentre dans les villes, rien n'est moins sûr pour le reste de la biodiversité. Une des rares théories en écologie urbaine parle plutôt d'homogénéisation biotique dans les villes. Le milieu urbain, du fait des fortes contraintes, va sélectionner les mêmes espèces les plus adaptées à ce milieu anthropisé (e.g. pigeon, rat).

La ville est en effet un milieu contraignant pour la biodiversité, qu'elle soit souterraine ou aérienne [27]. Disposant d'un microclimat spécifique (plus de chaleur, plus de pluie, moins de vent), de pollutions potentielles dans les différents compartiments (eau, sol, air), elle est aussi caractérisée par une forte fragmentation induisant une discontinuité dans les sols urbains.

La littérature scientifique sur la biodiversité des sols en milieu urbain se concentre sur les sols végétalisés. Est-ce à dire qu'il n'y a pas de collemboles sous les dalles de parking ? Difficile d'y répondre. Les rares études concernant les sols scellés se concentrent surtout sur les microorganismes [28] : il semblerait qu'on y trouve bien de la vie, à des niveaux toutefois faibles. Cette biodiversité reste complexe à étudier, pour des raisons pratiques : difficile de faire un carottage dans le goudron !

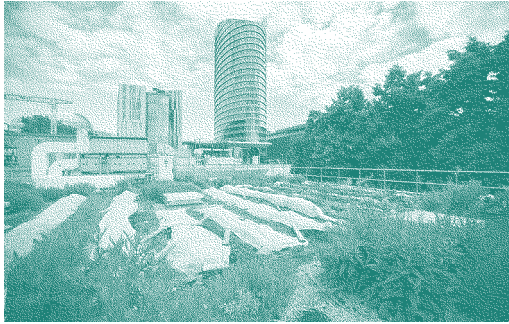
Quant à la biodiversité des sols végétalisés, on y constate une grande variabilité à différentes échelles. Si une forte biodiversité des sols peut parfois être présente, notamment pour les collemboles, ce n'est pas toujours vérifié [29] [30].

[27] Ramade F. *Dictionnaire encyclopédique de l'écologie et des sciences de l'environnement*, 2e édition, Paris, Dunod, 2002.

[28] Cambou, A. *Évaluation du stock et de la stabilité du carbone organique dans les sols urbains [Thèse de doctorat]*, Rennes, Agrocampus Ouest, 2018

[29] Guillard C., Maron P., Damas O., et Ranjard L. *Biodiversity of urban soils for sustainable cities*, in *Environmental Chemistry Letters*, 16(4), 2018b, p. 1267-1282. <https://doi.org/10.1007/s10311-018-0751-6>

[30] Joimel S., Schwartz C., Hedde M., Kiyota S., Krogh P.H., Nahmani J., Peres G., Vergnes A., et Cortet J. *Urban and industrial land uses have a higher soil biological quality than expected from physicochemical quality*, in *The Science Of The Total Environment*, 584-585, 2017, p. 614-621. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.01.086>



[Fig. 4, a]



[Fig. 4, b]



[Fig. 4, c]

[Fig. 4, a, b, c] Illustrations des différentes formes d'espaces de nature en ville

[Fig. 4, a] Le toit potager de Suzanne Lenglen à Paris, mis en place et exploité par Culture en Ville, 2023. (© Gilles Arbwick)

[Fig. 4, b] Le jardin familial de Montolivet à Marseille—sol recréé à base de terre végétale, 2012. (© Sophie Joimel)

[Fig. 4, c] Toit potager expérimental d'AgroParisTech, Paris, 2017 (© Baptiste Gard)

Cette variabilité se manifeste notamment entre les différents habitats urbains. Les collemboles, par exemple, sont plus abondants dans les jardins familiaux que dans les parcs ou les micro-fermes urbaines [31]. Dans les parcs, où s'illustrent la majorité des études, une forte variabilité entre les sites est observable, y compris au sein d'une même ville (de 3640 collemboles par m<sup>2</sup> dans un des parcs jusqu'à 20710 dans un autre). Pour autant, les espaces avec la plus forte abondance ne présentent pas forcément le plus d'espèces, illustrant ainsi l'importance du choix des indicateurs dont les variations peuvent sembler contradictoires.

De même, il existe des différences entre groupes taxonomiques pour un même espace de nature. Les collemboles et les microorganismes seront

[31] Joimel S., Jules A., et Gonod L. *V.Collembola dispersion, selection, and biological interactions in urban ecosystems: a review*, in *Environmental Chemistry Letters*, 20(3), 2022, p. 2123-2133. <https://doi.org/10.1007/s10311-022-01406-z>



souvent favorisés sur les toitures végétalisées tandis que la macro-faune, et notamment les vers de terre, seront très peu nombreux dans ces espaces. Enfin, la plupart des études se concentrent sur un instant t, souvent une seule saison. Il faut pourtant du temps pour que la dynamique de colonisation se déploie dans ces espaces. Au sein d'un sol construit, ce temps nécessaire a été évalué à 4 ans pour les collemboles [32], mais diffère pour les autres groupes taxonomiques [33]. Une variabilité intra et inter annuelle peut donc s'observer au sein des espaces urbains.

« Les sols urbains ne sont pas morts. »

De multiples facteurs influencent donc la biodiversité des sols en ville, soit à l'échelle de l'habitat (*e.g.* qualité du sol, gestion du site, taille, microclimat), soit à l'échelle du paysage. La dispersion des organismes entre les espaces de nature dépend autant de leur propre capacité de dispersion que de la connectivité des espaces au sein d'un espace tridimensionnel (connectivité des sols).

La biodiversité des sols s'affirme donc comme un enjeu majeur de la renaturation des villes. Si les sols urbains ne sont pas des sols morts, leur qualité biologique est très variable. Il demeure difficile de dresser des conclusions sur l'ensemble de la biodiversité du sol en observant uniquement un seul groupe taxonomique – par exemple les vers de terre – ou en se concentrant sur une seule métrique de la biodiversité – indices d'abondance ou de diversité. De nombreuses lacunes restent à combler pour acquérir des références dans différents types d'habitats ou climats, dans différentes temporalités et pour différents groupes taxonomiques de la biodiversité des sols.

Reste une certitude : sans sol, pas de biodiversité !

[32] Santorufo L., Joimel S., Auclerc A., Deremiens J., Grisard G., Hedde M., Nahmani J., Pemin C., et Cortet J. *Early colonization of constructed technosol by microarthropods*, in *Ecological Engineering*, 162, 2021, 106174. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2021.106174>

[33] Hedde M., Nahmani J., Séré G., Auclerc A., et Cortet J. *Early colonization of constructed Technosols by macro-invertebrates*, in *Journal Of Soils And Sediments*, 19(8), 2018, p. 3193-3203. <https://doi.org/10.1007/s11368-018-2142-9>

# **Après le descellement, comment rendre les sols urbains multifonctionnels ?**

**Des acquis scientifiques indispensables  
à l'optimisation des pratiques**

**Laure Vidal-Beudet**

Professeure en agronomie  
urbaine, Institut Agro  
Rennes-Angers

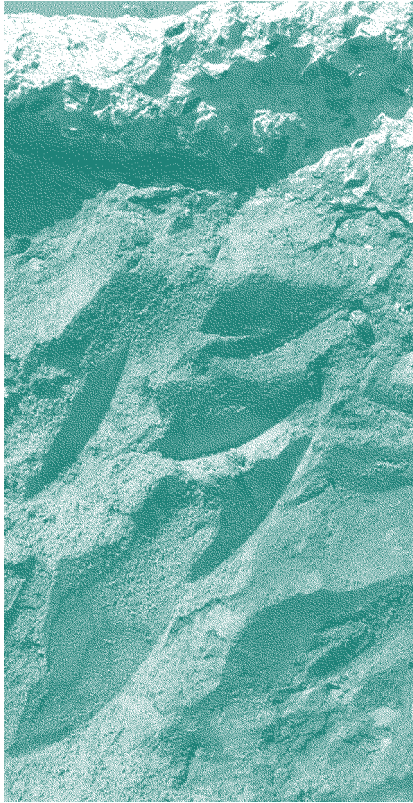


## L'imperméabilisation, cause majeure de la dégradation des sols

L'artificialisation est une des huit menaces identifiées par l'ONU qui altère les sols souvent de manière irréversible en modifiant les usages des surfaces agricoles, forestières et naturelles vers des usages très anthropisés : mines, industries, territoires urbanisés. En contexte urbain, les surfaces artificialisées sont pour quasiment 70 % des surfaces imperméabilisées (infrastructures routières et bâtiments). Dans les pays industrialisés, l'imperméabilisation est devenue une cause majeure de la dégradation des sols. En effet, la couverture du sol par un revêtement imperméable (e.g. asphalte, béton) ou la compaction du sol provoquent une déconnexion du sol avec les autres compartiments de l'écosystème (biosphère, atmosphère, hydrosphère, anthroposphère). Cette imperméabilisation va avoir des conséquences sur les cycles naturels et notamment le cycle de l'eau en réduisant drastiquement l'infiltration de l'eau dans le sol, en limitant l'évaporation du sol et l'évapotranspiration du végétal et en favorisant un ruissellement de surface à l'origine des inondations urbaines.

« En contexte urbain, les surfaces artificialisées sont pour quasiment 70 % des surfaces imperméabilisées. »

Donc la question se pose de trouver des solutions pour inverser les flux de mutation des surfaces non artificialisées vers les surfaces artificialisées et provoquer une réversibilité d'usage. Le cadre législatif vient renforcer le besoin de mieux gérer la ressource sol et des lois récentes encouragent les actions visant la préservation des sols naturels, agricoles et forestiers pour atteindre zéro artificialisation nette en 2050 (Plan biodiversité 2018 et loi Climat et Résilience 2021). La volonté de densifier la ville et de reconstruire la ville sur elle-même s'accompagne d'une végétalisation dont le succès dépend de la création de sols fertiles. Ainsi, la loi Climat et Résilience appuie les actions de désimperméabilisation des sols et la renaturation des villes, puisque les sols qui retrouvent un nouvel usage après végétalisation pourraient sortir de la catégorie des sols artificialisés.



[Fig. 5] Coupe d'un sol scellé



[Fig. 6, a]



[Fig. 6, b]

[Fig. 6, a, b] Images de travaux de descellement et de décompaction (© Wagon Lanscaping)



Les actions de désimperméabilisation des sols mises en place depuis une vingtaine d'années par les agences de l'eau, les SDAGE, les collectivités tendent à rendre la ville perméable. Elles visent les services d'infiltration des eaux pluviales, de réduction de la pollution des réseaux d'assainissement et de régulation des inondations. Or, de nouveaux enjeux liés à l'adaptation de la ville au changement climatique sont apparus et dépendent du descellement des sols : (1) végétaliser la ville, (2) mettre en place des revêtements perméables, (3) maintenir la biodiversité et (4) rendre les sols multifonctionnels. Cependant, peu d'études scientifiques ont observé les effets du descellement sur la qualité des sols puisque ces notions sont récentes et complexes. Ainsi, il devient urgent de répondre à la question : comment le descellement des sols peut rendre la ville résiliente et contribuer à l'amélioration du confort thermique pour les habitants ?

## Une analyse des pratiques de désimperméabilisation

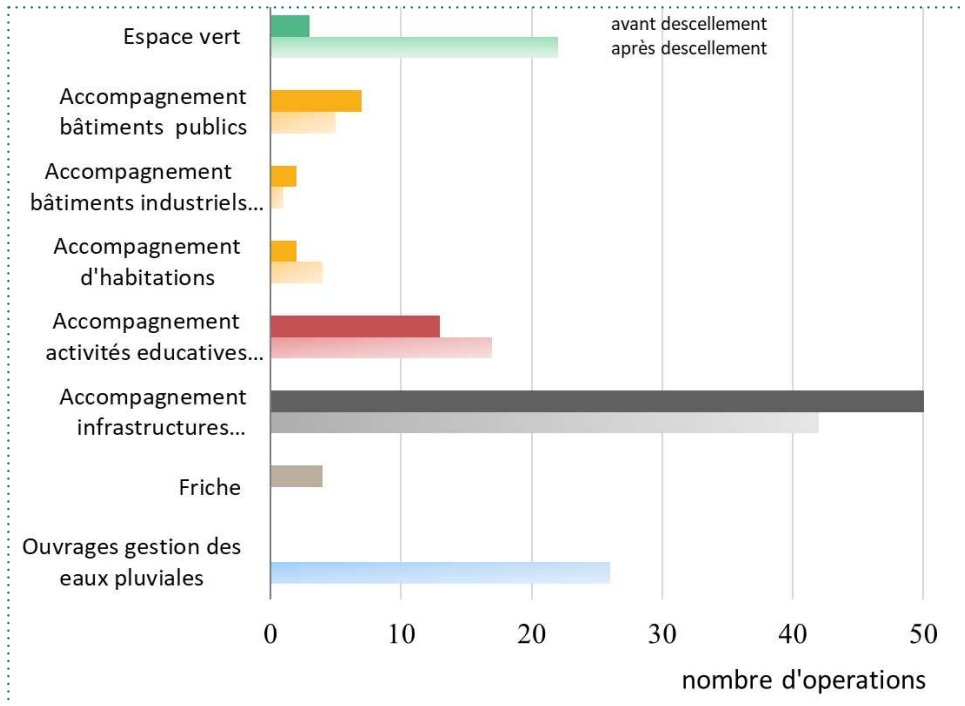
Le projet de recherche DESSERT (DESimperméabilisation des Sols, Services Écosystémiques et Résilience des Territoires, ADEME Modevalurba 2020-2024) favorise une synergie innovante sur la question du descellement des sols en ville en regroupant des unités de recherche, des bureaux d'études, des entreprises du BTP (D&L Enromat, Vinci), l'association Plante et Cité et deux métropoles (Angers Loire Métropole et Métropole du Grand Nancy). Ce projet de recherche est soutenu par ANRT, l'OFB et le CIBI et vise à améliorer les connaissances sur les pratiques actuelles de désimperméabilisation urbaine et sur le fonctionnement des sols descellés. Les résultats des recherches bibliographiques, sur la connaissance des sols descellés en comparaison de sols ouverts, ont montré que les propriétés physico-chimiques des sols scellés sont modifiées sur toute l'épaisseur du profil avec une valeur forte de la masse volumique apparente, une teneur en éléments grossiers élevée et un pH souvent très basique du fait d'une teneur en carbonates élevée. En corollaire, ces sols montrent une faible teneur en matières organiques et azote et une faible activité des communautés biologiques du sol. La teneur en contaminants chimiques (éléments traces en métal et métalloïdes, hydrocarbures aromatiques polycycliques) est un indicateur indispensable à caractériser.

« Les propriétés physico-chimiques des sols scellés sont modifiées sur toute l'épaisseur du profil de sol. »

Un inventaire sur les pratiques actuelles de descellement en France métropolitaine a fait l'objet d'une enquête, menée auprès des adhérents de Plante et Cité et des partenaires du projet, et a permis de collecter 57 retours d'expériences. Les opérations sont en général récentes (depuis 2009) et sont implantées dans des villes de toutes tailles

(11 opérations ville > 400 000 habitants, 33 opérations villes de 20 000 à 400 000 habitants, 13 opérations villes < 20 000 habitants). La médiane des surfaces désimperméabilisées est de 1 150 m<sup>2</sup> et le descellement permet souvent sur un espace donné de faire apparaître de nouveaux usages tels que des ouvrages de gestion des eaux pluviales ou une zone végétalisée (Figure 7, Vieillard et al., 2024[34]). En effet, les objectifs de descellement sont principalement (1) la gestion des eaux pluviales, (2) la réduction de l'indice de chaleur urbain, et (3) la végétalisation.

[34] Vieillard C., Vidal-Beaudet L., Dagois R., Lothode M., Vadepiéd F., Gontier M., Schwartz C., et Ouvrard S. *Impacts of soil de-sealing practices on urban land-uses, soil functions and ecosystem services in French cities in Geoderma Regional*, e00854, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2024.e00854>



[Fig. 7] Les types d'usage de 57 projets de désimperméabilisation sur le territoire métropolitain français avant et après descellement (Vieillard et al., 2024).

L'efficacité du descellement des sols en termes de renaturation des villes a été étudiée à partir d'essais en site pilote afin de développer un outil multi-attributs d'aide à la conception de projets de désimperméabilisation des sols urbains [35]. Des expérimentations ont été menées sur le terrain de trois sites expérimentaux dans trois contextes pédoclimatiques contrastés (parking à Angers, allée de parc public à Nancy, plateforme de stockage à Cannes). Des parcelles d'environ 150 m<sup>2</sup> ont permis de tester quatre modalités de descellement après retrait de la couche imperméable de surface avec une intensité d'intervention croissante sur 40 cm d'épaisseur : (1) assise de granulats non décompactée, (2) assise de granulats décompactée, (3) assise de granulats décompactée et mélangée avec 30 % en volume de compost de déchet vert, (4) assise de granulats remplacée par un mélange de terre végétale et

[35] Vieillard C., Vidal-Beaudet L., Dagois R., et Ouvrard S. *Desecaling soils to promote ecosystem services: an in situ experimental device, in II International Symposium on Greener Cities: Improving Ecosystem Services in a Climate-Changing World (GreenCities2022)*. IHC2022 31st International Horticultural Congress, 14-22 August 2022, Acta Horticulturae, à paraître.



30 % en volume de compost de déchets verts. Les parcelles ont été semées avec un couvert végétal multi-spécifique (75 % *poaceae* et 25 % autres espèces) adapté aux trois contextes pédoclimatiques. Le suivi de la colonisation végétale, pendant 18 mois, a montré les fonctionnalités satisfaisantes de la modalité (3) très proche de la modalité (4) considérée comme une modalité de référence. Donc le génie pédologique a permis la construction d'un sol rapidement multifonctionnel et avec une activité biologique stimulée [36].

Le programme DESSERT a démontré la faisabilité de la réversibilité des sols scellés vers un état multi-fonctionnel en fonction des usages envisagés. Les résultats du programme permettent de formuler des résultats génériques qui seront à portée des professionnels du végétal en ville et des aménageurs urbains dans un guide d'aide à la conception dont la parution est annoncée pour janvier 2025. Ce guide permettra de répondre aux interrogations récurrentes dans les opérations de descelllement : quels sont les risques en termes de pollutions ? Quelles surfaces desceller pour obtenir des résultats en termes de baisse des îlots de chaleur ? Quels gains en termes de biodiversité ? Quelle amélioration du cadre de vie ? Quel coût et pour quelle économie circulaire ?

[36] Vieillard, C. *Désimperméabilisation des sols urbains : état des lieux des pratiques et mises en œuvre de génie pédologique pour restaurer des services écosystémiques* [Thèse de doctorat]. Institut Agro Rennes-Angers, 2024.

Cet article est issu des travaux effectués dans le cadre du projet DESSERT, avec la participation de Laure Beaudet-Vidal (EPHor, Institut Agro Rennes-Angers), Christophe Schwartz (LSE – UL/INRAE), Stéphanie Ouvrard (LSE – UL/INRAE), Geoffroy Séré (LSE – UL/INRAE), Claire Vieillard (EPHor, Institut Agro Rennes-Angers), Maïwenn Lothodé (SCE), Mathieu Gontier (Wagon Landscaping), François Vadepiéd (Wagon Landscaping), Jean-Noël Consoles (IUAR – AMU), Robin Dagois (Plante & Cité), Arnaud Herbreteau (LSE – UL/INRAE), Véronique Beaujouan (BAGAP, Institut Agro Rennes-Angers), Adeline Bulot (BAGAP, Institut Agro Rennes-Angers).

# Construction de sols: le génie pédologique au service de la renaturation des sols urbains et industriels

**Geoffroy Séré**

Professeur en pédologie  
urbaine, Laboratoire Sols  
et Environnement, Université  
de Lorraine - INRAE



## Renverser le paradigme de l'artificialisation des sols

Il est bien connu et largement documenté que l'artificialisation peut conduire à une dégradation significative de la santé des sols. Néanmoins, l'homme peut également générer les conditions d'une restauration des fonctions essentielles des sols et même une augmentation du niveau de services écosystémiques rendus. Pour ce qui concerne les sols, il ne s'agit pas ici d'avancer que nous sommes actuellement capables de recréer artificiellement des écosystèmes analogues dans leur structure et leur complexité aux sols naturels. Cependant, des solutions existent qui permettent de contrebalancer, à une échelle encore très locale, les effets délétères de l'anthropisation des territoires sur la couverture pédologique.

« L'homme peut générer les conditions d'une restauration des fonctions essentielles des sols et même une augmentation du niveau de services écosystémiques rendus. »

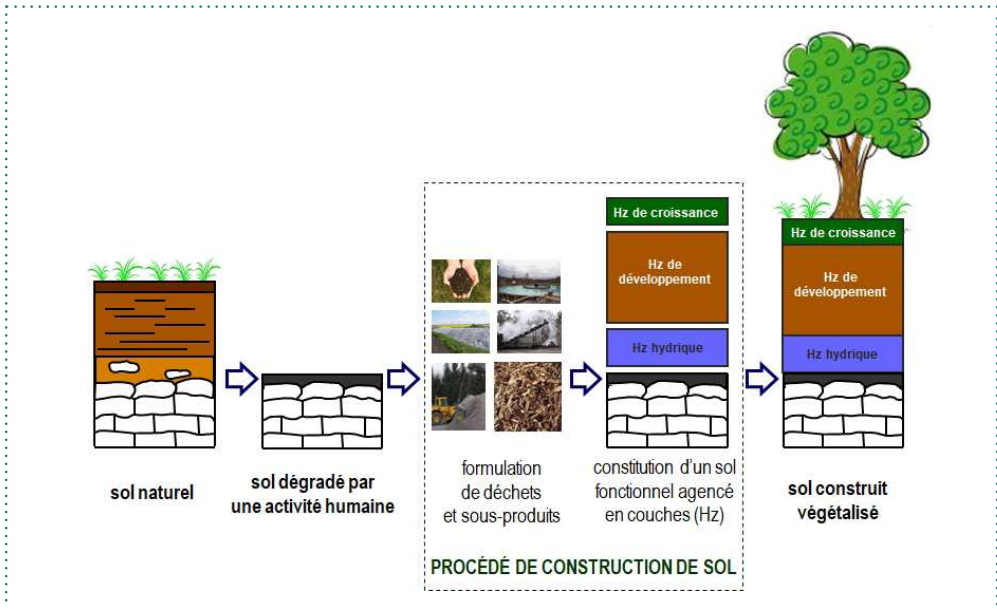
Ces approches, qui peuvent être regroupées sous le terme de génie pédologique, nécessitent des interventions humaines poussées aussi bien en termes d'expertise que d'énergie : depuis les phases amont d'études et de conception d'une solution adaptée à chaque situation, jusqu'au transport, au mélange et à la mise en place de volumes conséquents de matériaux pour construire des sols. Néanmoins, n'y aurait-il pas une certaine forme de cohérence à intensifier la gestion de sols en milieux urbains, mais aussi industriels ou miniers, eux qui ont déjà subi de fortes pressions anthropiques ?

## Le génie pédologique pour répondre aux enjeux des milieux urbains

Puisqu'il offre un cadre conceptuel où il est possible de construire des sols « à façon », en se rapprochant le plus possible d'un sol idéal attendu, le génie pédologique génère certes de nombreuses questions scientifiques passionnantes, mais surtout une alternative bienvenue voire nécessaire pour répondre à trois grands enjeux des espaces artificialisés (). Le premier est la

préservation de ce que l'on appelle communément la terre végétale, c'est-à-dire l'horizon de surface organo-minéral des sols naturels où se concentre l'essentiel de la fertilité, de l'activité biologique et du stock de carbone. C'est bel et bien une ressource non renouvelable, car fruit d'une évolution plurimillénaire, exposée pourtant à la destruction en quelques coups du godet d'une pelle mécanique. Le second est la possibilité d'offrir des substrats fertiles pour le développement d'infrastructures vertes au sein d'espaces urbains ou industriels - qui en sont largement dépourvus - en épargnant la ressource susmentionnée. Les multiples bénéfices du végétal sont de mieux en mieux reconnus, mais l'on ignore encore trop que son développement est inféodé à la capacité de son sol support à permettre son implantation et sa croissance. Le troisième est intimement lié au métabolisme de nos espaces anthropisés. Ils produisent, dans leurs activités et leur renouvellement, un flux continu et croissant de déchets et sous-produits qui peuvent être minéraux - déblais géologiques issus du creusement de nouveaux tunnels de métro, matériaux de déconstruction de bâtiments, sédiments de dragage... - ou organiques - boues issues de l'épuration des eaux usées, déchets verts issus de l'entretien des espaces verts précédemment cités, sous-produits issus du recyclage du papier... -. La construction de sol constitue alors une filière potentielle de valorisation et de recyclage de déchets et sous-produits à moindre coût économique, mais aussi environnemental.

« C'est bel et bien une ressource non renouvelable, car fruit d'une évolution plurimillénaire, exposée pourtant à la destruction en quelques coups du godet d'une pelle mécanique. »



[Fig. 8] Démarche de construction de sol [37].



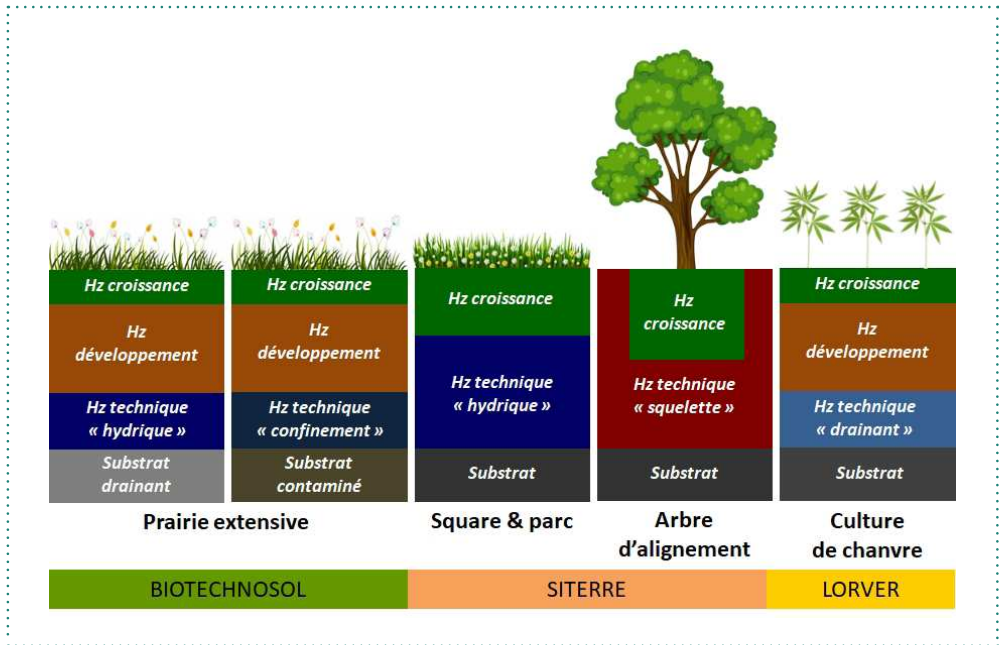
## Un cadre méthodologique à respecter et une connaissance à améliorer

« Chaque projet de construction de sol est unique et doit intégrer au mieux les facteurs et contraintes locaux. »

Certains préalables doivent impérativement être respectés pour garantir la viabilité et la pérennité de ce procédé de renaturation des sols. Les acteurs du génie pédologique doivent s'appuyer sur un socle de connaissances, celui qui traite du fonctionnement, de l'évolution, de la gestion et de la mise en valeur des sols. L'aspect essentiel à considérer est selon moi le suivant : chaque projet de construction de sol est unique et doit intégrer au mieux les facteurs et contraintes locaux. Ceci doit se traduire par une démarche en quatre temps qui a été largement décrite dans notre ouvrage [38]. En premier lieu, le modèle de sol construit à créer doit être adapté à l'usage futur du site, notamment en termes de niveaux de fertilité, de contamination résiduelle ou encore de capacité d'infiltration en eau [Figure 9]. Ensuite, le choix des matériaux parents est crucial et doit respecter un certain nombre de critères : proximité du gisement (il s'avère que l'empreinte environnementale du transport de matériaux est élevée et doit être réduite autant que faire se peut), innocuité sanitaire et environnementale (outre les risques d'exposition à des polluants par inhalation voire ingestion, l'exposition à des transferts vers les nappes souterraines doit être considérée), intérêt pour la construction de sol (le choix des matériaux doit contribuer à atteindre les performances attendues tel que décrit dans la première étape). La troisième étape est l'établissement de la recette - par analogie avec une recette de cuisine ! - c'est-à-dire la manière d'associer, de mélanger et d'organiser des matériaux d'origines diverses pour obtenir un sol qui se rapproche le plus possible des propriétés idéales. Il est à noter que ces aspects restent encore largement empiriques pour la plupart des acteurs du domaine, essentiellement par manque de connaissances génériques, même si de nombreux essais sont conduits actuellement.

[37] Séré G. *Fonctionnement et évolution pédogénétique de Technosols issus d'un procédé de construction de sol* [Mémoire de Thèse de doctorat en Sciences Agronomiques]. Institut national polytechnique de Lorraine, 2007.

[38] Damas O., et Coulon A. *Créer des sols fertiles – du déchet à la végétalisation urbaine*, Paris, Éditions du Moniteur, 2016.



[Fig. 9] Exemple de profils de sols construits idéaux pour une variété d'usages et de situations.

Un réel engouement est à noter autour des pratiques de construction de sol, en particulier en France qui fait office de pionnière en la matière. Cependant, il est important de noter que le retour d'expériences reste extrêmement limité. Plusieurs programmes de recherche (e.g. Biotechnosol, Siterre, Lorver, Agrege, Biotubes) et travaux de doctorat – tous fréquemment soutenus par l'Ademe – ont permis d'améliorer la connaissance des différentes étapes de la construction de sol depuis une quinzaine d'années. Un nombre grandissant d'essais pilotes et même de chantiers sont réalisés par une diversité d'acteurs partout en France. Cependant, le suivi de ces dispositifs est partiel et l'information reste insuffisamment regroupée. De plus, compte-tenu de la cinétique d'évolution de ces sols construits qui, bien que plus rapide que les sols naturels, se compte néanmoins en années, peu de données sur leur pérennité et le maintien de leurs performances sont disponibles. C'est d'ailleurs l'un des objectifs du projet Ademe Siterre II, piloté par Plante et Cité, que de combler ces manques. Ainsi, l'ensemble des acteurs – législateur, maître d'ouvrage, bureaux d'études, fabricant de substrats construits, recherche – doit continuer à œuvrer de concert pour mieux encadrer les pratiques de construction de sol et contribuer à mieux connaître, dans la durée, leurs fonctionnalités et leur capacité à rendre des services écosystémiques.













# ÉCHELLES SPATIALES



# Quelles échelles spatiales, quels périmètres pour étudier les sols ?

Retour sur une discussion croisée  
entre géographes et pédologues

*Moderation :*

**Youssef Diab**

Professeur en génie urbain  
à l'Université Gustave Eiffel,  
directeur des Chaires et  
de la Prospective à l'EIVP,  
codirecteur de la Chaire  
Transition foncière

*Intervenants :*

**Adrien Baysse-Lainé**

Chargé de recherche  
en géographie, CNRS,  
Laboratoire Pacte, Grenoble

**Mathieu Fernandez**

Chercheur associé en  
urbanisme à l'EHESS

**Patrick Le Gouée**

Maître de conférences,  
géographe et pédologue  
à l'université de Caen-  
Normandie



Pédologie, agronomie, urbanisme, paysage... De multiples disciplines s'intéressent aux sols, chacune développant sa propre définition et sa propre échelle spatiale d'étude des sols. Il s'agissait pour cette table-ronde de questionner la place des échelles et du changement d'échelle dans les recherches menées sur les sols. À quelle échelle être attentif aux sols, à quelle échelle les connaître, les représenter, et les gouverner ? Quelles données et informations permettent de mieux connaître et représenter les sols, à différentes échelles ?

### Étudier les sols : du sondage pédologique au territoire

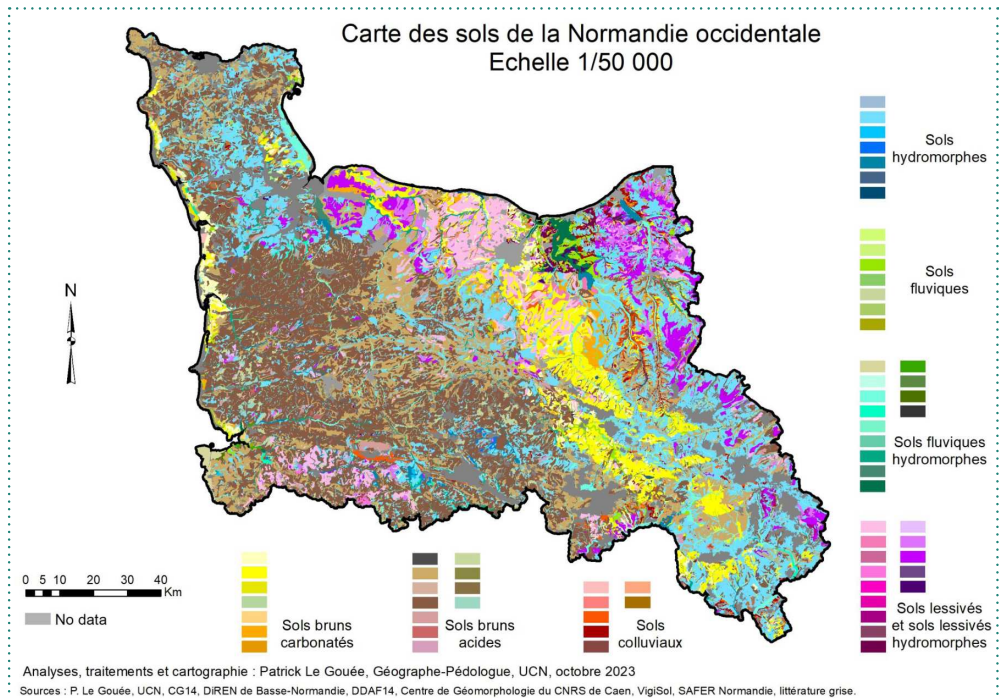
Les échelles d'attention au sol diffèrent selon les disciplines. En études urbaines, les travaux de Mathieu Fernandez sur les sols de la ville de Paris témoignent d'un croisement nécessaire des échelles et des disciplines lorsqu'il s'agit d'étudier les sols urbains. Ceux-ci peuvent être définis comme le résultat d'une interaction entre le sol naturel et les forces anthropiques qui dominent la ville. Étudier les caractéristiques d'un sol urbain, par exemple sa contamination, nécessite de passer par de l'histoire industrielle pour évaluer les contaminations probables, mais aussi de réaliser des analyses chimiques. La particularité des sols urbains, souvent constitués de remblais, suppose aussi de retracer l'histoire de ces remblais, leur origine, et donc de s'intéresser aux mouvements de terres entre zones urbaines, péri-urbaines et rurales. Dans une perspective de métabolisme urbain, les études urbaines peuvent conduire à évaluer les quantités de sols produits et déplacés par un projet de ZAC, et d'identifier les zones de dépôt. Les travaux de Mathieu Fernandez [39] soulignent qu'un million de tonnes de matériaux sont excavés en moyenne pour une ZAC, ensuite transportés et déposés à une vingtaine de kilomètres au sud de Paris. Au total, 18 millions de tonnes de terres excavées sont acheminées par an dans cette direction.

[39] Fernandez M., Blanquart C., et Verdeil É. (2018). *La terre et le béton : le projet d'urbanisme considéré sous l'angle du métabolisme territorial*. In VertigO, Volume 18 Numéro 3, 2018. <https://doi.org/10.4000/vertigo.23302>

« La particularité des sols urbains, souvent constitués de remblais, suppose aussi de retracer l'histoire de ces remblais, et donc de s'intéresser aux mouvements de terres entre zones urbaines, péri-urbaines et rurales. »

Si les perspectives de recherche sur les sols en urbanisme imposent de croiser les échelles et d'investiguer les mouvements de terre, les études en pédologie supposent aussi de naviguer entre différentes échelles spatiales. Patrick Le Gouée, pédologue à l'université de Caen-Normandie, souligne que le choix de l'échelle d'une étude résulte d'un arbitrage entre la question initiale, les objectifs, les moyens financiers, ou encore le caractère opérationnel de la donnée produite. Certaines études de sols, liées à des parcelles bien définies, nécessitent une approche micro-locale. A contrario, d'autres projets relèvent de la cartographie à l'échelle régionale : l'élaboration du référentiel régional pédologique [40] de Normandie par exemple, couvrant un territoire de 30 000 km<sup>2</sup>, suppose une précision limitée et une échelle d'1/250 000<sup>e</sup>. À un niveau intermédiaire, les travaux de cartographie des sols réalisés par Patrick Le Gouée pour la Métropole Rouen Normandie se sont appuyés sur une échelle d'1/50 000<sup>e</sup> pour les sols agricoles et naturels, et une échelle d'1/10 000<sup>e</sup> pour les sols urbanisés.

[40] Le Gouée, P. (2016). *Référentiel Régional Pédologique de Basse-Normandie*. France.



[Fig. 10] Référentiel régional pédologique de Basse-Normandie (Patrick Le Gouée, 2016).



## Sols urbains, sols agricoles : analyses spatiales croisées

Le travail de caractérisation et de cartographie des sols peut prendre des formes différentes en milieu agricole ou naturel et en milieu urbain. Sur un sol naturel, avant de décrire un profil, il s'agit avant tout de capitaliser l'information disponible pour comprendre le contexte pédoclimatique du territoire : le relief, les expositions, la pente, le substrat géologique, le climat, l'historique d'occupation des sols... Ce travail de capitalisation permet ensuite de faciliter l'interpolation des données ponctuelles, pour construire des cartes de sols.

En milieu urbain, ce travail d'observation est plus complexe, puisqu'une grande partie des sols sont couverts. La variabilité naturelle des sols d'origine peut s'accompagner d'une diversité des sols observés due à des différences d'usages, différentes modalités d'urbanisation, ou des temporalités variables. La connaissance des types de sol en périphérie de la ville peut faciliter la prédiction de la nature des sols urbains. Cependant, la présence de sols excavés rend plus complexe ce travail d'observation et d'interpolation. Il apparaît donc primordial de collecter dès aujourd'hui des données sur les sols périurbains destinés à l'artificialisation, pour mieux comprendre les futurs sols urbains : cela implique cependant une bonne gestion temporelle des informations.

## Mettre à plat les sols : des cartographies politiques

La diversité des échelles d'appréhension du sol questionne ses modes de représentation spatiale. Le travail de cartographie du sol, qui repose sur des données ponctuelles, suppose d'interpoler une information observée en un point à toute une surface. Une démarche hypothético-déductive, couplée à l'expérience du travail de pédologue et à de nombreux points de mesure, permet d'améliorer la qualité et la capacité prédictive des cartes produites. Toutefois, une carte n'est jamais juste : il s'agit d'une représentation rapprochée d'une réalité difficile à saisir. Le sol est effectivement caractérisé par son anisotropie, c'est-à-dire une forte variabilité spatiale de ses propriétés. A mesure que l'on s'éloigne d'un point d'observation, la précision des propriétés physico-chimiques observées s'estompe.

Les cartes n'apparaissent pas comme de simples outils d'information sur les sols, mais s'affirment aussi comme de véritables outils d'aide à la décision, notamment pour les collectivités. En matière d'aménagement, les cartes de potentiels agronomiques produites par les chambres d'agriculture pourraient être mobilisées par les pouvoirs publics locaux pour déterminer les zones à urbaniser en priorité et celles à préserver. Cependant, il convient d'alerter sur les risques de

mésusage des cartes. La simplification lexicale de la légende de la carte, les modes de discrétisation cartographique peuvent inciter les collectivités à utiliser ces cartes pour justifier une urbanisation parfois peu légitime. L'usage des cartes de sols comme outils d'aide à la décision doit donc s'accompagner d'un guide de lecture, ou d'informations complémentaires sur le vocabulaire pédologique et le contexte de fabrication de la carte.

« Une carte n'est jamais juste: il s'agit d'une représentation rapprochée d'une réalité difficile à saisir. Le sol est effectivement caractérisé par son anisotropie, c'est-à-dire une forte variabilité spatiale de ses propriétés. »

## Gouverner les sols : quel découpage territorial ?

La diversité des échelles d'étude de sols suppose de s'intéresser à la construction de la donnée sur les sols, la diffusion de cette information par la représentation spatiale, mais aussi aux modes de gouvernance de la qualité des sols. Il convient de s'interroger sur la pertinence de conserver le découpage administratif existant ou bien de concevoir un nouveau découpage territorial *ex nihilo*, qui pourrait être basé sur des critères biophysiques, ou sur un découpage des bassins hydrographiques préexistants.

Dans le cadre du projet de directive européenne sur la surveillance et la résilience des sols, la création d'échelons spécifiques, des *soil districts* couplés à des *soil units*, est envisagée. Il s'agirait de dépasser des formes de gouvernance en silo propres aux différentes occupations du sol. La littérature en la matière [41] avance l'idée qu'une gouvernance locale ou régionale des sols serait pertinente. Certains travaux suggèrent qu'il serait préférable de calibrer les échelles de ces districts selon les fonctions des sols. D'autres s'interrogent sur la possibilité de s'appuyer sur le pédo-paysage, ou encore de reprendre le découpage des petites régions agricoles, ou des bassins versants.

Aux États-Unis, la question des territoires de gouvernance des sols est davantage développée, puisque des *soil conservation districts* (SCD) ont été mis en place à l'instigation de l'État fédéral après la crise du Dust Bowl dans les années 1930 qui a conduit à une forte érosion éolienne des sols. Si l'ambition initiale était de faire de ces districts des autorités régulatrices pouvant exercer une contrainte sur les propriétaires des sols, ce pouvoir leur a été retiré, et ils remplissent essentiellement aujourd'hui une mission d'animation visant la conservation des sols. Il existe encore des conflits d'intérêts dans la gestion de ces SCD, puisque les grands agriculteurs sont surreprésentés dans leurs conseils d'administration.

[41] Juerges N., et Hansjürgens B. *Soil governance in the transition towards a sustainable bioeconomy – A review*. In *Journal Of Cleaner Production*, 170, 2018, p. 1628-1639. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.10.143>



Il s'agit aussi de s'interroger sur la possibilité d'agrégation entre la dimension foncière et les caractéristiques physiques et agronomiques des sols. Si une attention croissante pour les caractéristiques des sols peut être constatée au sein des politiques publiques locales, les contraintes foncières restent présentes et la maille parcellaire incite à conserver une approche monofonctionnelle des sols dans l'aménagement. Par ailleurs, les valeurs foncières ne sont pas déterminées par des critères biophysiques, et sont très peu articulées aux critères de fonctionnalité des sols. Certains chercheurs [42] proposent ainsi d'intégrer les fonctions écologiques des sols, y compris leurs caractéristiques agronomiques, dans un « coefficient de constructibilité potentiel », qui déterminerait les prix du foncier.

« Les contraintes foncières restent présentes et la maille parcellaire incite à conserver une approche monofonctionnelle des sols dans l'aménagement. »

En somme, connaître les sols pour mieux les représenter et mieux les gouverner, apparaît ainsi comme une nécessité à toutes les échelles, de la parcelle au grand territoire, du sol agricole au sol urbain.

[42] Boutet D., et Serrano J. *Les sols périurbains, diversification des activités et des valeurs. Quelques éléments de comparaison et d'analyse*, in *Économie Rurale*, 338, 05-23, 2013. <https://doi.org/10.4000/economierurale.4142>



**Les actions de restauration des sols passent par des pratiques, des savoir-faire techniques, mais aussi par des groupes d'acteurs. Quelles sont les représentations des sols produites par les acteurs de l'aménagement lors de ces projets de renaturation ? Comment des filières économiques et professionnelles de la restauration des sols se structurent-elles ? Quel est le coût de telles actions de restauration pour les acteurs ?**





# ACTEURS ET REPRÉSENTATIONS



# Gestion des sols pour la nature en ville : un renouvellement des représentations et des pratiques

**Adrien Baysse-Lainé**

Chargé de recherche  
en géographie, CNRS,  
Laboratoire Pacte, Grenoble

**Laure Cormier**

Maîtresse de conférences  
en géographie, UMR ESO,  
Université d'Angers



Malgré un contexte de retour de la pleine terre en ville, depuis les micro-implantations florales jusqu'aux parcs naturels urbains, le modèle horticole évolue lentement. Les pratiques des entreprises de paysage témoignent d'une conception de la plante et de son substrat comme un ensemble, le substrat apparaissant ainsi comme un corrélat de la palette végétale. Peu de projets partent des potentialités des sols en place pour y adapter les modalités de végétalisation de la ville.

### Une étude transversale des pratiques de circulation de terres à l'échelle d'un territoire

La littérature scientifique sur les sols urbains se concentre notamment sur des filières spécifiques : terres excavées, compost, technosols... Il existe encore peu d'approches transversales à l'échelle territoriale : cette enquête [43], réalisée dans le cadre du projet ANR ANBioT (2020-2024), se penche sur les circulations de terre et de substrat fertile qui participent du retour d'une agriculture et d'une nature en ville, à travers l'exemple du cas strasbourgeois. Il s'agissait de questionner la tension entre deux statuts, deux représentations, deux pôles idéaux-typiques des sols, dans les politiques d'agriculture et de nature urbaine : le sol (en fait la terre) comme matière mobile, mise en circulation dans le cadre des pratiques de végétalisation, et le sol comme milieu vivant dont on peut tirer des potentialités pour renaturer les villes.

L'enquête s'est construite autour d'un double objectif : reconstituer les grandes modalités de circulation de matières qui permettent le retour d'espaces de nature en ville ; et identifier les évolutions des pratiques, dans la perspective d'un changement paradigmatique lié au retour de la pleine terre en ville. Autour d'un corpus de onze études de cas situées dans la métropole strasbourgeoise, à la fois en agriculture urbaine, micro-forêts Miyawaki, espaces verts ou jardins partagés, il s'agissait de remonter les chaînes d'approvisionnement et d'identifier les modalités de circulation des substrats fertiles. En complément, ces études de cas ont été contextualisées dans des pratiques plus générales d'aménagement urbain, à travers des entretiens avec des associations de compostage, de planteurs de haies, des élus, des techniciens.

[43] Baysse-Lainé A., Cormier L., et Gaulier K. *Gestion des sols et des substrats pour la nature et l'agriculture urbaines à Strasbourg : vers un renouvellement des représentations et des pratiques des circulations de matière ?* in *Projets de Paysage*, 27, 2022. <https://doi.org/10.4000/paysage.31236>  
Rédigé par Zoé Raimbault, le présent texte est une synthèse de l'article.

Nom du projet	Type de projet	Surface	Principaux acteurs parties prenantes	Etat initial de la parcelle et des sols
Jardin de marthe	Maraîchage professionnel	4,9 ha	Exploitation familiale reprise en 2015	sols agricoles
Îlot de la Meinau		11 ha	Exploitation créée en 2014 sur d'anciennes terres céréalières	
Jardin de l'ARES	Jardinage partagé	200 m <sup>2</sup>	- Association de quartier ARES (association de résidents et centre socio-culturel de l'esplanade) - Ville (propriétaire)	espace engazonné
Jardin Fridolin		650 m <sup>2</sup>	- Association du jardin partagé Fridolin - Ville (propriétaire)	jardin d'une maison individuelle
Jardin de la Grossau		500 m <sup>2</sup>	- Association Le Jardin de la Grossau - Ville (propriétaire)	terrain vague
Prairie urbaine-pépinière de quartier de l'Arrosoir		600 m <sup>2</sup>	- Association L'arrosoir (présidée par un paysagiste) - Ville (propriétaire)	ancien pré utilisé comme parking
Micro-forêt du quartier du Danube	Micro-forêt dite Miyawaki	100 m <sup>2</sup>	- Association de quartier EDEN (Ecoquartier Danube énergies nouvelles) - Association alsacienne Biodiversité pour tous - Société d'économie mixte d'aménagement et d'équipement de la région de Strasbourg (SEM SERS) : actionnariat principal Ville et Eurométropole de Strasbourg, Collectivité européenne d'Alsace, Caisse des dépôts et consignations	sols très compactés et comportant des gravats, ayant accueilli sur une partie un parking à autobus
Micro-forêt de l'avenue du Rhin		250 m <sup>2</sup>	Collectif de quartier Forêt urbaine Strasbourg	terre-plein central d'avenue
Micro-forêt du parc aux oiseaux		100 m <sup>2</sup>	- Association de quartier SO!Schlick Ouest - Ville de Schiltigheim (propriétaire)	jardin public engazonné
Espaces verts de la Manufacture des tabacs	Espaces verts d'un aménagement urbain	2 500 m <sup>2</sup>	- Atelier d'architecte-paysagiste-urbaniste Linder Paysages - Entreprise d'ingénierie et de travaux du paysage Thierry Muller SAS - SEM SERS	espace vert d'agrément
Espaces verts de la ZAC des Deux-Rives		74 ha pour la ZAC	- Société publique locale Deux-Rives (actionnaires : Ville et Eurométropole de Strasbourg) - Entreprise d'ingénierie et de travaux du paysage Thierry Muller SAS - Bureau d'études et de conseil en environnement Archimed Environnement - Bureau d'études d'ingénierie du sol et du paysage Sol Paysage	sols majoritairement à usage industriel

[Fig. 11] Principales caractéristiques des cas d'étude (crédits : Adrien Bayse-Lainé, Laure Cormier, et Kévin Gaulier, 2022).

Trois principaux résultats émergent de cette enquête. Deux idéaux-types coexistent parmi les conceptions du sol produites par ces praticiens de la végétalisation urbaine : le sol comme matériau ou le sol comme écosystème. En parallèle, on constate une recomposition de la mise en mouvement des terres, d'un modèle linéaire vers un modèle circulaire. Enfin, une attention aux sols hérités en place peut être observée parmi les pratiques de végétalisation urbaine, dans la perspective d'une adaptation de la végétation à ces sols.

« Deux idéaux-types coexistent parmi les conceptions du sol produites par ces praticiens de la végétalisation urbaine : le sol comme matériau ou le sol comme écosystème. »



## Plus mobiles que vivants : une invisibilisation partielle des sols et de leur qualité biologique

La qualité biologique est aujourd’hui le parent pauvre de l’attention apportée aux sols urbains par les acteurs de la ville. Si les sols sont invisibilisés par les enjeux fonciers [44], ils peuvent aussi être invisibilisés par la végétalisation et l’attention des paysagistes davantage portée sur la qualité floristique des aménagements réalisés. Lorsque le sol est pris en compte par les acteurs de l’aménagement urbain, ce sont davantage ses caractéristiques physico-chimiques qui sont considérées : degré de pollution, infiltration de l’eau, etc. Les agriculteurs ou entreprises de paysage se focalisent plutôt sur la fertilité et les caractéristiques physiques du sol, notamment sa capacité à être travaillé.

[44] Blanchart A., Séré G., Chérel J., Warot G., Stas M., Consalès J.-N., Morel J.-L., et Schwartz C. *Towards an operational methodology to optimize ecosystem services provided by urban soils*, in *Landscape And Urban Planning*, 176, 2018, p. 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2018.03.019>

Si un discours est produit sur la qualité biologique des sols, il vient davantage des jardiniers, de la société civile, et se focalise autour du sujet des vers de terre – en omettant les collemboles, les nématodes – et de la matière organique, vue comme indicatrice de la fertilisation des sols.



[Fig. 12] Bacs à compost Compostra au jardin de l’arrosoir (© Kevin Gaulier, 2021).

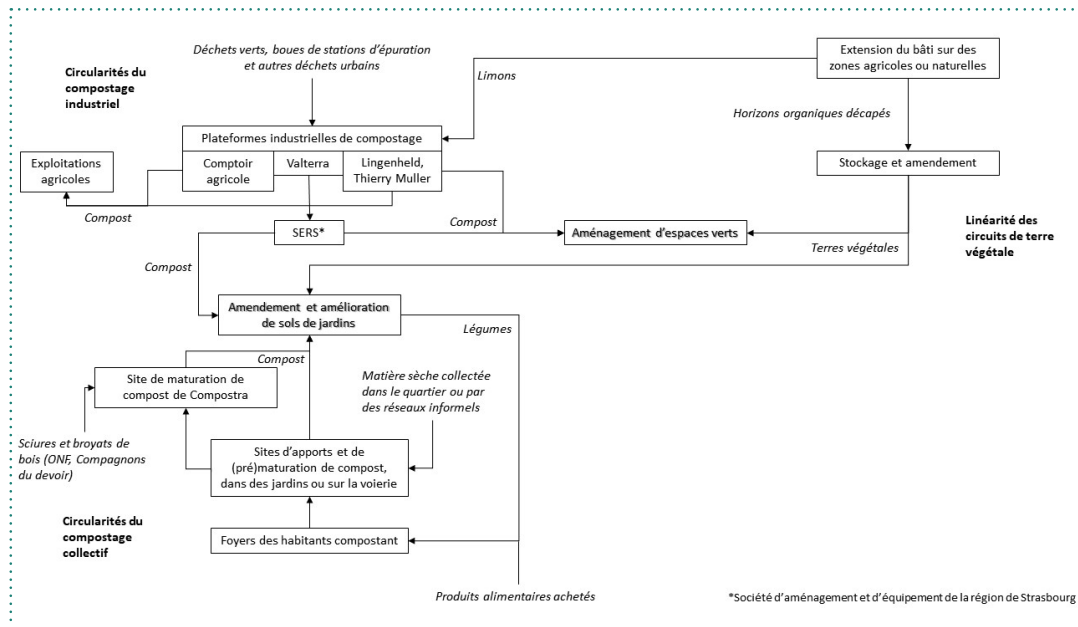
## Des circulations en lente recomposition vers une économie circulaire

« L'économie linéaire des terres, dans laquelle le front d'urbanisation de la métropole participe à la végétalisation du centre-ville, rencontre néanmoins une perte de légitimité chez les acteurs urbains. »

Dans les aménagements d'espaces de nature en ville, le recours aux apports extérieurs de terres est assez courant, à la fois pour prévenir les pollutions, et dans le souci de garantir des substrats plus fertiles dans le cadre d'aménagements végétalisés. Cette économie linéaire des terres, dans laquelle le front d'urbanisation de la métropole participe à la végétalisation du centre-ville, rencontre néanmoins une perte de légitimité chez les acteurs urbains. Deux échelles de circularisation de ces matériaux fertiles apparaissent.

Une première forme de circularisation se développe à l'échelle du quartier, avec des circuits de compostage collectif au profit des jardins partagés, dépendant en partie des apports des habitants, mais aussi d'apports extérieurs, puisque ce compost est parfois mélangé à des matières carbonées notamment issues de chantiers de l'ONF. Une deuxième échelle de circularisation apparaît également au niveau départemental, autour de circuits de compostage industriel. L'enquête a été réalisée avant l'évolution réglementaire du 1er janvier 2024, qui oblige les collectivités à offrir aux habitants une solution de récolte séparée des déchets organiques. Dans le Bas-Rhin, les circuits s'organisaient à ce moment autour de trois acteurs : une entreprise de paysage, une du BTP et une coopérative agricole, le compostage industriel étant une activité de diversification par ces acteurs. Les acteurs publics locaux et particulièrement l'Eurorégion de Strasbourg participent à la coordination de ces circularisations des circuits, en endossant un rôle d'intermédiaire entre des besoins en matériaux fertiles et des possibilités d'approvisionnement.





[Fig. 13] Principales circulations de terre, autres substrats ou amendements rapportés par les enquêtes (© Adrien Baysse-Lainé, Laure Cormier, et Kévin Gaulier, 2022).

## Des sols en place à immobiliser

Au-delà de la circularisation des modes d'approvisionnement en substrats fertiles, l'enquête rend compte d'une attention renouvelée autour des sols hérités en place, notamment dans le monde du jardinage partagé. Certains sols sont immobilisés pour qu'ils restent ou redeviennent vivants : la volonté de stabiliser ces sols en place s'exprime à travers différents registres d'argumentation. Les jardins partagés ne s'inscrivent pas nécessairement dans un objectif d'augmentation de la productivité, la recherche de sols plus fertiles reste secondaire. À cela s'ajoute le souhait des jardiniers de favoriser le développement d'une flore ordinaire sur les sites, ce qui suppose une adéquation entre les sols en place et cette flore. La volonté de réduire le coût financier et environnemental de l'importation de terres des espaces périurbains concourt également à cette dynamique, dans un souhait d'éviter le pillage de sols périurbains. Enfin, les jardiniers évoquent l'état de pollution des sols périurbains qui les conduit à les laisser à distance, en composant avec les sols en place.

« L'enquête rend compte d'une attention renouvelée autour des sols hérités en place, notamment dans le monde du jardinage partagé. »

Cette volonté de mobiliser les sols en place semble aussi gagner les aménageurs, plutôt du fait de contraintes économiques et sanitaires. Dans l'opération de la ZAC des Deux Rives (67) par exemple, confrontée à des enjeux de pollution des sols en place, un travail d'analyse pédologique a été mis en œuvre pour identifier les horizons moins pollués, de façon à réutiliser les matériaux de ces strates inférieures pour créer du substrat fertile en surface. Plus que la volonté de restaurer des sols hérités, c'est davantage l'argument économique – l'opération visant notamment à éviter des coûts trop importants de transport de matières – qui est mobilisé.

Des signaux faibles d'une évolution politique au sein de la collectivité peuvent aussi être constatés, en faveur du maintien des sols en place : le soutien à des associations de compostage collectif, la participation à un programme de sciences participatives sur les sols en ville, etc. Le service écologie urbaine de la collectivité participe notamment à légitimer les sols en place, en faveur du maintien d'une flore spécifique du territoire, parfois en conflit avec les goûts esthétiques des concepteurs et entreprises de paysage.

## Des positionnements variables parmi les acteurs

En définitive, cette étude fait ressortir le primat d'une appréhension physico-chimique des sols chez les acteurs de l'aménagement, et d'une attention émergente à la qualité biologique des sols qui reste l'apanage du grand public. Si la tendance à la circularisation de l'économie de la terre, au détriment d'une approche linéaire, est particulièrement manifeste, les pratiques d'aménagement partant directement des sols en place sont encore peu légitimes. Les modèles paysagers restent peu attentifs à la diversité des sols, des palettes végétales d'une ville à l'autre ; la végétalisation sur sol pauvre correspondant parfois peu aux modèles esthétiques.

Toutefois certains paysagistes évoluent dans l'attention qu'ils portent aux sols, et inversement le mouvement environnementaliste urbain ne garantit pas systématiquement des pratiques attentives aux sols : les caractéristiques pédologiques sont parfois perçues comme des éléments dynamiques dépendant surtout des modes de végétalisation, notamment dans le cas des micro-forêts Miyawaki.





# Comment l'agriculture urbaine participative en Seine-Saint-Denis peut-elle s'appropriier les techniques de construction de sol ?

**Thomas Lerch**

Écologue des Sols,  
UPEC, iEES-Paris

**Germain Meulemans**

Anthropologue, CNRS,  
Centre Alexandre-Koyré

**Henri Robain**

Pédologue, IRD, iEES Paris

**Ana-Cristina  
Torres**

Socio-écologue, École  
d'Urbanisme de Paris,  
Lab'URBA



Au sein du département de Seine-Saint-Denis, l'accès aux espaces verts de proximité, privés ou publics, présente de fortes disparités : si la moyenne départementale est de 12 m<sup>2</sup> d'espaces verts par habitant, des secteurs tels que la communauté d'agglomération Est Ensemble ne comportent que 6 m<sup>2</sup> accessibles par habitant. Les jardins collectifs, ou autres sites d'agriculture urbaine, revêtent donc une importance sociale particulière. Beaucoup de ces jardins font néanmoins face à un contexte de contamination des sols, héritée de l'histoire industrielle, agricole et urbaine du département.

## Un projet multi-acteurs

Le projet IPAUP propose une démarche interdisciplinaire de co-construction de connaissances ayant pour objet la réhabilitation de sols contaminés par des éléments traces métalliques dans le département de Seine-Saint-Denis, à destination de jardins collectifs et de sites d'agriculture urbaine participative. Pendant quatre ans (2020-2024), ce projet a regroupé des chercheurs en sciences du sol et en sciences sociales, le département de Seine-Saint-Denis et quatre associations gérant des jardins collectifs ou des sites d'agriculture urbaine : Halage à l'Île Saint-Denis, Activille à Bobigny, Le Sens de l'Humus à Montreuil et le LAB3S à Bondy. Ces structures présentent des profils diversifiés, certaines étant proches des institutions, d'autres émanant des citoyens. Les modes d'usage des sols, les types de culture et les itinéraires techniques sont également variables, de la production de fleurs à l'auto-production alimentaire, du projet d'insertion à l'animation écocitoyenne, en passant par la lutte contre la précarité alimentaire. Ces différentes structures ont engagé une concertation dès 2018 pour identifier des marges de manœuvre pour l'agriculture urbaine participative malgré la pollution. Cette approche technique s'est inscrite au cœur d'une réflexion plus large sur la place de ces jardins collectifs dans un territoire qui peut sembler peu propice à leur développement.

« La co-construction implique une collaboration à différentes étapes du processus de recherche, pouvant aller de la définition de la question de recherche à la valorisation des résultats, en passant par les orientations méthodologiques et la collecte des données. »

Le projet IPAUP93 s'inscrit au sein du dispositif de financement et d'accompagnement CO3 de l'ADEME, « co-construction des connaissances pour la transition écologique et solidaire ». Parmi les différentes acceptions de la recherche participative – contribution, collaboration, ou co-construction – IPAUP93 a suivi cette dernière démarche dans laquelle les chercheurs et les citoyens travaillent ensemble avec leurs compétences propres à la définition de la question de recherche, de la méthode, des résultats. Cette démarche de production de connaissance associe des chercheurs professionnels et des acteurs citoyens, et implique une collaboration à différentes étapes du processus de recherche, pouvant aller de la définition de la question de recherche à la valorisation des résultats, en passant par les orientations méthodologiques et la collecte des données.

Trois axes de recherche structuraient le projet : un axe pédologique, un axe socio-anthropologique et un axe culturel. L'axe pédologique s'est inscrit dans une perspective d'ingénierie pédologique. Il s'agit ici d'expérimenter dans ces jardins des techniques permettant de réhabiliter les sols pollués pour lesquelles l'IEES-Paris<sup>2</sup> détient une expertise importante. Dans le département de Seine Saint Denis, cette approche répondait aux enjeux spécifiques liés à l'agriculture urbaine participative : la réduction des risques de pollution, mais aussi la gestion spécifique de techniques d'amélioration de la qualité des sols cultivés dans un contexte participatif. L'axe socio-anthropologique visait à documenter les pratiques jardinières liées au sol : le projet IPAUP93 s'insère effectivement dans une histoire des rapports au sol sur le territoire. Il s'agissait donc de documenter l'histoire des sites et le fonctionnement des associations en relation avec les sols et les contaminations sur chaque site. Enfin, le dernier axe, culturel, devait permettre une mise en débat des relations des habitants avec cet héritage de pollution, par des déambulations, des débats, des ateliers, et d'autres événements ouverts au grand public.

## **Construire des sols, co-construire une expérimentation**

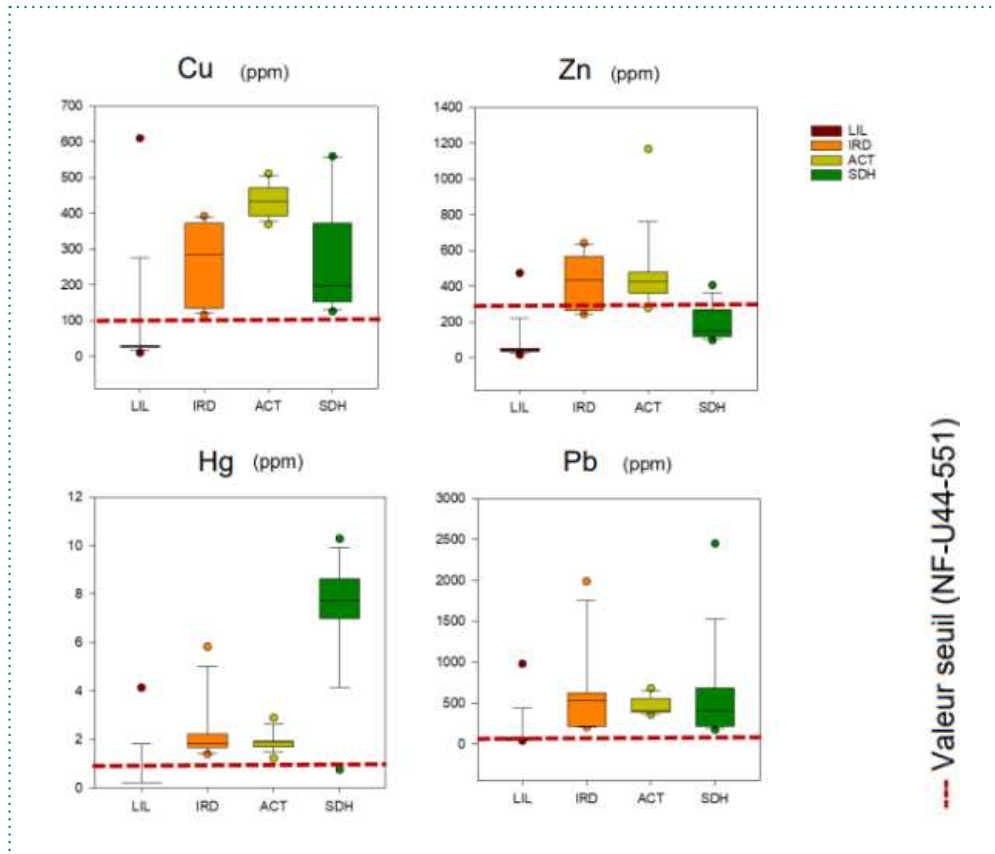
Les expérimentations en ingénierie pédologique se sont construites autour d'une hypothèse principale, discutée entre chercheurs et jardiniers : l'ajout d'un sol construit à partir de matériaux recyclés (terres excavées et compost), au-dessus d'un sol contaminé par des éléments traces métalliques, permet-il de cultiver des légumes et d'atténuer leur contamination, par rapport à des légumes cultivés en pleine terre ?

L'expérimentation supposait de respecter des canons de répliquabilité des expériences, et donc une certaine homogénéité de l'espace dans lequel seraient implantés les plots expérimentaux. Des images du sous-sol ont été obtenues à l'aide de méthodes de tomographie de la résis-

tivité électrique. Celles-ci ont été l'objet d'intéressantes interactions avec les jardiniers : disposer non pas de cartes, mais de coupes du sol a joué sur leur appropriation des sites d'expérimentation. Les sites choisis témoignent de fortes concentrations en éléments traces métalliques [45] – cuivre, zinc, mercure et plomb – largement supérieurs aux seuils d'acceptabilité pour un usage de jardinage.

La mise en place de l'expérimentation a aussi été un moment de débat important entre scientifiques et jardiniers : alors que les jardiniers souhaitaient utiliser leur propre compost dans l'expérimentation – celui-là même qu'ils utilisent au quotidien – les chercheurs en pédologie souhaitaient utiliser un compost de déchets verts normé et standardisé qui permettrait une plus grande comparabilité. C'est cette expérimentation qui a finalement été mise en place. Le choix des cultures est toutefois revenu aux jardiniers, plus spécialistes en la matière que les chercheurs, de même que l'itinéraire technique, et la mise en place de ces expérimentations.

[45] Les éléments traces métalliques (ETM) les plus connus pour leur dangerosité sont le plomb (Pb), le mercure (Hg), le cadmium (Cd), le chrome (Cr), le cuivre (Cu), le nickel (Ni), le zinc (Zn) auxquels il faut ajouter l'arsenic (As) et le sélénium (Se).



[Fig. 14] Teneurs en éléments traces métalliques (Cu, Zn, Hg, Pb) pour les sols des 4 sites expérimentaux du projet IPAUP (© Projet IPAUP-93).



Après trois années de culture de légumes différents – légumes « racines », légumes « feuilles » et légumes « fruits » – il apparaît que :

- Les deux traitements (Technosol construit ou compost seul) ont une faible influence sur la production de biomasse végétale par rapport aux sols initiaux.
- En revanche, le Technosol construit diminue significativement la concentration en éléments traces métalliques dans les légumes, avec cependant une forte variabilité en fonction des légumes, des sites et des éléments.

Deux réponses fortes émergent ainsi face aux interrogations des jardiniers : il est possible de cultiver sur sol construit en maintenant les rendements habituels, et ce traitement permet d'atténuer l'exposition des légumes aux éléments traces métalliques. De plus, l'ajout de Technosol construit est généralement plus performant que le seul apport de compost.

« La mise en place de l'expérimentation a été un moment de débat important entre scientifiques et jardiniers. »

Un point d'attention doit toutefois être souligné : si l'expérimentation visait à atténuer l'exposition aux métaux déjà présents sur le site, d'autres éléments traces métalliques ont été apportés par le compost, pourtant normé, qui présentait des concentrations notables en cuivre et en zinc. Par ailleurs, ces résultats présentent une grande variabilité à la fois selon les sites expérimentaux, et selon l'année : les conditions météorologiques, tout comme l'attention portée à la culture, ont donc une influence significative sur le taux de contamination des légumes. Enfin, l'évolution à long terme des couches fertiles apportées est aussi un enjeu à prendre en compte, du fait de leur interaction avec le substrat sous-jacent.

## Un projet participatif : difficultés et enseignements

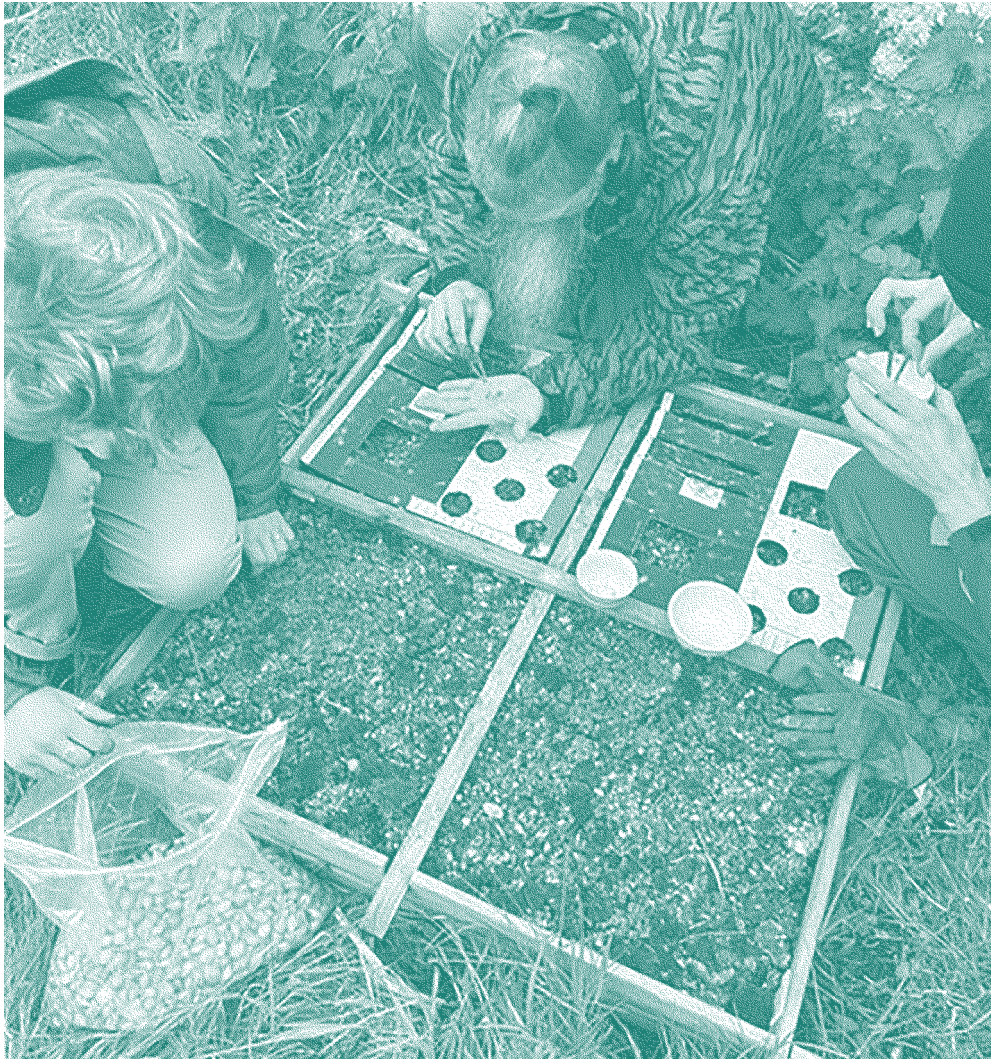
La mise en œuvre du projet IPAUP93 a permis de tirer plusieurs enseignements relatifs à la démarche de co-construction adoptée.

Un premier point d'attention repose sur le travail important de coordination de projet autour des trois axes, principalement pris en charge par deux associations, dont le temps a été sous-estimé. La collaboration entre des chercheurs pouvant être engagés dans de nombreuses tâches par ailleurs, des associations présentant un turn-over assez important du personnel, et des jardiniers parfois difficiles à impliquer durablement, a constitué un défi de taille.

« Le projet a vu apparaître une forme de tension entre des impératifs de robustesse de la démarche scientifique, et une revendication de pertinence de la part des associations, pour qui l'expérimentation ne devait pas être déconnectée de leurs pratiques. »

D'autres difficultés sont inhérentes aux démarches de co-construction et mettent en lumière des tensions épistémiques liées aux différences entre les exigences de la démarche scientifique, et la réalité du fonctionnement d'un jardin. En effet, la mise en place coordonnée d'une expérimentation sur quatre sites présente des défis logistiques, et demande une forme de standardisation des expérimentations. Ainsi, les différents sites ont reçu pour l'expérimentation un même compost normé, et non pas les composts spécifiques produits par chaque jardin, ce qui était pourtant souhaité par les jardiniers. Il a également fallu standardiser les techniques culturales selon les sites, ce qui a amené à supprimer le paillage la première année, avant de le réintroduire l'année suivante pour des raisons agronomiques et météorologiques. Le projet a donc vu apparaître une forme de tension, mais aussi de négociation, entre des impératifs de robustesse de la démarche scientifique, et une revendication de pertinence de la part des associations, pour qui l'expérimentation ne devait pas être déconnectée de leurs pratiques.

Si les parties prenantes ont entamé le projet avec différentes manières de concevoir la co-construction, elles ont appris collectivement à mener une démarche participative. Le projet a effectivement permis de matérialiser une complémentarité des compétences entre les différents acteurs, les chercheurs en sciences du sol ayant notamment besoin de l'expertise des jardiniers pour les questions agronomiques. Plus largement, cette co-construction a impliqué un processus d'acculturation réciproque, et de réflexion collective sur ce que sont la finalité d'une recherche, sa temporalité, ou ses résultats. Ce projet aura contribué à dépasser une approche de la pollution des sols comme question simplement technique, pour en faire un problème partagé à l'échelle du territoire de la Seine Saint Denis. L'enjeu de vivre durablement dans ces territoires pollués, au sens où il concerne la vie de la cité, doit faire l'objet d'une discussion politique : cela invite à tester de nouveaux assemblages entre différentes disciplines et entre sciences et sociétés, à l'image de la démarche expérimentée dans le cadre du projet IPAUP.



[Fig. 15] Plantation minutieuse des légumes en respectant un patron de disposition conçu avec les jardiniers (© Projet IPAUP-93).





# Décrypter les coûts de la restauration des sols urbains

**Charles Claron**

Doctorant en économie,  
CIRED & LATTS

**Mathilde Salin**

Doctorante CIFRE  
en économie, Banque  
de France & CIRED

## Une pratique cruciale aux coûts méconnus

À mesure que les contributions vitales des sols à la qualité de vie urbaine sont mieux comprises et reconnues (via les services écosystémiques qu'ils fournissent), la restauration des sols émerge comme une « solution fondée sur la nature » essentielle pour assurer la résilience et l'habitabilité des villes face aux changements planétaires [46]. Cette préoccupation se traduit notamment par des initiatives politiques et juridiques qui encouragent la restauration des sols notamment urbanisés, tels que le Règlement européen sur la restauration de la nature (2024), le projet de Directive européenne sur la surveillance des sols, ou encore la promulgation de l'objectif zéro artificialisation nette (ZAN) en France (2021).

Mais dans ce domaine, la législation précède les connaissances. En effet, les sols ont longtemps occupé une place superficielle dans le champ scientifique de l'écologie de la restauration, comme dans les pratiques de restauration écologique. Les sols urbains, *a fortiori*, ne sont qu'un sujet d'intérêt récent, à la croisée des sciences du sol et des études urbaines. Ainsi, bien que des connaissances techniques existent sur des enjeux urbains spécifiques tels que la dépollution des sites, la désimperméabilisation ou la végétalisation, les connaissances scientifiques transversales sur la restauration des sols urbains sont encore lacunaires.

Cette limitation est particulièrement marquée en ce qui concerne la dimension économique de la restauration des sols, et notamment les coûts de ces opérations. Or, cette information est cruciale pour l'évaluation, la planification et la réalisation de l'action publique territoriale en la matière. En France, la principale étude de référence est un rapport de France Stratégie (2019) [47] qui estime les coûts de la restauration entre 160 et 450 €/m<sup>2</sup> en la décomposant en quatre étapes : déconstruction, dépollution, désimperméabilisation et construction de sols. Toutefois, cette étude présente plusieurs lacunes liées à l'absence ou à l'ancienneté des sources des données et à un manque de transparence méthodologique. En adoptant un principe similaire de décomposition, la recherche présentée ici vise à approfondir la compréhension et l'évaluation des coûts de la restauration des sols urbains [48].

[46] Pavao Zuckerman M. A. *The Nature of Urban Soils and Their Role in Ecological Restoration in Cities*, in *Restoration Ecology*, 16(4), 2008, p. 642-649. <https://doi.org/10.1111/j.1526-100x.2008.00486.x>

[47] Fosse J., Belaunde J., Dégremont M., Grémillet A. *Objectif « Zéro artificialisation nette » : quels leviers pour protéger les sols ?* Rapport de France Stratégie, au ministre de la Transition écologique et solidaire, au ministre de la Cohésion des territoires et des Relations avec les collectivités territoriales et au ministre chargé de la Ville et du Logement (2019).

[48] Salin M., Claron C., Nguyen-Rabot E., Mondolfo N., et Levrel H. *Les coûts de la restauration des sols urbains*, in CIREDD Working Papers n°2024-96-FR, 2024.



## Méthode d'enquête

Dans un premier temps nous avons mené dix entretiens approfondis avec des responsables de réseaux scientifiques, techniques ou professionnels liés au génie écologique, ainsi que des responsables de programmes de financement sur la restauration des sols. Cette phase exploratoire nous a permis de comprendre le contexte scientifique et institutionnel de la filière et d'ébaucher une première typologie des étapes de la restauration des sols et d'identifier des sources d'informations sur les coûts.

Sur la base de ces éléments, nous avons mené une campagne d'entretiens semi-directifs, auprès de 46 acteurs de la filière de la restauration des sols, dont 61% venant d'entreprises privées, 22% d'établissements publics et 13% de collectivités locales. Ces enquêtés étaient interrogés sur : (1) la décomposition du processus de restauration des sols en étapes ainsi que les techniques associées à chaque étape ; (2) l'estimation des coûts des étapes et techniques pour lesquelles ils ont des connaissances ; (3) les paramètres susceptibles de faire varier ces coûts. Ces données d'entretien ont été complétées par le recueil de documents techniques contenant des informations sur les coûts d'opérations de restauration.

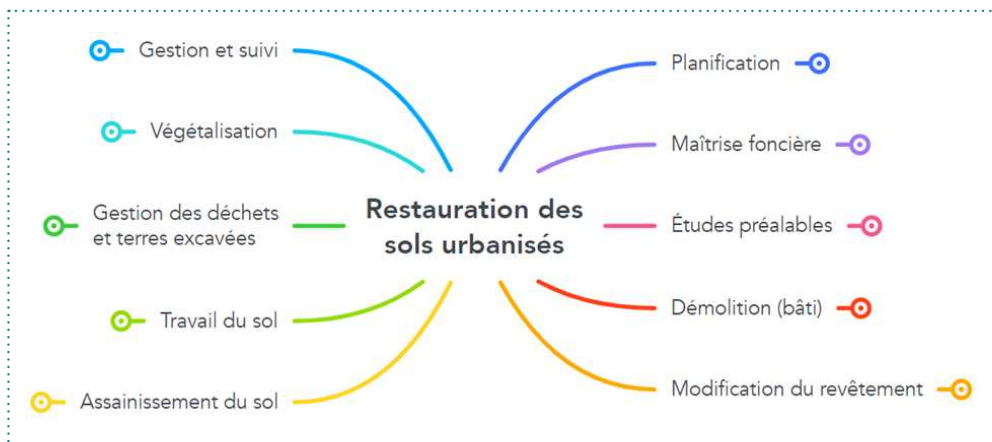
Les données recueillies pendant l'enquête ont été traitées dans le but de comprendre la structuration détaillée des coûts des différentes étapes et techniques de restauration et de pouvoir reconstituer des opérations types de renaturation des sols pour estimer leur coût total.

## Un processus technique composé de dix étapes aux coûts variés

Notre enquête suggère que la restauration des sols artificialisés est une forme spécifique d'aménagement urbain, qui peut être représentée comme un processus composé de dix étapes techniques. Cependant, toutes ces étapes ne sont pas systématiquement mobilisées au cours d'une opération de restauration des sols. De plus, cette décomposition n'est pas exhaustive, car de nombreuses autres compétences sont nécessaires au conseil, à la conception et à la mise en œuvre de ces aménagements.

« La restauration des sols artificialisés est une forme spécifique d'aménagement urbain, qui peut être représentée comme un processus composé de dix étapes techniques. »

- 1 **La planification** recouvre notamment les opérations de cartographie et d'identification des sites de restauration à diverses échelles territoriales.
- 2 **La maîtrise foncière** désigne l'acquisition de tout ou partie des droits réels des parcelles à restaurer.
- 3 **Les études préalables** correspondent aux divers diagnostics (agronomiques, écologiques, pollution, etc.) effectués en amont de la conception des opérations pour orienter les procédés techniques.
- 4 **La démolition** désigne l'abattage des éventuels bâtiments.
- 5 **La modification du revêtement** consiste à réaménager (souvent retirer, parfois remplacer avec un revêtement perméable) la couverture des sols, généralement pour améliorer leur perméabilité.
- 7 **L'assainissement** désigne la dépollution ou la gestion de la pollution éventuelle des sols.
- 8 **Le travail du sol** regroupe les différentes techniques visant à recréer des sols ou des substrats fertiles (technosols construits ou reconstitués, apports de terre végétale, décompactage du sol en place, etc.).
- 9 **La gestion** des déchets et des terres excavées désigne les opérations d'évacuation, traitement, stockage et recyclage des terres issues d'excavations, ainsi que des déchets provenant de la démolition du bâti ou du descellement des revêtements.
- 10 **La végétalisation** recouvre toutes les actions de plantation de végétaux dans le sol, qu'elles poursuivent des objectifs ornementaux ou d'ingénierie écologique.
- 11 **La gestion** désigne les opérations de suivi et d'entretien de la santé des sols et milieux restaurés.



[Fig. 16] Les différentes étapes de la restauration des sols (Salin et al., 2024)

Notre enquête a permis de constituer une base de données de 748 estimations de coûts pour différentes techniques converties en €/m<sup>2</sup> pour faciliter la comparaison. Ces résultats sont donc à manipuler avec précaution, car la conversion des données repose sur des hypothèses. Les « études préalables » (1 à 13 €/m<sup>2</sup>) et la « gestion et suivi » (1 à 29 €/m<sup>2</sup>) apparaissent comme les étapes les moins coûteuses au mètre carré. À l'inverse, la « gestion des déchets et terres excavées » (26 à 242 €/m<sup>2</sup>) et « l'assainissement des sols » (35 à 573 €/m<sup>2</sup>) représentent les dépenses les plus élevées.

Plusieurs variables sont susceptibles d'influencer le coût global des opérations de restauration, à commencer par les caractéristiques du site (notamment l'hétérogénéité du sol) et le niveau de restauration programmé. À situations comparables, la plupart des étapes bénéficient d'économies d'échelle, étant relativement moins coûteuses pour des sites plus vastes. La temporalité du projet est également importante, un délai court nécessite généralement des ressources importantes qui favorisent des coûts à la hausse. Enfin, la localisation géographique du projet peut jouer sur des facteurs comme le coût du travail, sur celui des matières comme la terre végétale ou sur le coût de gestion des déchets, en lien avec la disponibilité et l'accessibilité des décharges. Notre étude répertorie aussi les différents facteurs de variabilité spécifiques à chaque étape. En revanche, nos données ne permettent pas de quantifier la sensibilité des coûts à la variation de ces facteurs.

## Une méthode combinatoire pour estimer le coût total des itinéraires de restauration

Afin d'estimer le coût total d'opérations types de restauration des sols, nous avons développé un principe de construction de scénarios, illustré par la figure ci-dessous. Nous distinguons quatre états initiaux du sol - construit (B), revêtu (ou imperméabilisé) (R), compacté (C) ou pollué (P) - ainsi que deux états finaux recherchés : sol couvert par un revêtement perméable (RP) ou végétalisé (V), aussi appelé « pleine terre ». Trois niveaux d'ingénierie écologique sont également considérés pour caractériser les opérations de restauration : faible (Fa), modéré (M) ou fort (Fo). Ces paramètres permettent de représenter des opérations types de restauration des sols urbains définies par des « itinéraires techniques », c'est-à-dire des séquences spécifiques d'étapes et de techniques. Le coût d'une restauration type est alors évalué en additionnant les coûts (estimés) des étapes et techniques qu'elle mobilise.

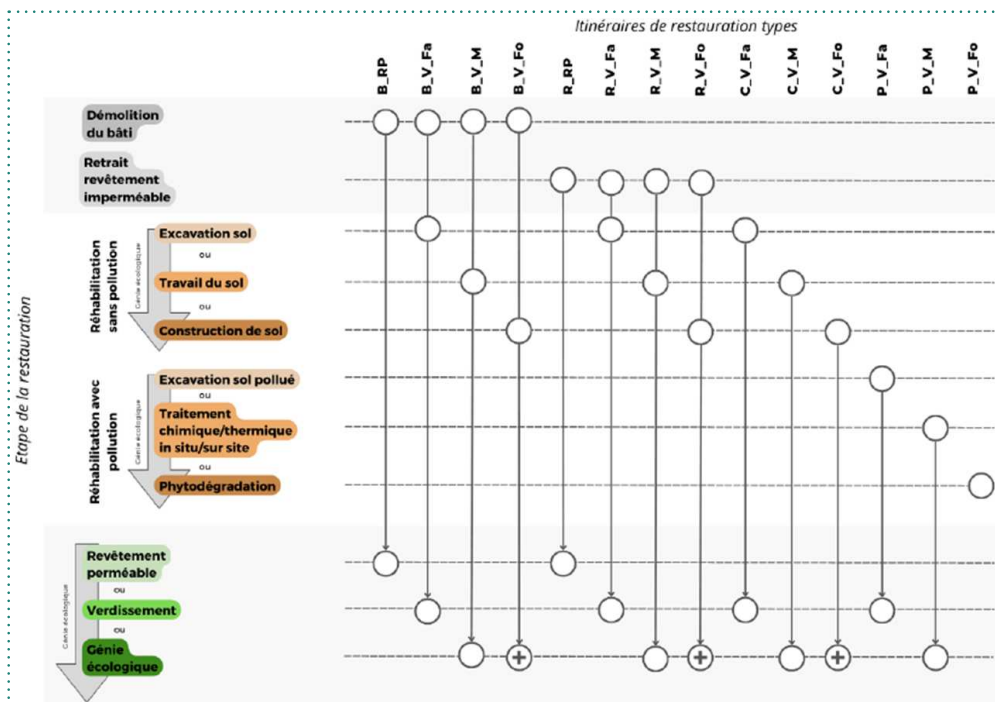
La plupart de nos scénarios affichent des coûts médians compris entre 30 et 250 €/m<sup>2</sup>, qui dépendent significativement de l'état initial des sols [49]. Toutefois les coûts peuvent largement s'écarter de la médiane, notamment lorsque des techniques de dépollution lourdes sont nécessaires (jusqu'à 1500 €/m<sup>2</sup>), ou lorsque les bâtiments ou revêtements à

[49] Bien que nos résultats diffèrent sensiblement dans le détail, cet ordre de grandeur est globalement cohérent, quoique légèrement plus élevé, avec les résultats de France Stratégie (Fosse, 2019).



démolir contiennent de l'amiante. Il est important de noter que les projets impliquant un haut niveau de génie écologique ne sont pas nécessairement plus coûteux, mais ils entraînent des coûts de gestion et de suivi élevés, souvent étalés sur plusieurs années.

« La plupart de nos scénarios affichent des coûts médians compris entre 30 et 250 €/m<sup>2</sup>, qui dépendent significativement de l'état initial des sols. »



[Fig. 17] Le nom des itinéraires type adopte la structure suivante : [Etat Initial]\_[Etat Final]\_[Ingénierie Écologique]. (Salin et al., 2024).

Le principe combinatoire offert par la décomposition en étapes permet ainsi d'évaluer les coûts d'une grande diversité d'opérations de restauration. Les itinéraires proposés sont représentatifs de projets réels. Ainsi, la végétalisation d'un sol imperméabilisé (itinéraires R\_V\_...) est typique des projets de restauration de cours d'école, de parkings ou de cimetières. Nos estimations de coûts pour ces opérations, entre 179 et 205 €/m<sup>2</sup>, sont cohérentes avec les coûts observés sur certains projets réels de « cours oasis » (désimperméabilisation de cours d'école) : entre 200-300 €/m<sup>2</sup> à Paris et 200 €/m<sup>2</sup> dans les villes du Sud-Est (hors mobilier urbain).

## Des estimations utiles, mais à affiner

Malgré ces résultats encourageants, l'estimation des coûts de la restauration des sols peut encore être améliorée dans quatre directions. Premièrement, nos estimations doivent être complétées : par souci de simplicité nous n'avons pas pris en compte des coûts de certaines étapes pour lesquelles nos données étaient insuffisantes : planification, maîtrise foncière et études préalables. Il faut également prévoir des coûts additionnels pour la maîtrise d'œuvre (8 % des coûts des travaux) et la TVA (les coûts sont donnés hors taxe). Deuxièmement, notre décomposition ne couvre pas forcément toutes les facettes du processus de restauration des sols. En outre, une meilleure compréhension des interactions entre les étapes (synergies, arbitrages, etc.) est essentielle pour une évaluation plus précise des coûts globaux. Troisièmement, les principes de construction de nos scénarios ont été volontairement simplifiés : en pratique les sites à restaurer peuvent être plus complexes (par exemple, à la fois revêtus et pollués), de même que les états finaux programmés. En pratique, l'itinéraire de restauration choisi pour un site est contraint par ses caractéristiques, des facteurs réglementaires et des déterminants politiques (usages souhaités, délais imposés). Pour finir, ce travail ne mesure pas la part d'incertitude qui entoure tout projet de restauration des sols. Par exemple, la découverte d'une pollution en cours de travaux peut significativement augmenter le budget. Cette incertitude peut être limitée par un diagnostic plus exhaustif des propriétés physiques, chimiques et biologiques des sols (variété et précisions des études préalables).

Dans la perspective des politiques de restauration des sols artificialisés, ces estimations de coûts peuvent avoir plusieurs applications. Elles peuvent fournir des bases d'information aux décideurs publics et privés pour planifier et prioriser les actions de restauration à des échelles territoriales et évaluer les investissements nécessaires à la réalisation d'objectifs en la matière. Elles peuvent également être utilisées dans le cadre de démarches de comptabilité écologique, où la plupart des méthodes d'évaluation des dettes écologiques s'appuient sur les coûts de restauration des entités naturelles [50]. Dans le cadre du ZAN, par exemple, cela permettrait d'évaluer la dette correspondant à l'artificialisation, avec des données liées aux coûts de la restauration de ces sols artificialisés [51]. Dans cette optique, les coûts de restauration pourraient également permettre d'évaluer le montant des garanties financières qui pourraient être demandées aux organisations responsables de la dégradation des sols pour pouvoir assurer des obligations de remise en état, comme cela existe déjà pour l'exploitation des carrières [52].

[50] Feger C., Levrel H., et Rambaud A. Trois méthodes comptables complémentaires pour mettre les problèmes écologiques au cœur de la chose publique. In *Revue Française d'Administration Publique*, N° 183(3), 2023, p. 815-829. <https://doi.org/10.3917/rfap.183.0174>

[51] Gonon M., Surun C., et Levrel H. Limiter l'artificialisation des sols pour éviter une dette écologique se chiffrant en dizaines de milliards d'euros, In *The Conversation*, 2021.

[52] Code de l'environnement, articles L.515-1 à L.515-6.







B5-1





# DES RECHERCHES À LA PRATIQUE

# Quelle articulation entre recherches scientifiques, cadre réglementaire et pratiques de gestion des sols ?

Retour sur une discussion croisée  
chercheurs/opérationnels

*Modération :*

**Mathieu Delorme**

Paysagiste-urbaniste,  
Directeur de l'Ensa Paris-Est, vice-président de  
l'Université Gustave Eiffel,  
codirecteur de la Chaire  
Transition foncière

*Intervenants :*

**Philippe Branchu**

Ingénieur de recherche  
Sols, CEREMA

**Camille Brussier**

Chargée d'étude,  
CDC biodiversité

**Geoffroy Séré**

Professeur des universités  
en pédologie, Laboratoire  
Sols et Environnement,  
Université de Lorraine

**Stéphanie Herbé**

Chargée des projets  
transversaux,  
association Halage



En matière de fronts de sciences, les sols urbains sont l'objet de nombreux travaux scientifiques émergents sur la pollution des sols, la désimperméabilisation, les dynamiques écologiques des sols construits. Ces savoirs nouvellement consolidés sont parfois difficilement appropriés par les acteurs opérationnels et les collectivités. Comment transférer ces connaissances à un public non-scientifique ? Comment intégrer des dynamiques ascendantes, participatives, provenant du terrain, dans la démarche scientifique ? Et comment prendre en compte le temps politique dans le temps long de la recherche, intégrer les évolutions réglementaires parfois rapides ?

### **Des porosités entre la recherche scientifique et la sphère opérationnelle : construire des projets de recherche avec des collectivités ou des entreprises**

La collaboration avec des collectivités et des entreprises dans le cadre de projets de recherche vise à assurer une application pratique des résultats scientifiques. Les projets Siterre I [53] et Siterre II [54], menés en partenariat avec des acteurs privés, impliquent des collaborations avec l'UNEP (Union des Entreprises du Paysage) et l'association Plante et Cité. Il s'agit d'un programme de recherche sur la construction de sols urbains fertiles pour les aménagements d'espaces verts en ville, portant une attention particulière sur les potentialités de matériaux recyclés urbains en substitut de la terre végétale et des granulats de carrière. Un exemple concret de ce transfert de connaissances est le projet de recherche-action mené avec le syndicat du SCOT Sud Lorraine, qui porte sur la renaturation d'une commune rurale du sud de l'agglomération. Cette démarche a permis des échanges fructueux avec la maire de la commune et les étudiants impliqués, malgré une entrée initialement théorique. Cependant, dans de nombreux projets de recherche, la question scientifique précède encore la question des sites d'application. La recherche doit davantage s'inspirer des pratiques de terrain et des expériences menées par des opérationnels ou des citoyens.

[53] Projet SITERRE 1 – Construction de sols fertiles à partir de matériaux de recyclage issus de la ville (2010-2015).

[54] Projet SITERRE 2 – Vers une filière éco-efficace de valorisation de déchets et sous-produits industriels ou urbains pour développer des sols fertiles (2022-2026).

## Transférer les connaissances issues des recherches par la création d'entités opérationnelles ?

Dans le laboratoire Sols et Environnement, de l'Université de Lorraine, ce transfert opérationnel de la recherche s'est manifesté notamment par la création de l'entreprise Sol & Co, fondée par Anne Blanchart, un bureau d'études qui offre des services de diagnostic et d'accompagnement aux collectivités. De son côté, le Cerema, dans son ADN même, intègre une dimension à la fois opérationnelle et scientifique : établissement public opérant sous la tutelle du ministère de la Transition écologique, et de la Cohésion des Territoires, il tente de répondre aux besoins de connaissances des collectivités locales. Ces dernières se posent peu la question des sols en eux-mêmes, mais formulent des préoccupations autour de la renaturation, de la désimperméabilisation, de l'utilisation des terres excavées. Certaines solutions apportées comme les sols reconstruits peuvent être perçues avec méfiance, l'enjeu est donc d'accompagner cette demande en expliquant pourquoi la solution proposée répond à leur demande. Les projets comme MUSE, initié en 2017 avec l'ADEME, démontrent comment intégrer la multifonctionnalité des sols dans la planification urbaine en utilisant des données existantes, même imparfaites, pour créer des indicateurs tels que l'infiltration de l'eau, la production de biomasse via le potentiel agronomique, l'habitat pour la biodiversité, ainsi qu'un indicateur carbone. Ces efforts permettent aux élus, paysagistes, et techniciens des collectivités d'avoir accès aux données cartographiques disponibles sur leur territoire.

### Des initiatives opérationnelles qui intègrent la recherche

Les initiatives intégrant la recherche, comme Lil'Ô [55] menée par l'association Halage depuis 2018, illustrent comment des projets citoyens portés politiquement peuvent créer un espace de transfert *in situ* de la recherche. Sur 3,6 hectares de friches à L'île-Saint-Denis, Halage travaille à restaurer des sols pollués, compactés et imperméabilisés [56]. Les programmes scientifiques IPAUP et Restaur'Sol permettent une collecte de données collaborative entre jardiniers en insertion et chercheurs, permettant aux salariés du site d'être impliqués et un transfert de la recherche par le « faire », et en retour l'expérience des salariés alimente les réflexions des chercheurs, voire la fait avancer. En partenariat avec les entreprises Neo-Eco et Topager, ces projets ont nourri le lancement de la SAS Faiseurs de Terres [57], en vue d'accompagner les transformations urbaines et de produire des substrats fertiles pour toitures végétalisées et aménagements paysagers au sol.

[55] Projet de réhabilitation d'une ancienne friche industrielle à L'île-Saint-Denis, mis en œuvre par l'association Halage, avec l'implantation d'éco-activités à vocation de démonstration pour les habitants du territoire.

[56] Dentzer J., Ramière T., Garnier G., Carlier J., De Lille L. C., Delefosse C., Deschamps J., Mercier S., Partouche N., Torres A. C., Varin H., et Zulliani L. *Les sols créateurs de paysages à l'extrémité aval de l'île Saint-Denis*, in *Projets de Paysage*, 2022, p. 27. <https://doi.org/10.4000/paysage.31970>

[57] Structure développant une filière de production de substrats fertiles à partir de terres excavées, dans une logique d'économie circulaire et d'insertion. Projet fondé par Halage, Topager, Néo-Eco, et soutenu notamment par l'Ademe, la Région Île-de-France.



[Fig. 18] Dans le cadre du projet de recherche RESTAUR'SOL, mise en œuvre du protocole de coupe et de prélèvement de la biomasse aérienne végétale par les salariés en parcours d'Halage et les chercheurs de l'IRD (© Halage/Stéphanie Herbé).

« Les programmes scientifiques IPAUP et Restaur'Sol permettent une collecte de données collaborative entre jardiniers en insertion et chercheurs, permettant aux salariés du site d'être impliqués et un transfert de la recherche par le "faire", et en retour l'expérience des salariés alimente les réflexions des chercheurs, voire la fait avancer. »

En outre, les chercheurs sont parfois mobilisés dans des initiatives opérationnelles et techniques comme experts. À CDC biodiversité, bibliographie et rencontre de chercheurs permettent de définir des itinéraires techniques adaptés à la restauration écologique en fonction de l'état et du type de sol initial, en tenant compte de divers paramètres comme la biodiversité, le cycle de l'eau et le stockage de carbone. Par ailleurs, la collaboration avec des chercheurs permet de développer un indice de biodiversité locale, pour mesurer les gains des projets d'aménagement sur la fonction support de biodiversité, le cycle de l'eau et le stockage de carbone grâce à une comparaison entre un état initial et un état projeté.



## Permettre l'appropriation des recherches scientifiques pour agir

L'intégration de ces données scientifiques complexes sur les sols vivants dans les processus décisionnels urbains impose certains points d'attention. Traditionnellement, la planification urbaine repose sur des critères simples : la propriété privée, le prix des biens, les documents d'urbanisme définissant les usages. Ajouter la complexité des données scientifiques nécessite un accompagnement et une acculturation : par exemple, les cartes du projet MUSE ne sont pas accompagnées de notices d'interprétation au risque d'influencer les élus. Pour faciliter ce transfert de connaissances, la formation des acteurs de l'aménagement, de l'urbanisme et de l'architecture à la prise en compte des sols a été soulignée comme étant essentielle. Cette approche de long terme, à combiner avec l'implication de multiples acteurs comme les bureaux d'études, pourrait transformer les pratiques actuelles.

« Traditionnellement, la planification urbaine repose sur des critères simples : la propriété privée, le prix des biens, les documents d'urbanisme définissant les usages. Ajouter la complexité des données scientifiques nécessite un accompagnement et une acculturation. »

L'appropriation des connaissances par les acteurs de terrain est en effet primordiale. Le projet IPAUP en est une illustration : les jardiniers, initialement contraints par un protocole scientifique rigide, ont convaincu les chercheurs de réintroduire le paillage pour résoudre des problèmes d'arrosage causés par les technosols. Cette co-construction entre chercheurs et praticiens démontre la capacité d'adaptation des protocoles scientifiques aux réalités du terrain.

Parfois, les collectivités sont à l'initiative de cette complexité scientifique, comme la commune de Ris-Orangis qui a souhaité innover en intégrant des données écologiques dans leur plan local d'urbanisme (PLU), visant à l'objectif zéro artificialisation nette (ZAN). La cartographie de Ris-Orangis, établissant un gradient de multifonctionnalité des sols, offre une base solide aux décisions d'urbanisme.

## Le cadre incertain de la réglementation sur les sols : gérer les situations liées à l'instabilité réglementaire

Malgré le cadre réglementaire incertain, l'enthousiasme domine parmi les différents acteurs : en cinq ans, le thème de la santé des sols a largement émergé. Aujourd'hui, la réglementation encadre positivement la composition des technosols, bien que des termes comme la « renaturation » nécessitent des précisions. La notion de « refonctionnalisation »

des sols, préférée par certains experts, permet de mettre en avant diverses fonctions écologiques sans prétendre à une restauration complète des écosystèmes d'origine, souvent disparus depuis longtemps. Par exemple, des projets de désimperméabilisation en milieu urbain illustrent cette démarche en améliorant la gestion de l'eau et la fertilité des sols sans prétendre revenir à un état naturel originel.

La réglementation évolue pour encourager la préservation des sols, mais elle reste ancrée dans une logique comptable, se concentrant davantage sur la désartificialisation plutôt que sur la santé et les fonctions des sols. La production de nouvelles données est essentielle pour répondre aux demandes politiques, comme le montre l'exemple de Ris-Orangis : bien que coûteuses, ces analyses sont nécessaires pour permettre une refonctionnalisation qualitative.

« La réglementation évolue pour encourager la préservation des sols, mais elle reste ancrée dans une logique comptable, se concentrant davantage sur la désartificialisation plutôt que sur la santé et les fonctions des sols. »

Les projets sur L'Île-Saint-Denis illustrent la manière dont les contraintes réglementaires et les réalités environnementales peuvent être transformées en opportunités : la coopération entre les élus, les habitants, les salariés en parcours et les chercheurs est au cœur de cette réussite pour adapter les pratiques aux réalités locales.

En définitive, les différents acteurs de la table ronde rappellent que les actions doivent d'abord se concentrer sur la préservation des sols naturels, et développer des indicateurs de naturalité et de fonctionnalité des sols. Ces indicateurs permettront de mieux comprendre et conserver les processus écologiques inhérents aux sols, évitant ainsi de les réduire uniquement à leurs fonctions utilitaires.







Enjeu en débat :  
comment  
refonctionnaliser les  
sols?



CONCLUSION



**Les sols urbains sont fragilisés et dégradés par des processus d'artificialisation : imperméabilisation, perte de biodiversité, pollution, compaction, érosion ... Cette dégradation est irréversible : la formation d'un sol d'un mètre de profondeur prend entre 10 000 et 100 000 ans dans nos climats tempérés.**

**Cette première journée d'étude de la Chaire Transition foncière s'est attachée à décrire les conditions techniques, pratiques et socio-économiques de la « renaturation » des sols. La sémantique du terme renaturation a été interrogée : il s'agit ici de la comprendre comme une refonctionnalisation des sols, et non comme un retour à un écosystème d'origine.**

**Les fonctions des sols ont donc constitué le cœur des débats. S'il n'est pas possible de restaurer des sols d'origine, dans tout leur degré de complexité, il existe des méthodes pour contrer les effets négatifs de l'urbanisation et de l'anthropisation des sols, en restituant ou en améliorant certaines de leurs fonctionnalités : infiltration de l'eau, fertilité, réservoir de biodiversité, stockage de carbone, etc. Des techniques de construction de sols sont développées, en mobilisant notamment des déchets, produits et sous-produits urbains,**

**dans une logique d'économie circulaire. Ces matériaux et ces techniques peuvent varier en fonction de la finalité et de l'usage de ces sols construits, mais la recherche en la matière n'en est qu'à ses débuts : il existe notamment peu de données sur les méthodes de construction de sols à vocation agricole. Ces sols construits peuvent accueillir de la biodiversité : certains taxons, comme les collemboles, par leur abondance ou leur diversité, peuvent constituer de bons indicateurs de la fonctionnalité de sols urbains, altérés ou reconstruits. La construction de sols peut aussi permettre de diminuer l'exposition aux polluants dans un cadre d'agriculture urbaine.**

**Alors que de nombreux aménagements d'espaces plantés reposent sur l'importation de terres végétales, les flux de matières destinées aux projets de renaturation se circularisent de plus en plus, favorisant des produits issus de la ville, ou conservant au maximum les sols en place, hérités. Ces nouvelles circulations font écho à une évolution des représentations des sols chez les acteurs de la gestion des sols : d'un sol « matériau » à un sol « écosystème ». La confrontation des représentations des sols entre praticiens (acteurs de l'aménagement, jardiniers, riverains) et scientifiques dans le cadre de projets**



**de recherche participative contribue d'ailleurs à construire des connaissances scientifiques plus adaptées aux conditions et aux besoins du terrain.**

**La mise en œuvre opérationnelle de projets de renaturation doit s'appuyer sur le transfert des connaissances scientifiques en pédologie, écologie des sols, agronomie ... mais aussi en économie : les coûts de la restauration des sols restent difficiles à quantifier. En adoptant une démarche divisant le processus de restauration en dix étapes techniques, des coûts médians très variables peuvent être estimés : entre 30€ et 250€/m<sup>2</sup>.**

**Si la renaturation peut être pensée à l'échelle du profil de sol, elle fait aussi l'objet de discours et de représentations à des échelles plus large : la ville, le SCoT, le bassin versant, la région ... La planification de la renaturation sur un territoire s'appuie en effet sur des outils existants en matière de politiques environnementales, des trames vertes et bleues aux pratiques de réduction du risque d'inondation sur des bassins versants. La prochaine journée d'études de la Chaire, qui se tient le 12 décembre 2024, est donc dédiée aux enjeux territoriaux de la renaturation, explorant les articulations entre restauration des sols, continuités écologiques, et outils de planification.**

*Par l'équipe de la Chaire Transition foncière*





# BIBLIOGRAPHIE

Anthony M. A., Bender S. F., et Van Der Heijden M. G. A. *Enumerating soil biodiversity*, in Proceedings Of The National Academy Of Sciences, 120(33), 2023. <https://doi.org/10.1073/pnas.2304663120>

Aronson J., Floret C., Le Floc'h E., Ovalle C., et Pontanier, R. *Restauration et réhabilitation des écosystèmes dégradés en zones arides et semi-arides : le vocabulaire et les concepts*, in L'homme peut-il refaire ce qu'il a défait? (p. 11-29), Paris, John Libbey Eurotext, 1995.

Baysse-Lainé A., Cormier L., et Gaulier K. *Gestion des sols et des substrats pour la nature et l'agriculture urbaines à Strasbourg : vers un renouvellement des représentations et des pratiques des circulations de matière ?* in Projets de Paysage, 27, 2022. <https://doi.org/10.4000/paysage.31236>

Béchet B. (coord.), Le Bissonnais Y. (coord.), Ruas A. (coord.), Desrousseaux M. (coord.) et Schmitt, B. (coord) (2017) *Sols artificialisés et processus d'artificialisation des sols, Déterminants, impacts et leviers d'action*, INRA (France), 609 pages.

Blanchart A., Séré G., Cherel J., Warot G., Stas M., Consalès J.-N., Morel J.-L., et Schwartz C. *Towards an operational methodology to optimize ecosystem services provided by urban soils*, in Landscape And Urban Planning, 176, 2018, p. 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2018.03.019>

Bodénan P., Doux H., Béchet B., Cannavo P., Jean-Soro L., Lebeau T., Le Guern C., et Vidal-Beaudet L., 2022. *Le jardinage urbain : le défi de la qualité des sols urbains pour les collectivités*, in Projets de paysage, p. 27. <https://doi.org/10.4000/paysage.31684>

Bonnefond M. et Fournier M. *Maîtrise foncière dans les espaces ruraux. Un défi pour les projets de renaturation des cours d'eau*, in Économie Rurale, 334, 2013, p. 55-68. <https://doi.org/10.4000/economierurale.3908> ;

Boutet D., et Serrano J. *Les sols périurbains, diversification des activités et des valeurs. Quelques éléments de comparaison et d'analyse*, in Économie Rurale, 338, 05-23, 2013. <https://doi.org/10.4000/economierurale.4142>

Cambou, A. *Évaluation du stock et de la stabilité du carbone organique dans les sols urbains [Thèse de doctorat]*. Rennes, Agrocampus Ouest, 2018.

Casagrande D.G. et Vasquez M. Restoring for cultural-ecological sustainability in Arizona and Connecticut. In *Restoration and History: The Search for a Usable Environmental Past (193-207)*, Londres, Routledge Taylor and Francis Group, 2009. <https://doi.org/10.4324/9780203860373>

CDC Biodiversité & Office Français de la Biodiversité (2022), *Renaturer les sols, des solutions pour ménager les territoires*. Castaing J., Monod K., Noreve V. Dossier de la MEB N°42, Mission Economie de la Biodiversité, Paris, France.

Code de l'environnement, articles L.515-1 à L.515-6.

Corlett R. T. *Restoration, Reintroduction, and Rewilding in a Changing World*, in *Trends In Ecology and Evolution*, 31(6), 2016, p. 453-462. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2016.02.017>

Cortet J., Paquet S., Billet P., Bougon N., Calvet C., Charmet J.-F., Chenu C., Gascuel-Oudoux C., Damas O., Desrousseaux M., Monod K., Poinçot F., Raous S., Rigou L., Sarrazin F., et Schwartz C. (2023). *Mieux intégrer les sols dans la séquence « Éviter–Réduire–Compenser. »*, in *Étude et Gestion des Sols*, 30, p. 347-363.

Damas O., et Coulon A. *Créer des sols fertiles – du déchet à la végétalisation urbaine*, Paris, Éditions du Moniteur, 2016.

Decaëns T., Jiménez J., Gioia C., Measey G., et Lavelle P. (2006). *The values of soil animals for conservation biology*, in *European Journal Of Soil Biology*, 42, S23-S38. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2006.07.001>

Décret n° 2023-1096 du 27 novembre 2023 relatif à l'évaluation et au suivi de l'artificialisation des sols (2023).

Dentzer J., Ramière T., Garnier G., Carlier J., De Lille L. C., Delefosse C., Deschamps J., Mercier S., Partouche N., Torres A. C., Varin H., et Zuliani L. *Les sols créateurs de paysages à l'extrémité aval de l'île Saint-Denis*, in *Projets de Paysage*, 2022, p. 27. <https://doi.org/10.4000/paysage.31970>

Ducommun C., Duvigneau C., et Vidal-Beaudet, L. (2023). *Cartographie des sols urbains : Méthode de caractérisation d'une couverture pédologique soumise à différentes formes de dénaturation et d'anthroposolisation*, in *Étude et Gestion des Sols*, 30, p. 127-143.

Feger C., Levrel H., et Rambaud A. *Trois méthodes comptables complémentaires pour mettre les problèmes écologiques au cœur de la chose*

publique. In Revue Française d'Administration Publique, N° 183(3), 2023, p. 815-829. <https://doi.org/10.3917/rfap.183.0174>

Fernandez M., Blanquart C., et Verdeil É. (2018). *La terre et le béton : le projet d'urbanisme considéré sous l'angle du métabolisme territorial*. In Vertigo, Volume 18 Numéro 3, 2018. <https://doi.org/10.4000/vertigo.23302>

Fosse J., Belaunde J., Dégremont M., Grémillet A. *Objectif « Zéro artificialisation nette » : quels leviers pour protéger les sols ?* Rapport de France Stratégie, au ministre de la Transition écologique et solidaire, au ministre de la Cohésion des territoires et des Relations avec les collectivités territoriales et au ministre chargé de la Ville et du Logement, 2019.

Gann G. D., McDonald T., Walder B., Aronson J., Nelson C. R., Jonson J., Hallett J. G., Eisenberg C., Guariguata M.R., Liu J., Hua F., Echeverría C., Gonzales E., Shaw N., Decler K., et Dixon K. W. (2019). *International principles and standards for the practice of ecological restoration*, Second edition, Restoration Ecology, p. 27(S1). <https://doi.org/10.1111/rec.13035>

Gerwing T. G., Hawkes, V. C., Gann, G. D., et Murphy, S. D. (2021). *Restoration, reclamation, and rehabilitation* : on the need for, and positing a definition of, ecological reclamation, in Restoration Ecology, 30(7). <https://doi.org/10.1111/rec.13461>

Gonon M., Surun C., et Levrel H. *Limiter l'artificialisation des sols pour éviter une dette écologique se chiffrant en dizaines de milliards d'euros*, In The Conversation, 2021.

Guilland C., Maron P., Damas O., et Ranjard L. *Biodiversity of urban soils for sustainable cities*, in Environmental Chemistry Letters, 16(4), 2018b, p. 1267-1282. <https://doi.org/10.1007/s10311-018-0751-6>

Hedde M., Nahmani J., Séré G., Auclerc A., et Cortet J. *Early colonization of constructed Technosols by macro-invertebrates*, in Journal Of Soils And Sediments, 19(8), 2018, p. 3193-3203. <https://doi.org/10.1007/s11368-018-2142-9>

Joimel S., Schwartz C., Hedde M., Kiyota S., Krogh P. H., Nahmani J., Peres G., Vergnes A., et Cortet J. *Urban and industrial land uses have a higher soil biological quality than expected from physicochemical quality*, in The Science Of The Total Environment, 584-585, 2017, p. 614-621. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.01.086>

Joimel S., Jules A., et Gonod L. V. *Collembola dispersion, selection, and biological interactions in urban ecosystems: a review*, in Environmental Chemistry Letters, 20(3), 2022, p. 2123-2133. <https://doi.org/10.1007/s10311-022-01406-z>



Juerges N., et Hansjürgens B. *Soil governance in the transition towards a sustainable bioeconomy – A review*. In *Journal Of Cleaner Production*, 170, 2018, p. 1628-1639. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.10.143>

Loi n° 2021-1104 du 22 août 2021 portant lutte contre le dérèglement climatique et renforcement de la résilience face à ses effets (2021).

Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des Territoires (2023). *Zéro Artificialisation Nette, Guide synthétique*, version 27/11/2023.

Pavao-Zuckerman M. A. *The Nature of Urban Soils and Their Role in Ecological Restoration in Cities*, in *Restoration Ecology*, 16(4), 2008, p. 642-649. <https://doi.org/10.1111/j.1526-100x.2008.00486.x>

Ramade F. *Dictionnaire encyclopédique de l'écologie et des sciences de l'environnement*, 2e édition, Paris, Dunod, 2002.

Ravot C., Laslier M., Hubert-Moy L., Dufour S., Le Cœur D., et Bernez I. *Apports d'une observation précoce de la végétation spontanée pionnière pour la renaturation des rives de la rivière Sélune*, in *Sciences Eaux & Territoires*, (Articles hors-série 2020), p. 1–9, 2020. <https://doi.org/10.14758/SET-REVUE.2020.HS.02>

Salin M., Claron C., Nguyen–Rabot E., Mondolfo N., et Levrel H. *Les coûts de la restauration des sols urbains*, in *CIRE Working Papers n°2024-96-FR*, 2024.

Santorufu L., Joimel S., Auclerc A., Deremiens J., Grisard G., Hedde M., Nahmani J., Pernin C., et Cortet J. *Early colonization of constructed technosol by microarthropods*, in *Ecological Engineering*, 162, 2021, 106174. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2021.106174>

Sarabi S., Frantzeskaki N., Waldenberger J., Alvarado O., Raaimakers D., Runhaar H., Stijnen C., Toxopeus H., et Vrinceanu, E. (2023). *Renaturing cities : from utopias to contested realities and futures*, in *Urban Forestry & Urban Greening*, p. 86, 127999. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2023.127999>.

Schwartz C., Cortet J., Laurent F., Morel J.-L., et Séré, G. *La refonctionnalisation écologique des sols par la revégétalisation : une autre manière d'utiliser le végétal*, in *Phytotechnologies appliquées aux sites pollués*, 2012, 115 pages.

Science for Environment Policy, *No net land take by 2050? Future Brief 14*. Produced for the European Commission DG Environment by the Science Communication Unit, UWE, Bristol, 2016.

Séré G. *Fonctionnement et évolution pédogénétique de Technosols issus d'un procédé de construction de sol* [Mémoire de Thèse de doctorat en Sciences Agronomiques]. Institut national polytechnique de Lorraine, 2007.

Vieillard C., Vidal-Beaudet L., Dagois R., et Ouvrard S. *Desealing soils to promote ecosystem services: an in situ experimental device*, in II International Symposium on Greener Cities: Improving Ecosystem Services in a Climate-Changing World (GreenCities2022). IHC2022 31st International Horticultural Congress, 14-22 August 2022, Acta Horticulturae, à paraître.

Vieillard, C. *Désimperméabilisation des sols urbains : état des lieux des pratiques et mises en œuvre de génie pédologique pour restaurer des services écosystémiques* [Thèse de doctorat]. Institut Agro Rennes-Angers, 2024.

Vieillard C., Vidal-Beaudet L., Dagois R., Lothode M., Vade pied F., Gontier M., Schwartz C., et Ouvrard S. *Impacts of soil de-sealing practices on urban land-uses, soil functions and ecosystem services in French cities in Geoderma Regional*, e00854, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.geoder.2024.e00854>

# INDEX DES FIGURES

- [Figure 1]** Sol scellé présent sous la surface imperméabilisée d'un trottoir et accueillant des réseaux mais servant aussi de « poubelle » le temps de l'ouverture de la tranchée pour des travaux (Nantes) (© Béatrice Béchet).
- [Figure 2]** Différents termes utilisés dans le contexte de la renaturation et de la restauration (© Lukas Madl).
- [Figure 3]** Les collemboles (mésosofaune du sol c.-à-d. inférieur à 2 mm) jouent un rôle dans la dégradation de la matière organique dans les sols (© S. Felin, S. Joimel).
- [Figure 4]** Illustrations des différentes formes d'espaces de nature en ville ; a. Le toit potager de Suzanne Lenglen à Paris, mis en place et exploité par Culture en Ville (2023) (© Gilles Arbwick) ; b. Le jardin familial de Montolivet à Marseille – sol recréé à base de terre végétale (2012) (© Sophie Joimel) ; c. Toit potager expérimental d'AgroParisTech, Paris (2017) (© Baptiste Gard).
- [Figure 5]** Un profil de sol scellé (© Programme DESSERT).
- [Figure 6]** Images de travaux de descellement et de décompaction (© Wagon Lansdcaping).
- [Figure 7]** Les types d'usage de 57 projets de désimperméabilisation sur le territoire métropolitain français avant et après descellement (Vieillard et al., 2024).
- [Figure 8]** Démarche de construction de sol (Séré, 2007).
- [Figure 9]** Exemple de profils de sols construits idéaux pour une variété d'usages et de situations (Séré, 2007).
- [Figure 10]** Référentiel régional pédologique de Basse-Normandie (Patrick Le Gouée, 2016).
- [Figure 11]** Principales caractéristiques des cas d'étude (Adrien Baysse-Lainé, Laure Cormier, et Kévin Gaulier, 2022).



- [Figure 12] Bacs à compost Compostra au jardin de l'arrosoir (© Kevin Gaulier).
- [Figure 13] Principales circulations de terre, autres substrats ou amendements rapportés par les enquêtés (Adrien Baysse-Lainé, Laure Cormier, et Kévin Gaulier, 2022).
- [Figure 14] Teneurs en éléments traces métalliques (Cu, Zn, Hg, Pb) pour les sols des 4 sites expérimentaux du projet IPAUP (© Projet IPAUP-93).
- [Figure 15] Plantation minutieuse des légumes en respectant un patron de disposition conçu avec les jardiniers (© Projet IPAUP-93).
- [Figure 16] Les différentes étapes de la restauration des sols (Salin *et al.*, 2024).
- [Figure 17] Itinéraires de restauration types (Salin *et al.*, 2024).
- [Figure 18] Dans le cadre du projet de recherche RESTAUR'SOL, mise en œuvre du protocole de coupe et de prélèvement de la biomasse aérienne végétale par les salariés en parcours d'Halage et les chercheurs de l'IRD (© Halage/Stéphanie Herbé).

## CRÉDITS DES IMAGES

**Première de couverture** Adèle Pereira, Martin Schricke, à la façon d'Eva Le Roi

**Photo d'ouverture** Institut de la Transition foncière

**Préface** Gilles Raynaldy, Ensa Paris-Est

**Édito** Institut de la Transition foncière

**Quelques définitions** Mathieu Delorme

**Techniques et pratiques** Stéphanie Herbé

**Échelles spatiales** Gilles Raynaldy, Ensa Paris-Est

**Acteurs et représentations** Gilles Raynaldy, Ensa Paris-Est

**Des recherches à la pratique** Stéphanie Herbé

**Conclusion** Institut de la Transition foncière

# Restaurer les fonctions des sols ?

## Approches scientifiques et perspectives interdisciplinaires

Cette publication donne suite à la journée d'études du 21 mars 2024 organisée par la Chaire Transition foncière, à l'Ensa Paris-Est. La Chaire Transition foncière est un projet partenarial de recherche soutenu par l'Institut de la Transition foncière, la Fondation Université Gustave Eiffel, l'Institut pour la recherche de la Caisse des Dépôts et Consignations, AREP et Nhood. Elle bénéficie de l'appui scientifique de l'Ecole nationale supérieure d'architecture de Paris-Est et de l'Ecole des Ingénieurs de la Ville de Paris.

**Direction scientifique** Mathieu Delorme, Youssef Diab

**Coordination éditoriale** Zoé Raimbault

**Auteurs et intervenants de la journée d'étude** Adrien Baysse-Lainé, Béatrice Béchet, Philippe Branchu, Camille Brussier, Charles Claron, Laure Cormier, Mathieu Fernandez, Stéphanie Herbé, Sophie Joimel, Patrick Le Gouée, Lukas Madl, Germain Meulemans, David Montagne, Henri Robain, Mathilde Salin, Geoffroy Séré, Laure Vidal-Beaudet  
Pour chaque article, les noms des auteurs sont mentionnés par ordre alphabétique.

**Conception graphique** Mélanie Piat

**Impression** Novembre 2024 à l'Ensa Paris-Est (12 avenue Blaise Pascal, 77420 Champs-sur-Marne)

© Chaire Transition foncière





**Peut-on réparer un sol dégradé ? Comment améliorer son niveau de fonctionnalité écologique ? Quels matériaux sont à disposition pour reconstruire un sol ? Peut-on évaluer le coût de la restauration des sols ? Comment les jardiniers en agriculture urbaine peuvent-ils s'appropriier ces techniques ? Ces différentes questions figuraient à l'agenda de la première journée d'étude de la Chaire Transition foncière du 21 mars 2024, consacrée à la restauration des fonctions des sols. Écologues, pédologues, urbanistes, géographes, anthropologues et économistes ont croisé leurs expertises et leurs objets d'étude pour partager l'état des recherches scientifiques en la matière. Cette publication dresse le compte-rendu de l'ensemble des interventions scientifiques, échanges et débats qui ont rythmé cette journée.**