

Questionner le concept de santé des sols à travers le prisme des sols urbains

M. Clesse^(1*), G. Libessart⁽²⁾, H. Huot⁽³⁾, J. L. Morel⁽¹⁾, C. Schwartz⁽¹⁾ et G. Séré⁽¹⁾

1) Université de Lorraine, INRAE, LSE, F-54000, Nancy, France

2) Cerema Est, Île du Saulcy, Bâtiment C, 57045 Metz Cedex 01, France

3) IRD, CNRS, Sorbonne Université, Univ. Paris Est Créteil, INRAE – Institut d'Ecologie et de Sciences de l'Environnement de Paris (iEES-Paris), F-75005, Paris, France

* Auteur correspondant : margaux.clesse@univ-lorraine.fr

RÉSUMÉ

Bien que le concept de santé des sols connaisse des développements et un intérêt scientifiques croissants, son périmètre et son applicabilité restent encore flous malgré de récents efforts de définition. Si ce concept a trouvé son origine dans l'étude des sols agricoles, les enjeux environnementaux majeurs inhérents aux sols urbains ainsi que les fréquentes dégradations auxquels ils sont exposés justifient pleinement la considération de leur santé. Dans ce contexte, considérer les sols urbains comme une véritable ressource impose de revisiter et d'adapter le concept de santé des sols à leurs spécificités (e.g., grande diversité typologique, changements d'usages et de gestions brutaux et fréquents).

Dans cet article, nous proposons de définir la santé d'un sol par la comparaison entre, d'une part, son état fonctionnel de référence, défini par ses caractéristiques pédogénétiques ou « genoform » et son état fonctionnel actuel, résultant aussi bien de ses usages passés ou présents, de ses modes de gestion et de ses divers facteurs environnementaux ou « phenoform ». En contexte urbain, les changements d'usages, mais aussi les modifications des modes de gestion ou certaines pratiques peuvent significativement dégrader l'état fonctionnel actuel des sols urbains, même si certaines pratiques vertueuses peuvent aussi conduire à améliorer significativement leur fonctionnement. Par ailleurs, l'identification de l'état fonctionnel de référence est une étape complexe, d'autant plus en milieu urbain, où des transformations intenses et soudaines (e.g., excavations, dépôt de matériaux exogènes) peuvent modifier drastiquement les caractéristiques pédogénétiques et donc rompre le lien entre le sol et sa

Comment citer cet article :

Clesse M., Libessart G., Huot H., Morel J. L., Schwartz C. et Séré G., 2026 - Questionner le concept de santé des sols à travers le prisme des sols urbains, *Étude et Gestion des Sols*, 33, 161-174

typologie initiale de rattachement. Ainsi, il est envisagé que l'état fonctionnel de référence puisse, dans certains contextes et pour répondre à certains objectifs, évoluer dans le temps. L'analyse de la santé des sols à travers le prisme urbain invite à réinterroger ce concept dans son ensemble, tout en ouvrant de nouveaux questionnements et perspectives de recherche.

Mots-clés

Sols urbains, pédogenèse, santé des sols, dynamique temporelle, changements d'usages

SUMMARY

QUESTIONING THE CONCEPT OF SOIL HEALTH THROUGH THE LENS OF URBAN SOILS

Although the concept of soil health is attracting growing interest within the scientific community, its scope and applicability remain unclear despite recent efforts to define it. While this concept originated in the study of agricultural soils, the major environmental issues inherent in urban soils and the frequent degradation to which they are exposed fully justify consideration of their health. In this context, considering urban soils as a real resource requires revisiting and adapting the concept of soil health to their specific characteristics (e.g., the wide typological diversity and the sudden and frequent changes in use and management).

In this article, we propose to define soil health by comparing its reference functional state, defined by its pedogenetic characteristics or 'genoform', with its current functional state, resulting from both its past and present uses, its management methods and various environmental factors or 'phenoform'. In an urban context, changes in use, but also changes in management methods or certain practices can significantly degrade the current functional state of urban soils, even if certain virtuous practices can also lead to significant improvements in their functioning. Furthermore, identifying the reference functional state is a complex step, especially in urban areas, where intense and sudden transformations (e.g., excavations, deposition of exogenous materials) can drastically alter pedogenetic characteristics and thus break the link between the soil and its initial affiliation typology. Thus, it is envisaged that the reference functional state may, in certain contexts and to meet certain objectives, evolve over time. The analysis of soil health through an urban lens invites us to re-examine this concept as a whole, while opening up new questions and research perspectives.

Key-words

Urban soils, pedogenesis, soil health, temporal dynamics, land-use change

RESUMEN

CUESTIONAR EL CONCEPTO DE SALUD DE LOS SUELOS A TRAVÉS DEL PRISMA DE LOS SUELOS URBANOS

A pesar de que el concepto de salud de los suelos conoce desarrollos e interés científicos, su alcance y su aplicabilidad siguen siendo confusos aunque los recientes esfuerzos para definirlo. Si este concepto tiene su origen en el estudio de los suelos agrícolas, los importantes desafíos ambientales inherentes a los suelos urbanos así como las frecuentes degradaciones a las que están expuestos justifican plenamente la consideración de su salud. En este contexto, considerar los suelos urbanos como un verdadero recurso exige reexaminar y adaptar el concepto de salud de los suelos a sus especificidades (por ejemplo, gran diversidad tipológica, cambios de usos y de gestiones brutales y frecuentes).

En este artículo, proponemos definir la salud de un suelo mediante la comparación entre, por una parte, su estado funcional de referencia, definido por sus características pedogenéticas o "genoform", y su estado funcional actual, resultante tanto de sus usos pasados como presentes, de sus modos de gestión y de sus diversos factores ambientales o "phenoform". En el contexto urbano, los cambios de usos, pero también las modificaciones de los modos de gestión o ciertas prácticas pueden degradar significativamente el estado funcional actual de los suelos urbanos, aunque ciertas prácticas virtuosas pueden también conducir a mejorar significativamente su funcionamiento. Por otra parte, la identificación del estado funcional de referencia es una etapa compleja, aún más en el medio urbano, donde las transformaciones intensas y súbitas (por ejemplo, excavaciones, depósito de materiales exógenos) pueden modificar drásticamente las características pedogenéticas y, por tanto, romper el vínculo entre el suelo y su tipología inicial de vinculación. Así, se considera que el estado funcional de referencia puede, en ciertos contextos y para responder a ciertos objetivos, evolucionar con el tiempo. El análisis de la salud de los suelos a través del prisma urbano invita a reexaminar este concepto en su conjunto, abriendo al mismo tiempo nuevos cuestionamientos y perspectivas de investigación.

Palabras clave

Suelos urbanos, pedogénesis, salud de los suelos, dinámica temporal, cambios de usos

1. INTRODUCTION

1.1. Problématique

Dans un monde en pleine urbanisation, où la pression sur les ressources naturelles ne cesse de s'intensifier, les sols et les fonctions qu'ils assurent sont à la fois de plus en plus menacés mais aussi de plus en plus nécessaires. Face à ce constat, le concept de santé des sols inspire un nombre croissant d'initiatives de protection et de restauration de cette ressource non renouvelable (par exemple la Directive Européenne 2025 relative à la surveillance et à la résilience des sols). Pourtant, ce concept dispose-t-il aujourd'hui d'une définition suffisamment claire pour permettre une évaluation quantitative (Lehmann *et al.*, 2020) ? Peut-on dire qu'un sol est en « bonne santé » simplement parce qu'il fonctionne et rend des services utiles à l'Homme (Cousin *et al.*, 2025) ? Les cadres conceptuels proposés à ce jour rendent-ils compte de la diversité des contextes, notamment en milieu urbain, où les dynamiques du sol diffèrent sensiblement des milieux agricoles, forestiers et naturels ?

Cet article part du postulat que les définitions actuelles (Brevik, 2019 ; Cousin *et al.*, 2025 ; Janzen *et al.*, 2021 ; van den Elsen *et al.*, 2022) ne permettent pas encore de préciser clairement le concept de santé des sols ni comment l'évaluer concrètement. De plus, les définitions existantes sont largement inspirées par les contextes agricoles et forestiers alors que les enjeux d'évaluation de la santé des sols urbains sont tout aussi essentiels. De plus, nous pensons que les spécificités des sols des milieux urbains (i.e. forte diversité de

sols avec des degrés variables d'anthropisation, pédogénèse récente, dynamique temporelle contrainte par les changements d'usages, forte influence des modes de gestion et des pratiques humaines) constituent une opportunité pour questionner et donc préciser ce concept et en proposer une nouvelle définition opérationnelle.

1.2. Enjeux liés aux sols urbains

Actuellement, 56 % de la population mondiale et 93 % des Français vivent en milieu urbain et ces proportions devraient continuer à augmenter dans les années à venir (Véron, 2007 ; de Bellefon *et al.*, 2020). En conséquence, l'artificialisation des territoires et l'étalement urbain, conduisent à la consommation d'espaces naturels, agricoles et forestiers (Figure 1).

L'artificialisation se traduit concrètement par la construction de bâtiments, d'infrastructures de transport et de stationnement, voire l'aménagement d'espaces végétalisés à vocation ornementale. À l'échelle des sols, elle résulte d'un ensemble d'opérations qui amènent fréquemment – mais pas systématiquement – à leur dégradation : mouvements de sols (i.e., arasement, nivellement, excavation, remblaiement, remaniement), scellement en surface ou en profondeur et tassement affectant de larges zones. L'artificialisation conduit aussi au dépôt ou à l'incorporation, dans les sols, de matériaux d'origine pédologique, géologique ou anthropique, mais également à l'implantation de réseaux souterrains et de structures en béton en profondeur. Il en résulte une très forte diversité des sols urbains au sein d'un gradient d'anthropisation (Figure 2).

Les milieux anthropisés et en particulier les zones urbaines, concentrent de nombreux enjeux environnementaux (e.g., qualité de

Figure 1 : Consommation d'espaces naturels, agricoles et forestiers au profit des espaces artificialisés en m² à l'échelle de la commune (Portail de l'artificialisation des sols, 2025)

Figure 1: Consumption of natural, agricultural and forestry areas at the benefit of built-up areas in m² at the municipal level (Portail de l'artificialisation des sols, 2025)

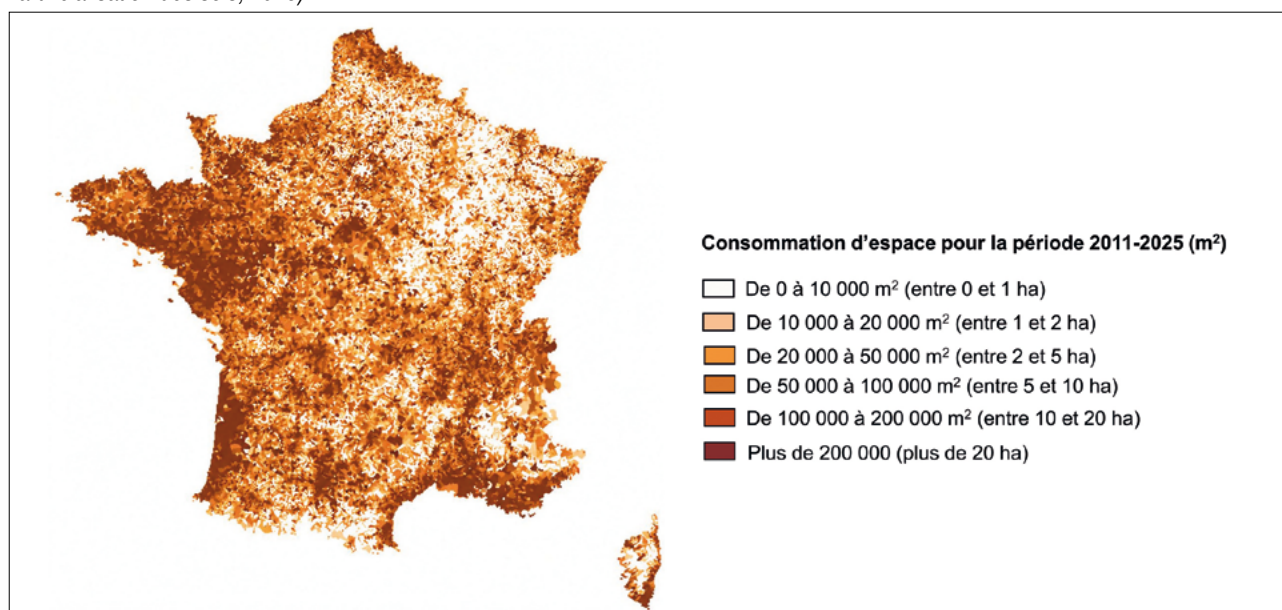
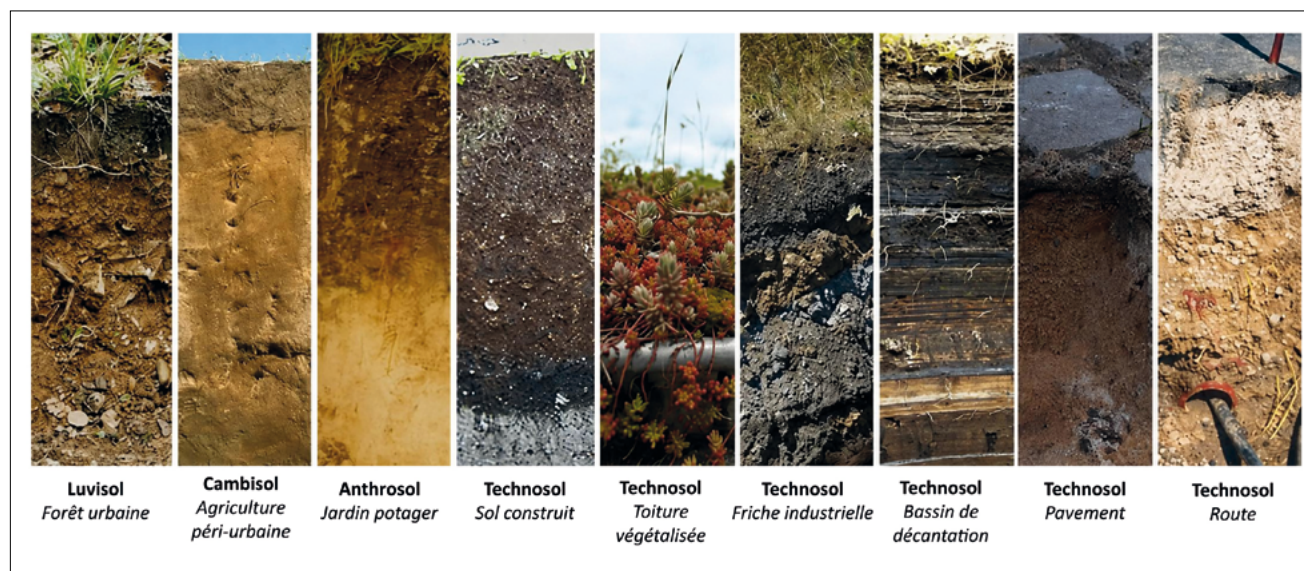


Figure 2 : Gradient d'anthropisation des sols en contexte urbain (photographies Florentin, Huot, Morel, Nehls, Schwartz & Séré) (adapté de Morel et al., 2015)

Figure 2: Anthropisation gradient of soils in the urban context (photographs Florentin, Huot, Morel, Nehls, Schwartz & Séré) (adapted from Morel et al., 2015)



l'air, climat urbain, risque d'inondation, autosuffisance alimentaire, contaminations). Dans un contexte d'expansion urbaine à l'échelle mondiale, ces enjeux locaux s'ajoutent aux enjeux globaux (e.g., adaptation au changement climatique, préservation de la biodiversité) et font des villes l'objet d'approches nexus d'intérêt stratégique (McPhearson et al., 2016 ; Bai et al., 2025).

En réponse à ces enjeux, des sols fonctionnels capables de produire de la biomasse à vocation ornementale voire alimentaire, d'offrir des habitats à la biodiversité, de limiter les risques d'inondation ou encore de réguler les îlots de chaleur urbains sont nécessaires au développement de villes durables. Ils constituent une composante indispensable des solutions à déployer. La place croissante donnée au végétal en ville (Vidal-Beaudet, 2015) a amené à l'émergence du concept de trame brune complétant les trames vertes et bleues. Parallèlement, les dynamiques récentes de désimperméabilisation des sols (Schwartz et al., 2024) témoignent de l'intérêt croissant pour le rôle multifonctionnel des sols urbains. Le succès de ces solutions fondées sur la nature impose d'une part, de pouvoir évaluer la capacité des sols urbains à assurer les fonctions attendues et, d'autre part, de les refunctionaliser en cas de dégradation. Connaître l'impact, négatif ou positif, des activités humaines sur la santé des sols urbains est donc un préalable indispensable pour orienter les modes de gestion capables de répondre aux enjeux des socio-écosystèmes urbains.

2. SANTÉ DES SOLS ET CONCEPTS AFFÉRENTS

2.1. Un détour par la santé humaine...

Pour appréhender le concept de santé des sols, il est utile de faire le parallèle avec le concept originel de santé humaine. Définie par la Constitution de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS), la santé humaine est un « état de complet bien-être physique, mental et social ne consistant pas seulement en une absence de maladie ou d'infirmité ». Les déterminants majeurs de la santé humaine (Lalonde, 1974) sont : i) le patrimoine génétique (facteurs biologiques liés au sexe, à l'âge, à l'hérédité) ; ii) les facteurs socio-économiques (i.e., accès à l'emploi et à l'éducation, accès à des revenus décents, accès à une alimentation saine, à la culture, aux loisirs, aux réseaux familiaux et communautaires) ; iii) les comportements individuels (i.e., habitudes de vie des individus comme les choix de mobilités, habitudes alimentaires, addictions, pratiques sportives, sédentarité) ; iv) les facteurs environnementaux (i.e., état des milieux de vie, exposition aux nuisances, aux pollutions, à des températures extrêmes, qualité du cadre de vie) ; v) le système de soins (i.e., accès et qualité de l'offre de soins).

2.2. ... pour définir la santé des sols

2.2.1. Contexte

Bien que le terme de santé des sols remonte à plus de 100 ans et connaisse un réel succès depuis les années 2000 (Brevik, 2019), son périmètre et son contenu restent intrinsèquement flous. Assez controversé, ce concept anthropomorphique présente l'avantage d'être appropriable par la société dans son ensemble.

Il est notamment utilisé dans la Stratégie de l'Union Européenne (UE) pour la protection des sols à l'horizon 2030 qui indique que : « Plus de 60 % des sols européens sont en mauvaise santé [...]. La perte de ces services écosystémiques essentiels coûte à l'UE au moins 50 milliards d'euros par an », ajoutant encore « Des sols en bonne santé sont essentiels pour atteindre la neutralité climatique, une économie propre et circulaire et enrayer la désertification et la dégradation des terres. Ils sont également essentiels pour inverser la perte de biodiversité, fournir une alimentation saine et préserver la santé humaine. » (European Commission, 2025). Ces éléments de contexte lient alors inextricablement santé des sols et santé humaine.

Ce document de référence donne alors cette définition : « Un sol sain est un sol en bonne santé chimique, biologique et physique et qui est, par conséquent, à même de fournir en permanence le plus grand nombre possible de services écosystémiques ». Tout en reconnaissant l'étape cruciale que représente cette prise de conscience de l'importance des sols, notre communauté scientifique pourrait être tentée, face à ce truisme redondant, de faire sienne cette phrase de Lancaster (2000) à propos de la santé écologique : « *Ecological health is a nebulous concept that should be expunged from the vocabulary* ». Pourtant, le recours à un concept simple, fort et explicite comme l'est la santé des sols apparaît actuellement comme une étape nécessaire pour intégrer d'autres concepts comme « qualité des sols », « services écosystémiques rendus par les sols » ou « sécurité des sols » afin de favoriser une prise en compte réelle des sols dans les arbitrages et les prises de décision.

2.2.2. Des définitions de la santé des sols en évolution

Différentes définitions scientifiques de la santé des sols ont été proposées, certaines étant assez proches de la notion de qualité des sols (Cousin *et al.*, 2025). Une première définition, sélectionnée ici, propose une vision très globale du concept : « capacité d'un sol à fonctionner, à un temps donné, comme un système vivant vital – dans les limites d'un écosystème naturel ou géré par l'Homme et de ses modalités d'usages – à maintenir la productivité et la santé des plantes et des animaux, à maintenir ou à améliorer la qualité de l'eau et de l'air et à fournir davantage de services écosystémiques à long terme sans compromis (accrus) entre les services écosystémiques » (Karlen *et al.*, 1997 ; Doran et Zeiss, 2000 ; van den Elsen *et al.*, 2022). Cette définition exprime clairement les contributions essentielles des sols pour l'Homme, à travers les services écosystémiques rendus. Elle se heurte cependant à deux écueils : i) la difficulté de traduire celle-ci

de manière opérationnelle, autrement dit, comment concrètement estimer ici la santé d'un sol ? ; ii) l'absence de prise en compte de la diversité intrinsèque des sols qui se traduit par des niveaux très variés de fonctionnalités d'un type de sol à l'autre.

Depuis les années 1990, des auteurs s'efforcent de dissocier les concepts de qualité et de santé des sols tout en intégrant la nature des sols (Cousin *et al.*, 2025). La qualité du sol peut ainsi être associée à ce qu'est le sol ou ce qu'il fait et se base largement sur la capacité à rattacher un sol à un type selon un système de classement. La santé d'un sol renvoie, quant à elle, à un jugement sur ce que le sol vaut ou ce qu'il devrait être. De manière plus précise, il est proposé de considérer « la qualité en fonction d'un type de sol donné (par ex. des Luvisols dégradés) [...] cette évaluation permet de qualifier une gamme des possibles pour un type de sol, c'est-à-dire un potentiel. La santé d'un sol, en un lieu donné, est évaluée en comparant les valeurs réelles à celles des valeurs potentielles du type auquel il appartient [...] le degré de réalisation de cette performance, compte tenu des usages choisis et des pratiques mises en œuvre, est désigné par « santé » » (Cousin *et al.*, 2025). Cette définition a permis de clarifier plusieurs éléments essentiels. En premier lieu se trouve la prise en compte des spécificités inhérentes à chaque type de sol, par l'introduction d'un état de référence, ici appelé « qualité » et évoquant la notion de niveau potentiel de performance. En second lieu, les auteurs ont mis en avant l'idée d'évaluer l'écart entre ce niveau potentiel et le niveau réel appelé « santé », reflétant notamment l'impact des modes de gestion et des pratiques.

2.2.3. Déterminants de la santé des sols

Pour filer la métaphore avec la santé humaine, nous proposons de reconnaître un certain nombre de déterminants de la **santé des sols** (Figure 3).

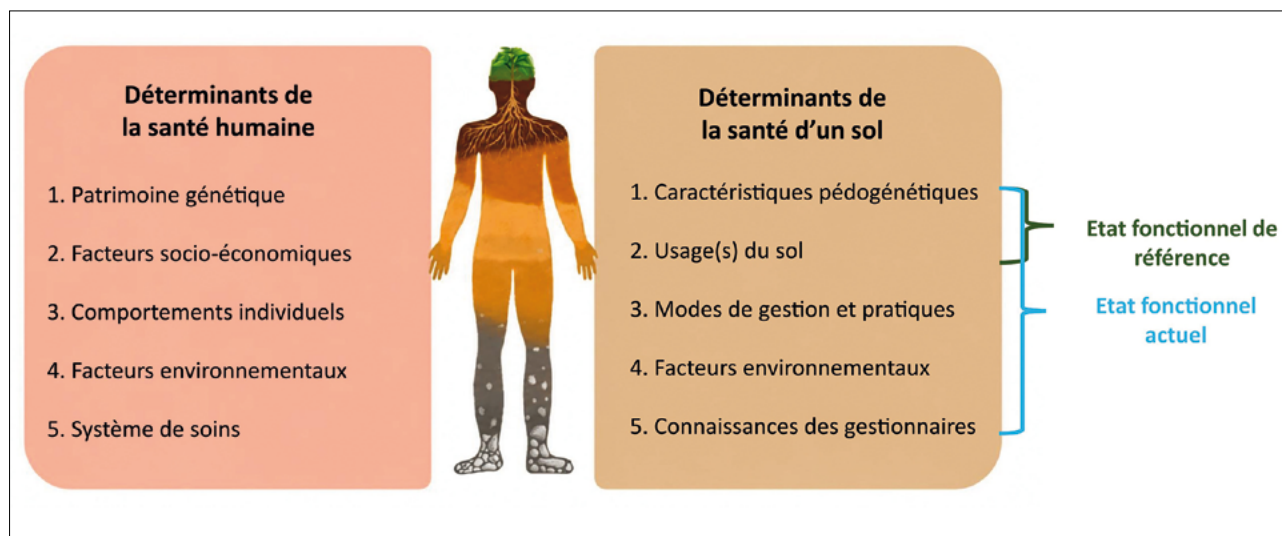
En premier lieu, il est évident que les facteurs de pédogenèse (i.e., nature du matériau parental, âge du sol, conditions climatiques, topographie, activité biologique) sont décisifs pour déterminer les caractéristiques pédogénétiques du sol (e.g., organisation du sol en horizons, composition, texture, traits rédoxiques), qui conditionnent sa capacité à fonctionner. Ces facteurs de pédogenèse pourraient ainsi être comparés au **patrimoine génétique** en santé humaine, qui conditionnent les caractéristiques pédogénétiques, considérées comme évoluant lentement et servent à rattacher le sol à une typologie selon un système de classification.

Toujours par analogie avec la santé humaine, les **facteurs socio-économiques** peuvent être assimilés à l'usage que l'Homme fait du sol. L'**usage du sol** se rapporte à la gestion anthropique des différents types d'occupation des sols (Corgne, 2016), cette dernière faisant référence à une observation purement physique de la surface terrestre (Di Gregorio et Jansen, 1998). Ainsi, une surface bâtie peut, par exemple, abriter une zone industrielle ou une zone résidentielle.

Par la suite, les **comportements individuels** pourraient être assimilés aux **pratiques** et aux **modes de gestion** appliqués au sol. Les pratiques sont des opérations anthropiques appliquées au sol, qui modifient ainsi ses propriétés. Elles peuvent être cycliques,

Figure 3 : Comparaison entre les déterminants de la santé humaine et les déterminants de la santé des sols (illustration adaptée de Fausak et al., 2024)

Figure 3: Comparison between determinants of human health and determinants of soil health (illustration adapted from Fausak et al., 2024)



répétitives (e.g., apport d'amendements organiques, tontes, travail du sol) ou ponctuelles (e.g., drainage, excavation, tassement, apport de remblais, imperméabilisation) (Thenail et Baudry, 2001 ; Libessart, 2022). Les modes de gestion des sols sont moins clairement définis dans la littérature. Nous proposons de les définir ici comme une vision réfléchie de la manière de gérer le sol qui conditionne le choix, l'intensité et la fréquence des pratiques. Des exemples de modes de gestion appliqués en contexte urbain et péri-urbain sont : le plan zéro-phyto dans les espaces verts, la permaculture en agriculture urbaine, ou l'ensemble de mesures en faveur de la biodiversité. Les modes de gestion et les pratiques sont alors souvent très liés à l'usage du sol.

Les **facteurs environnementaux** peuvent s'entendre de manière très similaire à ceux considérés pour la santé humaine (e.g., état des milieux de vie ; exposition aux nuisances, aux pollutions, à des températures extrêmes). Enfin, le **système de soins** pourrait être assimilé aux **connaissances** que les gestionnaires des sols mettent au service de la préservation ou à la restauration de leurs sols (e.g., pratiques agro-écologiques, génie écologique, génie pédologique, traitement des sols pollués, phytomanagement).

2.2.4. Définition de l'état fonctionnel de référence d'un sol

L'évaluation de la santé des sols pose la question de la référence à adopter pour comparer la santé du sol étudié et se heurte à l'absence de référence universelle permettant de comparer la santé de différents types de sols (Cousin et al., 2025). La diversité des sols s'exprime par des capacités très différentes d'un sol à l'autre, en termes de capacité de stockage de carbone, d'accueil de la biodiversité ou bien encore d'infiltration et de rétention en eau. En

effet, un Calcisol et un Podzisol ont des capacités très différentes en termes de niveaux de fonctions ou de services écosystémiques. Dans leur définition de « potentiel », Cousin et al. (2025) battent en brèche l'idée d'une référence universelle et proposent soit de considérer « le niveau de performance moyen observé soit dans l'ensemble des sols comparables, soit sur un territoire d'étude », soit un état fonctionnel de référence temporel faisant appel à des études synchroniques. La directive européenne (UE 2025/2360) évoque quant à elle une catégorisation basée sur des « districts de sols » et « d'unités de sols » qui doivent refléter une certaine homogénéité des caractéristiques du sol (type de sol, usages, conditions locales et climatiques). Enfin, Schram et al. (2024) proposent d'évaluer l'état de santé des sols en comparant des mesures de santé du sol avec des sols de référence dans la même catégorie (même type pédoclimatique ou d'usage). Dans la plupart des exemples cités, la catégorisation utilisée pour définir une référence comparable est basée sur la typologie de sol souvent couplée à l'usage ou à d'autres paramètres (e.g. conditions climatiques). Dans la synthèse du rapport scientifique de l'étude (Cousin et al., 2025), les auteurs - même s'ils ne le formulent pas explicitement de cette manière - suggèrent dans leur représentation graphique que la qualité ou le potentiel du sol (deux termes jugés synonymes) constituerait un niveau théorique que l'état fonctionnel actuel du sol ne pourrait jamais dépasser, même s'il était géré de manière optimale. Pourtant, ces mêmes auteurs précisent par ailleurs que : « En pratique, ce potentiel est généralement considéré comme étant le niveau de performance moyen observé soit dans l'ensemble des sols comparables, soit sur un territoire d'étude. Nous suggérons alors que, si le potentiel reflète le niveau moyen de performances de sols comparables, il est à prévoir que certains sols dépassent ce potentiel et invalident de fait la logique du cadre conceptuel ainsi

créé. Il est également à noter que ces cadres conceptuels ont été pensés essentiellement dans des contextes agricoles, voire forestiers où il s'agirait d'évaluer les impacts négatifs - voire positifs - de pratiques (e.g., sur-fertilisation, tassement, utilisation de produits phytosanitaires) qui ne modifieraient pas ce que les auteurs appellent les propriétés pérennes du sol (Cousin *et al.*, 2025). En conséquence, nous proposons de substituer les concepts de « qualité du sol » ou de « potentiel », proposés par Cousin *et al.* (2025), par celui d'« état fonctionnel de référence ».

Nous suggérons ici, très concrètement, que l'état fonctionnel de référence soit défini uniquement par la typologie du sol, déterminée par les caractéristiques pédogénétiques du sol. Il correspondrait au concept de « genoform » tel qu'initié par Droogers et Bouma (1997) puis détaillé par Rossiter et Bouma (2018). Il est également nommé « capital naturel » par Dominati *et al.* (2010). De manière opérationnelle, pour chaque sol, en croisant la connaissance de son contexte pédoclimatique, géologique, biologique et topographique et l'étude de ses caractéristiques, il est possible de le rattacher à une typologie de sol (Référentiel Pédologique, 2008). L'état fonctionnel de référence se constituerait en deux étapes. La première vise à recueillir les valeurs médianes des propriétés bio-physico-chimiques de cette typologie (voire de la référence), à un grain permettant de définir un sol représentatif de cette typologie (e.g., « Luvisol typique ») sans prise en compte des usages anthropiques. Elle pourrait être réalisée en s'appuyant sur les connaissances abondantes et précises acquises en France, en particulier par le Gis Sol. La seconde étape consiste en la traduction de ces propriétés en niveaux de fonctions rendues par

ces sols. Bien que majoritairement en cours de développement, un nombre croissant d'outils permet aujourd'hui ce type d'évaluation (e.g., Artisol, Destisol, MUSE, SUPRA) (Branchu *et al.*, 2022 ; Chereil *et al.*, 2017 ; Rabot *et al.*, 2022 ; Schwartz *et al.*, 2022) avec un choix d'indicateurs qui leur sont propres. Ainsi, l'évaluation de l'état fonctionnel de référence et actuel dépendra du modèle considéré.

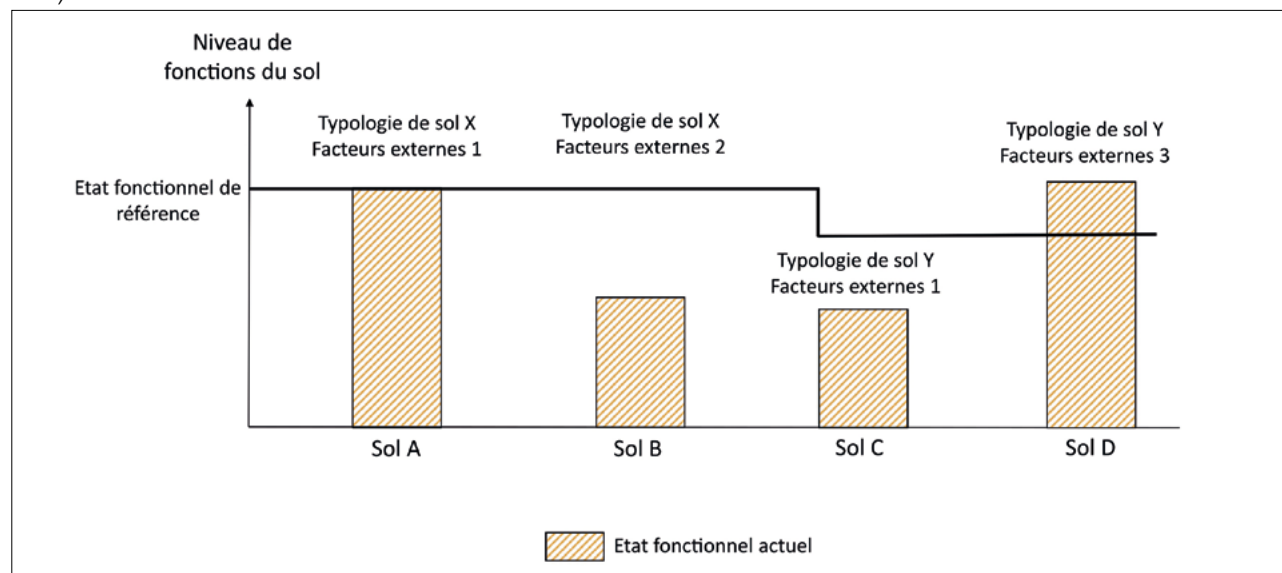
2.2.5. Évaluation de l'état fonctionnel actuel d'un sol

L'état fonctionnel de référence d'un sol serait alors comparé à son **état fonctionnel actuel**, dont l'évaluation nécessiterait un diagnostic pédologique dont la précision dépendrait bien sûr du modèle choisi et des indicateurs qu'il requiert. L'échelle de travail resterait à préciser selon les objectifs de l'étude, permettant l'acquisition des valeurs réelles à un temps *t* des propriétés bio-physico-chimiques du sol. Ces valeurs réelles seraient ensuite traduites en termes de niveaux de fonctions rendues.

Dans cette proposition, la différence entre le niveau de fonctions de l'état fonctionnel de référence et de l'état fonctionnel actuel d'un sol dépendrait théoriquement des autres déterminants de la santé, appelés ici « facteurs externes » (i.e., usage du sol, modes de gestion et pratiques, facteurs environnementaux et connaissances des gestionnaires) liés à l'environnement et à la gestion du sol (*Figure 4*). Il est à noter que, dans cette proposition, le niveau évalué de l'état fonctionnel actuel peut donc dépasser celui de l'état fonctionnel de référence selon la nature des facteurs externes.

Figure 4 : Schéma illustrant le concept d'état fonctionnel de référence défini par la typologie de sol et d'état fonctionnel actuel défini par des facteurs externes (i.e., usages du sol, modes de gestion, facteurs environnementaux et connaissances des gestionnaires) (adapté de Cousin *et al.*, 2025)

Figure 4: Diagram illustrating the concept of reference functional state defined by soil typology and current functional state defined by external factors (i.e., land uses, management methods, environmental factors and managers' knowledge) (adapted from Cousin *et al.*, 2025)



2.2.6. Cadre de réflexion

Afin de questionner la faisabilité d'une application de l'évaluation de la santé des sols à des sols urbains, nous proposons d'évaluer la santé en se basant sur **la comparaison entre son état fonctionnel de référence - dépendant uniquement de ses caractéristiques pédogénétiques et estimé à partir des valeurs médianes des propriétés de sa typologie de rattachement - et son état fonctionnel actuel - dépendant de ses usages passés et actuel, des modes de gestion et des pratiques qui lui sont appliqués, des facteurs environnementaux et des connaissances de ses gestionnaires et estimé à partir des propriétés mesurées ou estimées** -. La santé du sol serait alors appréciée par l'écart entre les niveaux de fonctions calculés pour l'état fonctionnel de référence et ceux calculés pour l'état fonctionnel actuel. Si cet écart est positif (niveau de fonctions actuel > niveau de fonctions de référence), le sol est alors en meilleure santé ; si cet écart est nul (état fonctionnel actuel = état fonctionnel de référence), le sol a un niveau de santé similaire ; si cet écart est négatif (état fonctionnel actuel < état fonctionnel de référence), le sol a un niveau de santé moindre. (Figure 5).

3. SPÉCIFICITÉS DES SOLS URBAINS ET IMPLICATIONS POUR L'ÉVALUATION DE LEUR SANTÉ

3.1. Déterminants de la santé des sols en contexte urbain

3.1.1. Caractéristiques pédogénétiques des sols urbains

Comme tous les sols, les sols urbains sont le résultat de leur pédogenèse, laquelle peut s'avérer complexe, sous l'influence conjointe de facteurs naturels et anthropiques. Le facteur humain peut d'ailleurs être considéré comme le sixième facteur de pédogenèse (Dudal, 2004). Certains sols urbains subissent des modifications profondes et rapides sous l'influence des activités humaines. Il peut s'agir du décapage partiel ou total du solum initial ou encore de l'apport, volontaire ou non, de matériaux exogènes,

qu'ils soient d'origine géologique, pédologique ou anthropique, sans lien pédogénétique direct avec le matériau parental d'origine (Morel et al., 2023). Ces interventions modifient fréquemment l'état biophysico-chimique des sols urbains ce qui est susceptible d'impacter leur fonctionnement et donc leur santé (Figure 6). Dans ce contexte, l'occupation actuelle du sol additionnée aux trajectoires historiques de changements d'usages, peuvent affecter directement la typologie actuelle des sols et leurs caractéristiques pédologiques (Franck-Néel et al., 2015 ; Libessart et al., 2022). Dans l'exemple étudié par Libessart et al. (2022), un Calcosol est devenu un Anthrosol transformé suite à un usage agricole intensif, puis l'urbanisation a généré un Anthrosol artificiel après troncature du profil et apport de remblais, qui lui-même est devenu un Anthrosol reconstitué après apport de terre végétale en surface pour un aménagement d'espace vert (Figure 6).

Comme le montre cet exemple, la pédogenèse urbaine est contrôlée et rythmée par des interventions humaines d'intensités variables et par les bouleversements qu'elles induisent sur les profils pédologiques. Des modifications profondes et rapides des sols rompant drastiquement avec les dynamiques pédogénétiques initiales peuvent entraîner une nouvelle phase de pédogenèse. Ces sols jeunes peuvent montrer une pédogenèse rapide et atypique favorisée par un fort déséquilibre entre les conditions environnementales et les matériaux parentaux, qu'ils soient naturels ou d'origine anthropique (Leguëdois et al., 2016 ; Séré et al., 2010). Les processus pédogénétiques qui en découlent peuvent être actifs à moyen terme, dès les premières années suivant les perturbations (i.e., décennie), donnant lieu à des modifications des caractéristiques pédogénétiques de certains sols urbains.

Toutefois, cette situation n'est pas généralisable à l'ensemble des sols urbains. En effet, certains sols, localisés dans des secteurs urbains peu ou pas aménagés, ont été très peu perturbés par les activités humaines. Dans ces contextes, le sol a pu conserver une grande partie de ses caractéristiques initiales, proches de celles du sol naturel en place avant l'urbanisation. Ces sols pseudo-naturels, notamment présents dans des interstices urbains comme des friches, des parcs ou des zones non bâties, témoignent d'une pédogenèse plus continue et moins perturbée.

Nous identifions alors deux grandes trajectoires possibles pour les sols en milieu urbain : (i) une continuité avec le patrimoine génétique initial, ou (ii) une rupture totale due à des interventions

Figure 5 : Evaluation du niveau de santé des sols défini comme l'écart entre un état fonctionnel de référence et un état fonctionnel actuel

Figure 5: Assessment of soil health level defined as the difference between a reference functional state and a current functional state

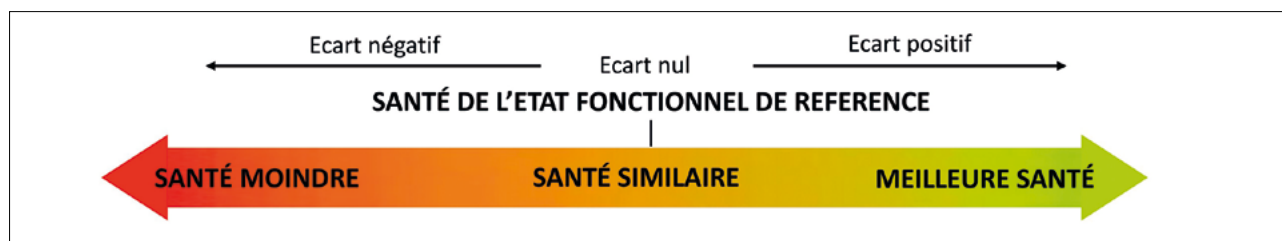
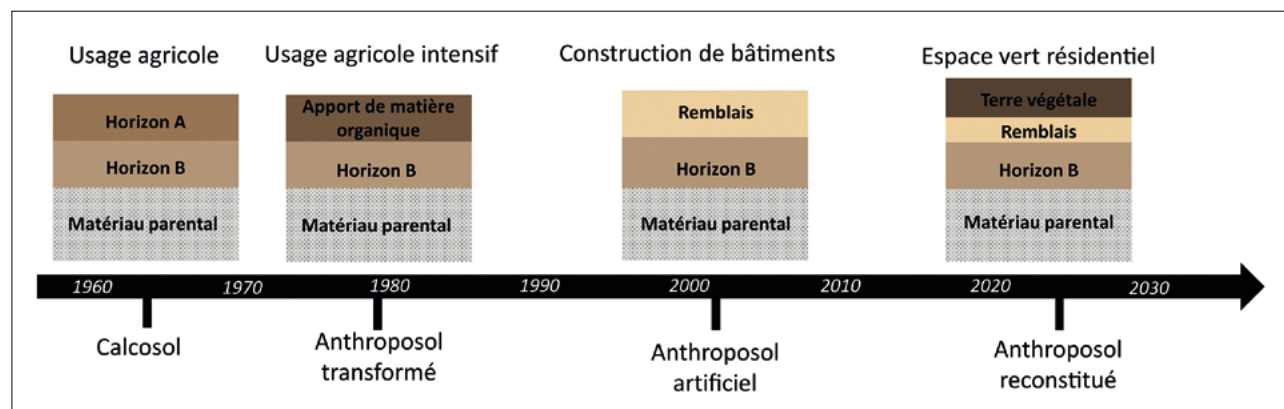


Figure 6 : Anthroposéquence de sols : successions de changements d'usages et de types de sols en milieu urbain (adapté de Libessart *et al.*, 2022)

Figure 6: Soil anthroposequence: succession of changes in land use and soil types in urban areas (adapted from Libessart *et al.*, 2022).



humaines intenses. Contrairement aux idées reçues, si nous ne tenons pas compte des sols imperméabilisés et sous les bâtis, cette seconde configuration n'est pas forcément majoritaire, puisque la proportion de sols très fortement anthropisés reste probablement inférieure à celle des sols faiblement modifiés, proches d'un état pseudo-naturel. Bien sûr, l'intensité du gradient d'anthropisation des sols est très variable selon la localisation dans l'espace urbain, mais aussi plus globalement l'histoire urbaine spécifique à la fois de la ville et du pays considérés.

L'hétérogénéité des sols urbains rend indispensable une lecture fine et contextualisée des trajectoires pédogénétiques afin de répondre au premier enjeu d'identification de la typologie de rattachement pour qualifier l'état fonctionnel de référence.

3.1.2. Modifications des déterminants de la santé sous influence urbaine

En plus de la modification parfois profonde de l'organisation et de la composition des sols urbains, leur fonctionnement actuel dépend fortement de facteurs externes tels que les usages actuels, les pratiques et modes de gestion, ainsi que l'environnement et les connaissances des gestionnaires. Si les successions d'usages passés peuvent façonner l'état initial des sols, ce sont surtout les pratiques actuelles qui conditionnent leur fonctionnement. Ainsi, des interventions comme l'arrosage, la fauche, le recours à des amendements organiques ou encore l'entretien mécanique ou chimique des espaces verts, influencent directement la santé des sols urbains.

Comme présenté précédemment, l'environnement dans lequel évolue un sol constitue un autre paramètre clé. En milieu urbain, les pressions exercées par les activités humaines – telles que la pollution atmosphérique (e.g., dépôts d'éléments traces métalliques ou de composés organiques persistants), la contamination des eaux ou les apports de substances chimiques – peuvent modifier durablement les propriétés des sols (Bielińska *et al.*, 2018). À cela s'ajoutent

les effets du dérèglement climatique, notamment l'augmentation des températures et la multiplication des événements extrêmes (sécheresses, inondations), qui fragilisent la résilience des sols (Marseille *et al.*, 2023). En milieu urbain, ces effets sont exacerbés par les îlots de chaleur et la modification du cycle de l'eau en lien avec l'imperméabilisation des sols et la présence d'infrastructures souterraines (Burghardt, 1994). Ces facteurs environnementaux influencent également la structure des communautés d'organismes vivants et leur développement en milieu urbain.

De plus, il s'avère que le niveau de connaissance des sols dépend très largement du niveau de formation des gestionnaires et de leur sensibilité à la préservation des sols. A large échelle, des avancées politiques et réglementaires peuvent contribuer à modifier cette perception. Ce fut par exemple récemment le cas de la stratégie Zéro Artificialisation Nette (ZAN) et de l'introduction dans la Loi Climat et Résilience de la définition suivante : « L'artificialisation est définie comme l'altération durable de tout ou partie des fonctions écologiques d'un sol, en particulier de ses fonctions biologiques, hydriques et climatiques, ainsi que de son potentiel agronomique par son occupation ou son usage » (LOI n° 2021-1104 du 22 août 2021). De telles évolutions font d'ailleurs clairement l'objet d'une appropriation par des aménageurs et des collectivités comme en témoignent par exemple l'Appel à Manifestation d'Intérêt 'Vers des territoires « Zéro Artificialisation nette »' (ADEME) qui a permis d'accompagner 22 territoires dans une nouvelle considération du sol dans les stratégies d'aménagement aux interfaces de territoires ruraux et urbains. A une échelle urbaine, la loi n° 2014-110 du 6 février 2014, dite loi Labbé, a interdit aux collectivités les pesticides chimiques de synthèse pour l'entretien des espaces verts et de la voirie. Le développement récent de multiples formes d'agriculture urbaines s'est aussi accompagné d'une attention accrue portée aux sols, leurs niveaux de contamination, mais aussi leur fertilité. Le recours à des modes de gestion durables comme la plantation d'espèces végétales adaptées, la limitation de produits phytosanitaires ou encore la limitation du

tassement des sols deviennent des choix de plus en plus adoptés par les gestionnaires.

Ensemble, ces facteurs affectent l'état des sols, compromettant ou au contraire améliorant leur capacité à assurer leurs fonctions écologiques essentielles.

3.2. Conséquences sur l'évaluation de la santé des sols en milieu urbain

En milieu urbain, l'évaluation de la santé des sols répond à au moins trois objectifs majeurs : (i) orienter les démarches de planification et d'aménagement ; (ii) encourager et développer des modes de gestion et des pratiques favorables à la multifonctionnalité des sols ; (iii) mettre en œuvre des solutions de refonctionnalisation des sols dégradés. Dans ces trois cas de *Figure*, connaître le niveau de santé du sol en place au moment du diagnostic apparaît comme essentiel. Il est cependant utile de souligner que l'objectif prioritaire va orienter i) la fréquence de l'évaluation, ii) le cadre de comparaison du niveau de santé des sols (comparaison entre sols dans un périmètre urbain donné ou pour un même type de sol, en fonction des pratiques et modes de gestion) ainsi que iii) le choix de l'état fonctionnel de référence à faire pour l'évaluation.

3.2.1. Quel état fonctionnel de référence considérer ?

Selon la définition proposée précédemment, l'état fonctionnel de référence d'un sol est déterminé par ses caractéristiques pédogénétiques. En milieux naturel, agricole et forestier, celles-ci sont supposées stables à l'échelle de temps humaine ; elles permettent, avec la connaissance du contexte pédoclimatique, géologique, biologique et topographique, de rattacher un sol à une typologie.

En cas de perturbations anthropiques « limitées » du profil pédologique, n'engendrant pas de modification sensible des caractéristiques pédogénétiques, l'état fonctionnel de référence sera considéré comme constant au cours du temps et identique à celui du sol naturel initial avant urbanisation. La santé de ce sol reflétera alors simplement les variations de son état fonctionnel actuel selon les facteurs externes auxquels il serait exposé (*Figure 7*).

En cas de perturbations rapides et profondes du profil de sol, le lien entre les caractéristiques pédogénétiques du sol en place et celles du sol initial peut être complètement rompu. Dans un tel contexte, faut-il conserver l'état fonctionnel de référence initial, fondé sur les caractéristiques pédogénétiques du sol naturel avant urbanisation ? Une telle approche, bien qu'intuitive, présente une limite forte. Dans certains cas, par exemple pour les sols tronqués et imperméabilisés ou, à l'inverse, pour les Anthrosols construits, la référence à un sol initial très éloigné en termes de propriétés du sol actuel questionne l'usage de cet état fonctionnel de référence constant. Si l'on considère que certaines transformations majeures du sol urbain justifient la redéfinition de cet état fonctionnel de référence, quels seraient les critères nécessaires et suffisants pour estimer que l'état fonctionnel de référence a changé ? Serait-ce, par exemple, des modifications notoires des caractéristiques pédogénétiques conduisant à un changement de

typologie de sol ? Cette question dépend bien sûr du niveau de finesse de définition de la typologie au sein d'un référentiel. A titre d'exemple, des modifications, même drastiques d'un sol urbain ne feraient pas évoluer son rattachement au type « Anthrosol », mais pourraient le faire changer de référence passant de « Anthrosol transformé » à « Anthrosol artificiel ». C'est d'ailleurs ce qu'évoquent Rossiter et Bouma (2018) où un « genoform » peut être modifié fortement par des activités humaines et se transformer en un « phenoform » (même type de sol mais avec des modifications de fonctions du sol), voire à un nouveau « genoform » (changement de typologie).

La question du niveau de précision de la typologie de rattachement est complexe à traiter. En effet, dans la logique présentée ici, l'état fonctionnel de référence, décrivant le « genoform », d'un sol vise à décrire uniquement ses caractéristiques pédogénétiques, sans intégrer l'effet que les activités anthropiques peuvent avoir sur lui. Il nous semble alors, en première approche que celui-ci pourrait se fonder sur deux niveaux de références de rattachement : le type de sol et la référence. En effet, si l'utilisation de qualificatifs permettrait d'affiner la définition d'un état fonctionnel de référence au plus proche du sol étudié, ceux-ci traduisent certes des traits hérités de la pédogénèse naturelle, mais aussi l'effet de pratiques humaines (e.g., tronqué, compacté, drainé) (Référentiel Pédologique, 2008). Une perspective de la présente réflexion serait d'appliquer la méthode sur des cas d'étude représentatifs afin d'en tester la faisabilité et la pertinence.

Au-delà du choix du niveau de détail typologique pour constituer l'état fonctionnel de référence, l'enjeu suivant est la disponibilité de données pour renseigner les valeurs médianes de celui-ci. Si la plupart des sols naturels, agricoles et forestiers des territoires français sont bien caractérisés, il n'en est pas de même pour les sols fortement anthropisés. Il serait alors nécessaire de constituer des bases de données représentatives des cinq références d'Anthrosols, en conservant à l'esprit que la variabilité des propriétés bio-physico-chimiques intra-référence est beaucoup plus forte que pour les sols naturels. Par ailleurs, s'il est admis que l'état fonctionnel de référence d'un sol peut évoluer, des processus pédogénétiques précoces, rapides et intenses (Leguëdois et al., 2016) sont susceptibles de modifier les caractéristiques des sols à l'échelle de la décennie, pouvant aller jusqu'à modifier, de manière continue, l'état fonctionnel de référence du sol étudié. Dans ce cas, il pourrait être envisagé de définir un état fonctionnel de référence glissant par paliers successifs sur des périodes longues de plusieurs centaines ou milliers d'années.

3.2.2. Diagnostic

L'évaluation de la santé du sol nécessite la réalisation d'un diagnostic avancé, toujours par analogie avec la santé humaine. Pour les raisons mentionnées précédemment, cette opération peut s'avérer complexe en contexte urbain et nécessite la mise en œuvre de quatre grandes phases : i) la reconstitution des caractéristiques pédogénétiques initiales du sol ; ii) la connaissance de la nature et de l'intensité des facteurs externes susceptibles d'avoir affectés le sol étudié ; iii) une auscultation de terrain permettant une description

morphologique aussi complète que possible du profil de sol ; iv) la réalisation d'analyses bio-physico-chimiques pour affiner la compréhension des caractéristiques du sol.

La première phase vise à déterminer la typologie du sol naturel avant urbanisation afin d'établir un premier état fonctionnel de référence. Il semble alors pertinent de se baser sur la méthodologie de Ducommun *et al.* (2023) qui, en l'absence quasi-systématique de carte des sols en milieux urbains, proposent de reconstituer le sol initial à partir des facteurs géologiques, climatiques et topographiques. La seconde phase, basée sur une étude de différentes sources documentaires, doit permettre, à un grain dépendant de l'échelle d'étude, de lister l'ensemble des facteurs externes susceptibles d'avoir affecté aussi bien les déterminants pédogénétiques que les propriétés : succession d'usages voire des principaux modes de gestion et pratiques appliquées au sol étudié (Franck-Néel *et al.*, 2015 ; Libessart *et al.*, 2022). La troisième phase consiste, par le biais d'observations de terrain basées sur des sondages ponctuels et idéalement sur l'ouverture et la description de fosses pédologiques, en une description morphologique complète permettant de visualiser les effets réels des facteurs externes sur le sol (Séré *et al.*, 2024). Enfin, la quatrième phase vise à préciser la compréhension des propriétés du sol. Il est recommandé d'associer ici une caractérisation de base du sol (e.g., fertilité, indicateurs de biodiversité, propriétés hydrauliques) et des analyses dépendant du contexte (e.g., dosage de contaminants, propriétés géomécaniques) (Séré *et al.*, 2024).

Selon l'objectif d'évaluation de la santé du sol visé, ce diagnostic peut être ponctuel lorsqu'il s'agit d'éclairer des stratégies de planification et d'aménagement ou être répété afin d'obtenir un suivi au cours du temps. Dans ce dernier cas, il est question d'évaluer l'impact de modes de gestion ou de pratiques ou l'efficacité d'une opération de refonctionnalisation.

3.2.3. Détermination de la santé des sols urbains

Au vu des changements intenses et rapides (positifs ou négatifs) que peuvent subir les sols urbains sous l'influence des facteurs anthropiques, deux scénarios d'évaluation du niveau de santé du sol selon l'état fonctionnel de référence peuvent être envisagés, à savoir : i) se baser sur un état fonctionnel de référence initial constant au cours du temps ; ii) se baser sur un état fonctionnel de référence variable au cours du temps et résultant de facteurs externes ayant significativement modifié les caractéristiques pédogénétiques, impliquant ainsi une nouvelle typologie de sol de référence.

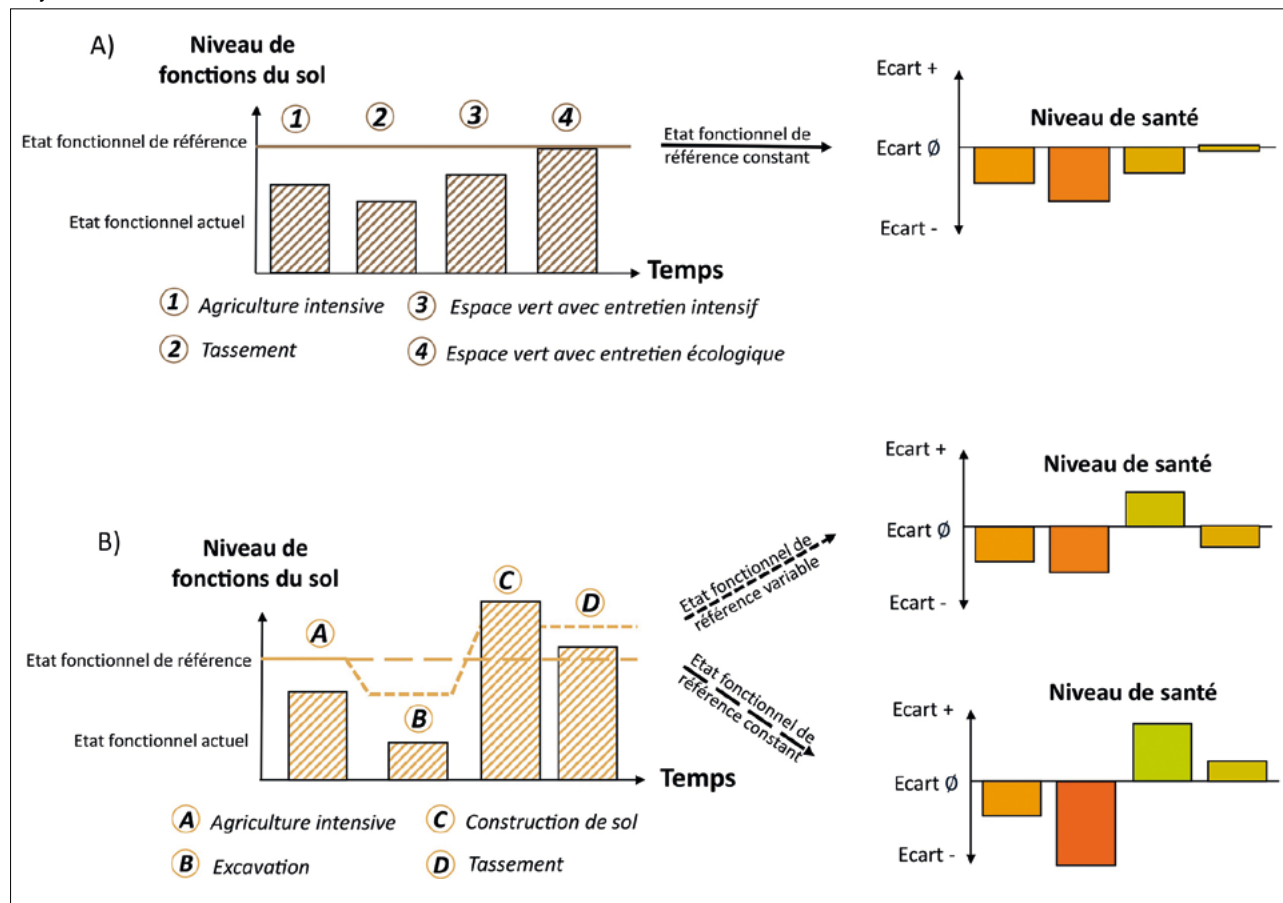
Ces deux cas de figures peuvent être illustrés en se basant sur l'évolution théorique possible du niveau de santé de deux sols actuellement en milieu urbain, mais ayant subi différentes successions d'usages et de pratiques et modes de gestion associés (Figure 7). Le premier cas (Figure 7A) présente un sol qui est passé d'un usage agricole à un usage d'espace vert urbain. Il est ici considéré que les pratiques subies par le sol (e.g., fertilisation, labour, tassement) ainsi que les modes de gestion du couvert végétal (e.g., fréquence de la tonte, apport de produits phytosanitaires) ont un impact limité sur les caractéristiques pédogénétiques du sol et donc que son état

fonctionnel de référence ne varie pas au cours du temps. En revanche, les déterminants de santé tels que les pratiques et modes de gestion peuvent influencer le fonctionnement du sol et donc le niveau des fonctions assurées par le sol, comme la rétention en eau, la régulation de l'activité biologique ou la régulation du cycle des nutriments. Dans ce contexte, le niveau de santé peut être évalué simplement par l'écart entre l'état fonctionnel de référence considéré comme étant constant et l'état fonctionnel du sol au moment du diagnostic, qui lui évolue au cours du temps selon les facteurs externes. Le deuxième cas (Figure 7B) illustre un sol agricole qui a été artificialisé via des travaux pour la construction d'infrastructures ou d'habitations, puis renaturé par la mise en œuvre du génie pédologique). Dans ce cas, les pratiques appliquées au sol telles que l'excavation ou le dépôt massif de matériaux exogènes pour la construction de sol peuvent non seulement altérer drastiquement l'état et les fonctions assurées par le sol, mais également ses caractéristiques pédogénétiques et donc sa typologie de rattachement. Cette situation pourrait faire penser à ce que Rossiter et Bouma (2018) appellent un nouveau « genoform ». Ainsi, le choix de conserver l'état fonctionnel de référence initial avant urbanisation ou de considérer un nouvel état fonctionnel de référence correspondant à la typologie du sol actuel dépend principalement de l'objectif visé, c'est-à-dire de la question posée au cours de l'évaluation. Si la santé du sol sera évaluée de la même manière dans les deux options (écart entre niveau actuel et de référence), son interprétation sera différente (Figure 7B) selon l'approche considérée. Il est à noter que les opérations humaines intenses et rapides n'ont pas toujours des impacts négatifs sur les sols. Des pratiques vertueuses comme le génie pédologique peuvent avoir un effet bénéfique sur le niveau de fonctions assurées par un sol. Dans ce cas, si l'état fonctionnel de référence est celui du sol naturel initial, son état fonctionnel actuel peut se révéler supérieur à celui-ci, notamment si ce dernier était peu fonctionnel dans son état naturel (Figure 7B).

Ainsi, la proposition que nous formulons repose sur l'hypothèse que la santé des sols urbains ne doit pas être pensée comme une simple comparaison avec un idéal préétabli, mais plutôt comme une appréciation dynamique de leur capacité à assurer des fonctions écologiques et urbaines dans un contexte très évolutif. Cela implique de considérer que l'état fonctionnel de référence peut aussi changer, avec des niveaux de fonctions des sols qui peuvent augmenter, rester stable ou baisser selon les pressions anthropiques et varier sur des pas de temps parfois très courts. Il en découle alors la nécessité d'augmenter la fréquence de l'évaluation de la santé des sols urbains pour intégrer au mieux ces dynamiques temporelles qui constituent des marqueurs originaux et intrinsèques des milieux urbains. C'est d'ailleurs ce que suggèrent Rossiter et Bouma (2018) en préconisant une évaluation répétée dans les zones soumises à une gestion intensive ou modifiée afin d'identifier les zones où les « phenoform » et « genoform » ont changé.

Figure 7 : Dynamique temporelle du concept d'état fonctionnel de référence, d'état fonctionnel actuel et de santé des sols en milieu urbain selon différents facteurs externes ; A) correspond à un état fonctionnel de référence constant et B) un état fonctionnel de référence variant ou non dans le temps.

Figure 7: Temporal dynamics of the concept of reference functional state, current functional state and urban soil health as a function of different external factors; A) corresponds to a constant functional reference state and B) a reference functional state that may or may not vary over time.



4. CONCLUSION

S'intéresser à la santé des sols à travers le prisme des sols urbains permet de questionner ce concept qui restait, de notre point de vue, encore imprécis et peu opérationnel. Il a d'abord été proposé un nouveau cadre conceptuel inspiré à la fois par celui de l'évaluation de la santé humaine et par des travaux antérieurs sur la santé des sols. Il repose, d'une part, sur une liste de déterminants de la santé des sols et, d'autre part, sur la définition d'un état fonctionnel de référence d'un sol auquel son état fonctionnel actuel doit être comparé pour l'évaluation de sa santé. Les spécificités des sols urbains doivent impérativement être prises en compte dans cette démarche.

Ces sols sont tout d'abord exposés à des facteurs externes (diversité et succession d'usages, modes et pratiques de gestion, facteurs environnementaux et connaissance des gestionnaires) dont la diversité et l'intensité s'expriment de manière paroxystique par rapport aux sols des espaces agricoles, forestiers et naturels. Ces

facteurs modifient directement l'état fonctionnel actuel du sol, son fonctionnement et donc sa santé et ce, sur des pas de temps parfois très courts. Au-delà, certaines des modifications qui affectent les sols urbains peuvent aller jusqu'à transformer radicalement leurs caractéristiques pédogénétiques. Il peut alors s'avérer pertinent de considérer que leur état fonctionnel de référence a changé. Les questionnements scientifiques qui s'ébauchent renforcent les besoins de recherche sur les thématiques suivantes : i) cartographie des sols en contexte urbain ; ii) étude de l'évolution des sols urbains le long de chronoséquences ; iii) identification des paramètres et indicateurs pertinents pour l'évaluation de la santé des sols urbains ; iv) adaptation des modes de gestion et les pratiques spécifiques des milieux urbains ; v) développement du génie pédologique pour refunctionaliser les sols dégradés.

Alors que la considération portée aux sols n'a jamais été aussi forte, l'évaluation de leur santé repose sur un concept qui présente l'avantage de pouvoir être appréhendé par toutes les parties

prenantes. En contexte urbain aussi, les sols qui sont en bonne santé doivent être préservés et ceux qui sont dégradés méritent d'être refonctionnalisés. Disposer des bases pour construire un cadre opérationnel permettant d'évaluer leur santé est alors un pré-requis indispensable à leur gestion éclairée pour faire face à une série d'enjeux environnementaux et sociaux majeurs de nos sociétés.

Nous sommes conscients que les réflexions menées dans cet article amènent autant de nouveaux questionnements et peut-être de remise en cause que de certitudes. Les débats et controverses sur le concept de santé des sols sont alors loin d'être clos et devront se nourrir de nouvelles connaissances scientifiques.

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier chaleureusement les relecteurs de cet article.

BIBLIOGRAPHIE

- Bai X., Sioen G.B., Kilkiş Ş., McPhearson T., Niaz Z., Dodson J., Atmaja T., Fukushima K., Frantzeskaki N., Nagendra H., Shih W., Elmqvist T., Muñoz-Erickson T., Deng X., Güneralp B., Lwasa S., Zama N. (2025). Reimagining urban science for global sustainability: Five strategic research areas. *Glob. Sustain.* 8, e38. <https://doi.org/10.1017/sus.2025.10025>
- Bielińska E.J., Futa B., Ukalska-Jaruga A., Weber J., Chmielewski S., Wesołowska S., Mocek-Plóćiniak A., Patkowski K., Mielnik L. (2018). Mutual relations between PAHs derived from atmospheric deposition, enzymatic activity, and humic substances in soils of differently urbanized areas. *J Soils Sediments* 18, 2682–2691. <https://doi.org/10.1007/s11368-018-1937-z>
- Branchu P., Marseille F., Bessière J.-P., Duvigneau C., Genesco P., Keller C., Lambert M.-L., Laroche B., Le Guern C., Lemot A., Métois R., Moulin J., Néel C., Sheriff R. (2022). MUSE – Intégrer la multifonctionnalité des sols dans les documents d'urbanisme. Editions ADEME, 184 p.
- Brevik E.C. (2019). A Brief History of the Soil Health Concept. The profile. <https://profile.soils.org/posts/field-and-historical-notes/a-brief-history-of-the-soil-health-concept>
- Burghardt W. (1994). Soils in urban and industrial environments. *J Plant Nutrition & Soil* 157, 205–214. <https://doi.org/10.1002/jpln.19941570308>
- Cherel J., Séré G., Boithias L., Warot G., Schwartz C., Morandas P. (2017). Destisol : Les sols, une opportunité pour un aménagement durable. Editions ADEME, 56 p.
- Corgne S. (2016). Étude des changements d'occupation et d'usage des sols en contexte agricole par télédétection et fusion d'informations. Géographie. Université Rennes 2 2014.138 p.
- Cousin I., Desrousseaux M., Leenhardt S., Angers D., Augusto L., Ay J.-S., Baysse-Lainé A., Branchu P., Brauman A., Brichler M.-C., Chemidlin Prévost-Bouré N., Compagnone C., Froger C., Gros R., Hermon C., Itey J., Keller C., Laroche B., Lelièvre V., de Mareschal S., Meulemans G., Montagne D., Pérès G., Saby N., Vaudour E., Villerd J., Violle C. (2025). Préserver la qualité des sols : vers un référentiel d'indicateurs. Rapport d'étude. INRAE 2025, 780p. hal-04934694v2
- de Bellefon M.P., Eusebio P., Forest J., Pégaz-Blanc O., Warnod R. (2020). En France, neuf personnes sur dix vivent dans l'aire d'attraction d'une ville, INSEE Focus 211
- Di Gregorio A., Jansen L.J.M. (1998). A new concept for a land cover classification system. Proceedings of the Earth observation and Environmental information, 10.
- Dominati E., Patterson M., Mackay A. (2010). A framework for classifying and quantifying the natural capital and ecosystem services of soils. *Ecological Economics* 69, 1858–1868.
- Doran J.W., Zeiss M.R. (2000). Soil health and sustainability: managing the biotic component of soil quality. *Applied Soil Ecology* 15, 3–11. [https://doi.org/10.1016/S0929-1393\(00\)00067-6](https://doi.org/10.1016/S0929-1393(00)00067-6)
- Droogers P., Bouma J. (1997). Soil Survey Input in Exploratory Modeling of Sustainable Soil Management Practices. *Soil Science Soc. of Amer. J.* 61, 1704–1710. <https://doi.org/10.2136/sssaj1997.03615995006100060023x>
- Ducommun C., Duvigneau C., Vidal-Beaudet L. (2023). Méthode de caractérisation d'une couverture pédologique soumise à différentes formes de dénaturation et d'anthroposolisation. *Etude et Gestion des Sols*.
- Dudal R. (2004). The sixth factor of soil formation. International Conference on Soil Classification 2004, Petrozavodsk, Russia, 3-5 August, 2004.
- European Commission (2025). Directorate-General for Research and Innovation, EU Mission: A Soil Deal for Europe, Publications Office of the European Union. <https://data.europa.eu/doi/10.2777/4948116>
- Fausak L.K., Bridson N., Diaz-Osorio F., Jassal R.S., Lavkulich L.M. (2024). Soil health – a perspective. *Front. Soil Sci.* 4, 1462428. <https://doi.org/10.3389/fsoil.2024.1462428>
- Franch-Néel C., Borst W., Diome C., Branchu P. (2015). Mapping the land use history for protection of soils in urban planning: what reliable scales in time and space? *J Soils Sediments* 15, 1687–1704. <https://doi.org/10.1007/s11368-014-1017-y>
- Janzen H.H., Janzen D.W., Gregorich E.G. (2021). The 'soil health' metaphor: Illuminating or illusory? *Soil Biology and Biochemistry* 159, 108167.
- Karlen D.L., Mausbach M.J., Doran J.W., Cline R.G., Harris R.F., Schuman G.E. (1997). Soil quality: a concept, definition, and framework for evaluation. *Soil Science Soc of Amer J* 61, 4–10. <https://doi.org/10.2136/sssaj1997.03615995006100010001x>
- Lalonde M. (1974). Nouvelle perspective de la santé des Canadiens : un document de travail. Gouvernement du Canada, Ottawa (Ont).
- Lancaster J. (2000). The ridiculous notion of assessing ecological health and identifying the useful concepts underneath. *Human and Ecological Risk Assessment* 6, 213–222. <https://doi.org/10.1080/10807030009380056>
- Leguédou S., Séré G., Auclerc A., Cortet J., Huot H., Ouvrard S., Watteau F., Schwartz C., Morel J.L. (2016). Modelling pedogenesis of Technosols. *Geoderma* 262, 199–212. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.08.008>
- Lehmann J., Bossio D.A., Kögel-Knabner I., Rillig M.C. (2020). The concept and future prospects of soil health. *Nat Rev Earth Environ* 1, 544–553. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0080-8>
- Libessart G. (2022). Modélisation prédictive des propriétés des sols urbains basée sur leur historique d'usages. Thèse de doctorat, Université de Lorraine, Nancy.
- Libessart G., Franch-Néel C., Branchu P., Schwartz C. (2022). The human factor of pedogenesis described by historical trajectories of land use: The case of Paris. *Landscape and Urban Planning* 222, 104393. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2022.104393>
- McPhearson T., Parnell S., Simon D., Gaffney O., Elmqvist T., Bai X., Roberts D., Revi A. (2016). Scientists must have a say in the future of cities. 538, 165–166. <https://doi.org/10.1038/538165a>
- Marseille F., Hébrard Labit C., Neaud C., Neel C., Perrot M., Leblain J.-Y. (2023). Sol et adaptation au changement climatique - De la compréhension des mécanismes aux pistes d'actions en contexte urbain. 80 p.
- Morel J.L., Séré G., Vasenev V., Nehls T. (2023). Ecosystem services provided by soils in highly anthropized areas (SUITMAs), in: *Encyclopedia of Soils in the Environment*. Elsevier, pp. 37–55. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822974-3.00207-X>
- Morel J.L., Chenu C., Lorenz K. (2015). Ecosystem services provided by soils of urban, industrial, traffic, mining, and military areas (SUITMAs). *J Soils Sediments* 15, 1659–1666. <https://doi.org/10.1007/s11368-014-0926-0>
- Portail de l'artificialisation des sols (2025). [<https://artificialisation.developpement-durable.gouv.fr/>].
- Rabot E., Guirese M., Pittatore Y., Angelini M., Keller C., Lagacherie P. (2022). Development and spatialization of a soil potential multifunctionality index for agriculture (Agri-SPMI) at the regional scale. Case study in the Occitanie region

- (France). Soil Security 6, 100034. <https://doi.org/10.1016/j.soisec.2022.100034>
- Référentiel pédologique (2008). Savoir-faire. Quae, Versailles. 435 p.
- Rossiter D.G., Bouma J. (2018). A new look at soil phenoforms – Definition, identification, mapping. *Geoderma* 314, 113–121. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.11.002>
- Schram M., Wubs E.R.J., Van Der Putten W.H. (2024). Benchmarking for soil health improvement. *One Earth* 7, 2099–2102. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2024.11.015>
- Schwartz C., Beaujouan V., Brogini F., Bulot A., Consalès J.N., Corbel A., Cozzi M., Dagois R., Daniel H., David P., Gontier M., Goudon R., Herbreteau A., Lasseigne P., Lothodé M., Louvet J.C., Moret A., Ouvrard S., Perridy L., Séré G., Teixeira Da Silva M., Vadepiet F., Vieillard C., Vidal-Beaudet L. (2024). Désimperméabiliser les villes - Guide opérationnel pour (re)découvrir les sols urbains. *Plante & Cité*. 70 p.
- Schwartz C., Bispo A., Blanchart A., Brunet J.-F., Cambou A., Cannavo P., Consales J.-N., De Fouquet C., Ducommun C., Lattelais C., Le Guern C., Saby N., Sauvaget B., Séré G., Vidal-Beaudet L. (2022). Sols urbains et projets d'aménagement (SUPRA) : de l'échantillonnage des sols urbains à l'outil d'aide à la décision d'affectation des sols. Editions ADEME, 221 p.
- Séré G., Le Guern C., Bispo A., Layet C., Ducommun C., Clesse M., Schwartz C., Vidal-Beaudet L. (2024). Selection of soil health indicators for modelling soil functions to promote smart urban planning. *Science of The Total Environment* 924, 171347. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171347>
- Séré G., Schwartz C., Ouvrard S., Renat J.-C., Watteau F., Villemin G., Morel J.L. (2010). Early pedogenic evolution of constructed Technosols. *J Soils Sediments* 10, 1246–1254. <https://doi.org/10.1007/s11368-010-0206-6>
- Thenail C., Baudry J. (2001). Modélisation des systèmes techniques agricoles contribuant aux dynamiques des structures paysagères : de la parcelle à l'exploitation agricole et au paysage. Littoral, Séminaire de l'UMR 6554 du CNRS. LETG. Environnement, Télédétection, Géomatique, Feb 2001, Rennes, France
- van den Elsen E., Anton-Sobejano R., Cousin I., Fuchs L., de Haan J., Teuling K., Klimkowitz-Pawlas A., Niedźwiecki J., Pindral S., Montagne D., Scammacca O., Weninger T. (2022) A framework to assess soil threats, soil functions and soil-based ecosystem services. *EJP Soil – SERENA D2.1*. <https://doi.org/10.5281/zenodo.14056695>
- Véron J. (2007). La moitié de la population mondiale vit en ville. *Population & Sociétés*, 435(6), 1-4. <https://doi.org/10.3917/popsoc.435.0001>.
- Vidal-Beaudet (2015). Propriétés agronomiques des sols urbains construits : structuration et évolution, Habilitation à Diriger des Recherches, Université d'Angers.