

Sols naturels, sols construits :

Sont-ils si différents ?

Julien Laurette

JL CONSEIL, 27 rue de la Grassinière 44120 Vertou, France

jlaurette04@gmail.com

RÉSUMÉ

Instinctivement et pour les non-spécialistes, les sols construits semblent diamétralement opposés aux sols naturels dans le spectre de la grande diversité des sols observables en France. Formuler le sujet différemment suffit déjà à nuancer cette perception : en quoi les sols construits se rapprochent et/ou diffèrent des sols naturels ? L'interrogation autour de la place des Anthrosols construits par rapport aux références naturelles reflète l'évolution de la pédologie moderne. Pour y répondre, il est nécessaire de revenir à la définition même des sols et à ce qui les caractérise. Le concept de sol, polysémique, n'a cessé d'évoluer au cours du temps. Historiquement vus comme de simples supports pour la production de biomasse, ils sont aujourd'hui considérés comme des systèmes complexes et multifonctionnels rendant de nombreux services aux sociétés humaines.

En France métropolitaine, il n'existe quasiment plus de sols naturels *stricto sensu* mais une multitude de sols avec un gradient d'anthropisation croissant allant du sol pseudo-naturel aux sols fortement anthropisés (dont les Anthrosols). A l'extrémité supérieure de ce gradient, la construction de sol permet grâce au génie pédologique et à partir de matériaux issus de l'économie circulaire de recréer des sols fonctionnels là où ils ont été dégradés ou détruits.

Bien que contenant des artefacts anthropiques absents des sols naturels, les sols construits apparaissent comme des sols à part entière. Répondant en grande partie à la définition générale du sol, ce sont des interfaces avec les autres compartiments de l'environnement ; ils sont réalisés avec une organisation interne réfléchie en termes de constituants et d'horizons, et

Comment citer cet article :

Laurette J., 2026 - Sols naturels, sols construits sont-ils si différents ? *Étude et Gestion des Sols*, 33, 115-131

conçus pour être biologiquement actifs. S'ils ne peuvent remplacer la multifonctionnalité intrinsèque des sols naturels, ils sont capables de remplir les mêmes fonctions individuellement et de rendre les mêmes services écosystémiques dans un éventail et à des niveaux qui restent à préciser.

Pouvant être considérés comme des sols allochtones anthropiques, les Anthrosols construits se démarquent par leur (néo) pédogenèse. A l'opposé des sols naturels, dont la formation et l'évolution sont indissociables, lentes, progressives et déterminées par les grands facteurs naturels, et après une phase de création instantanée par la main de l'Homme, les premiers stades d'évolution des sols construits apparaissent intenses et précoces, avec des combinaisons de processus pédogénétiques inédites dans la nature. L'évaluation ou la prédiction de leur durabilité et de leur convergence vers des références naturelles à moyen/long terme restent de forts enjeux de recherche.

Finalement, plutôt que d'opposition ou d'équivalence, parlons de complémentarité : s'ils ne peuvent ni remplacer les sols naturels, ressource non renouvelable, références écologiques et patrimoniales, ni servir d'alibi à leur destruction, les sols construits constituent un outil d'aménagement et de reconquête des surfaces artificialisées au sein d'une démarche d'économie circulaire.

Mots-clés

Sols naturels, sols construits, Anthrosols, pédogenèse

SUMMARY

NATURAL SOILS, CONSTRUCTED SOILS: Are they really so different ?

Instinctively and from a non-specialist perspective, constructed soils seem to be diametrically opposed to natural soils within the broad spectrum of soil diversity observed in France. However, approaching the subject from another perspective already helps to nuance this perception: in what ways do constructed soils resemble and/or differ from natural soils? The question of the position of constructed Anthrosols relative to natural references reflects the evolution of modern pedology. Addressing this issue first requires returning to the very definition of soils and to the properties that characterize them. The concept of soil, inherently polysemous, has continuously evolved over time. Historically regarded as simple substrates for biomass production, soils are now considered complex and multifunctional systems providing numerous services to human societies.

In metropolitan France, strictly natural soils scarcely exist anymore, giving way to a wide diversity of soils distributed along a gradient of increasing anthropization, ranging from pseudo-natural soils to highly anthropized soils, including Anthrosols. At the upper end of this gradient, soil construction, through pedological engineering and the use of materials derived from circular-economy sources, makes it possible to recreate functional soils where they have been degraded or destroyed.

Although constructed soils may contain anthropogenic artefacts absent from natural soils, constructed soils emerge as fully fledged soils. In accordance with the general definition of soil, they function as interfaces with other environmental compartments; they are designed with a deliberate internal organization in terms of constituents and horizons and are intended to be biologically active. While they cannot replace the intrinsic multifunctionality of natural soils, they are capable of performing similar functions individually and delivering comparable ecosystem services, within a range and at levels that still need to be further characterized. Constructed Anthrosols may be regarded as anthropogenic allochthonous soils, distinguished primarily by their (neo) pedogenesis. In contrast to natural soils, whose formation and evolution are inseparable, gradual, and governed by major natural soil-forming factors, constructed soils undergo an initial phase of instantaneous creation through human intervention. Their early stages of development appear rapid and intense, involving combinations of pedogenetic processes unprecedented under natural conditions. Assessing or predicting their long-term durability and their potential convergence toward natural soil references therefore remains a major research challenge.

Ultimately, rather than speaking in terms of opposition or equivalence, it may be more appropriate to consider complementarity. Constructed soils can neither replace natural soils — a non-renewable resource and both an ecological and heritage reference — nor justify their destruction. However, they constitute a valuable tool for land reclamation and the rehabilitation of artificialized areas within a broader circular economy framework.

Key-words

Natural soils, constructed soils, Anthrosols, pedogenesis

RESUMEN

SUELOS NATURALES, SUELOS CONSTRUIDOS: ¿Son tan diferentes?

Instintivamente y para los no especialistas, los suelos construidos parecen diametralmente opuestos a los suelos naturales en el espectro de la gran diversidad de suelos observables en Francia. Formular el tema de manera diferente ya es suficiente para matizar esta percepción: ¿en qué se acercan y/o difieren los suelos construidos de los suelos naturales? La interrogación sobre

la posición de los Anthrosoles construidos en relación con las referencias naturales refleja la evolución de la pedología moderna. Para responder, es necesario volver a la definición misma de los suelos y a lo que los caracteriza. El concepto de suelo, polisémico, no ha dejado de evolucionar a lo largo del tiempo. Históricamente vistos como simples soportes para la producción de biomasa, hoy son considerados como sistemas complejos y multifuncionales que prestan numerosos servicios a las sociedades humanas. En la Francia metropolitana, ya no existen casi suelos naturales stricto sensu sino una multitud de suelos con un gradiente creciente de antropización que va desde el suelo pseudonatural a los suelos fuertemente antrópicos (entre ellos los Anthrosoles). En el extremo superior de este gradiente, la construcción de suelo permite gracias a la ingeniería pedológica y a partir de materiales procedentes de la economía circular recrear suelos funcionales allí donde han sido degradados o destruidos.

Aunque contienen artefactos antrópicos ausentes en los suelos naturales, los suelos construidos aparecen como suelos de pleno derecho. Respondiendo en gran parte a la definición general del suelo, son interfaces con los otros compartimentos del medio ambiente; se realizan con una organización interna reflexiva en términos de componentes y horizontes, y están diseñados para ser biológicamente activos. Si bien no pueden reemplazar la multifuncionalidad inherente del suelo, son capaces de cumplir las mismas funciones y prestar los mismos servicios ecosistémicos en una gama y niveles que todavía deben precisarse.

Pueden ser considerados como suelos alóctonos antrópicos, los Anthrosoles construidos se destacan por su (neo)pedogénesis. A diferencia de los suelos naturales, cuya formación y evolución son indisociables, lentas, progresivas y determinadas por los grandes factores naturales, y después de una fase de creación instantánea por la mano del Hombre, las primeras etapas de evolución de los suelos construidos aparecen intensas y precoces, con combinaciones de procesos pedogenéticos inéditos en la naturaleza. La evaluación o la predicción de su sostenibilidad y de su convergencia hacia referencias naturales a medio/largo plazo siguen siendo importantes retos de investigación.

Finalmente, en lugar de oposición o equivalencia, hablemos de complementariedad: si no pueden sustituir los suelos naturales, recurso no renovable, referencias ecológicas y patrimoniales, ni servir de coartada para su destrucción, Los suelos construidos constituyen un instrumento de ordenación y de reconquista de superficies artificializadas dentro de una estrategia de economía circular.

Palabras clave

Suelos naturales, suelos construidos, Anthrosoles, pedogénesis

1. INTRODUCTION : DE L'INTÉRÊT ET DES ENJEUX DES SOLS CONSTRUITS

Les sols fortement anthropisés (Technosols ou Anthrosoles selon le référentiel), initialement ignorés par la pédologie « classique » (voire même considérés par certains comme des non-sols), font l'objet d'un intérêt fort et croissant depuis le début des années 2000 (Lothodé *et al.*, 2020 ; Meulemans, 2020). Même s'il reste encore un sujet émergent dans la littérature scientifique, il existe en particulier un réel engouement autour des pratiques de construction de sols, la France faisant office de pionnier en la matière (Montagne *et al.*, 2024 ; Séré, 2024). Les Anthrosoles construits émergent principalement dans des contextes où les sols naturels ont été fortement dégradés voire détruits et se situent à la croisée de la planification urbaine, de l'ingénierie, de la gestion circulaire des déchets et de l'écologie. Ils répondent à 3 des problématiques majeures des espaces artificialisés : la fourniture de substrats fertiles pour le développement d'infrastructures vertes au sein d'espaces qui en sont dépourvus, la préservation des ressources naturelles comme la « terre végétale » ou les matériaux de carrière tels que les granulats, et l'intégration à un métabolisme urbain qui produit un flux continu de déchets minéraux et organiques (Séré, 2024).

Les sols construits traduisent aussi un changement de

paradigme : le sol n'est plus seulement support ou surface, mais un volume avec des propriétés physiques, chimiques et biologiques et un écosystème à part entière (Lothodé *et al.*, 2020). S'ils s'inscrivent dans des stratégies de résilience urbaine et d'adaptation au changement climatique, ces Anthrosoles construits soulèvent néanmoins des enjeux de différentes natures, d'autant plus que nous ne disposons que de retours d'expérience récents et relativement peu nombreux :

- techniques : leur composition et leur structuration doivent être réfléchies en fonction d'un usage préalablement déterminé, et assurer des fonctions et services écosystémiques attendus ;
- pédologiques : comment ces sols vont-ils fonctionner et évoluer ? Quelle sera leur durabilité à l'échelle humaine ?
- sociétaux : perception par les citoyens et acceptabilité de ces sols « fabriqués » à partir de déchets.

La comparaison brute entre Anthrosoles construits et sols naturels proposée par cet article est l'occasion de nous interroger sur leur place par rapport aux références naturelles. Osons même poser la question : les sols construits peuvent-ils remplacer les sols naturels ?

2. QU'EST-CE QU'UN SOL ?

2.1. Evolution et multiplicité du concept

« sol »

La notion de sol a cheminé au cours du temps. Dans le champ de l'agronomie, la perception du sol est très ancienne, aux origines de l'agriculture (Boulaine, 1985 ; Gobat *et al.*, 2013). Le sol a longtemps gardé une considération très utilitaire de substrat de culture pour les plantes, qui a persisté jusqu'à la fin du XIX^e siècle (Blanchart, 2018). Au XIX^e, le sol apparaît comme un corps naturel (dont l'existence initiale ne dépend pas de l'Homme) issu de la roche, avec un caractère « géologique ». Les travaux de Fallou et Dokoutchaïev démontrent même que le sol est plus qu'une simple couche géologique altérée ; c'est un objet complexe formé sous l'influence de 5 grands facteurs naturels : climat, roche, organismes vivants, relief et temps (Fallou, 1862 ; Dokoutchaïev, 1883). Les bases théoriques et méthodologiques de la pédologie sont posées : cette dernière s'émancipe de la géologie et devient une discipline indépendante.

Le sol reste une entité statique jusque dans les années 1960. Par la suite (à l'image de la vision pionnière de la Charte européenne sur les sols de 1972 et de son article 1)¹, en opposition à ces visions réductrices de support physique, le caractère « systémique » du sol se développe : il est désormais considéré comme un ensemble complexe d'éléments interdépendants, qui interagissent de manière dynamique, et dont les propriétés émergentes ne peuvent être comprises en isolant ses composants (Blanchart, 2018). Les caractères « (multi)fonctionnel » (remplit d'autres fonctions que substrat de culture) et « vivant » (sol-habitat : écosystème qui abrite une grande diversité d'organismes) se développent. Enfin depuis récemment (XXI^e siècle), le sol apparaît à la fois comme un patrimoine à préserver et comme une ressource naturelle essentielle, fragile et non renouvelable qu'il convient de gérer durablement.

Le concept de sol est également sujet à une forte multiplicité, abordé et défini différemment selon le domaine d'étude ou l'usage que l'on en fait (biotope, support, ressource, objet juridique ou patrimonial, etc.). Comme le résumait très bien Gobat *et al.* (2013) il y a « *autant de sols que d'intéressés au sol* ». Cette multiplicité reflète le fait que le sol est à la fois une formation naturelle organisée (vision du pédologue), un écosystème (écologue), un substrat de culture (agronome), un matériau avec des propriétés physiques (géotechnicien), une surface et une assiette foncière (juriste), etc.

La perception surfacique (en 2 dimensions) des sols, la plus étriquée (sol = support d'activités et d'infrastructures), celle du

promoteur immobilier qui vend des m², a majoritairement cours en aménagement opérationnel et dans les documents d'urbanisme comme les PLU. Elle tend à être remplacée par une vision volumique (en 3 D), avec une conscience des caractéristiques physiques, chimiques, et depuis plus récemment biologiques des sols (Blanchart, 2018). Par exemple le programme MUSE² mené par le CEREMA avait pour objectif l'intégration des fonctions des sols dans les documents cartographiques des documents d'urbanisme.

Retenons enfin que, comme l'avait illustré le président américain Franklin D. Roosevelt en 1937 à l'occasion d'un plaidoyer en faveur de leur gestion et de leur préservation (« *Une nation qui détruit ses sols se détruit elle-même* »)³, et plus largement encore comme l'affirme Arrouays (2009) : « *Il faut considérer les sols comme un patrimoine de l'Humanité* », les sols sont un patrimoine commun de grande valeur matérielle et immatérielle, avec parfois même localement une dimension sacrée (Taddei et Fallot, 2020 ; Lal, 2024).

2.2. Définition et traits fondamentaux des sols

La conséquence de cette polysémie du sol est qu'il n'existe pas de définition universelle du sol ou des sols, mais une multitude. En France, l'Association Française pour l'Etude des Sols (AFES), la société savante en pédologie, a proposé sa définition officielle des sols, à la fois compréhensible par le grand public et acceptable par les scientifiques :

« *Le sol est un volume qui s'étend depuis la surface de la Terre jusqu'à une profondeur marquée par l'apparition d'une roche dure ou meuble, peu altérée, ou peu marquée par la pédogenèse. L'épaisseur du sol peut varier de quelques centimètres à quelques dizaines de mètres, ou plus. Il constitue, localement, une partie de la couverture pédologique qui s'étend à l'ensemble de la surface de la Terre. Il comporte le plus souvent plusieurs horizons correspondant à une organisation des constituants organiques et/ou minéraux (la terre). Cette organisation est le résultat de la pédogenèse et de l'altération du matériau parental. Il est le lieu d'une intense activité biologique (racines, faune et micro-organismes).* »

Cette définition donnée par l'AFES fait apparaître 4 traits fondamentaux des sols :

1) le premier est implicite : **ce sont des interfaces**. D'abord au niveau de leur position (« *depuis la surface de la Terre* », « *jusqu'à une roche dure* », « *couverture pédologique* ») : épais de « *quelques centimètres à quelques dizaines de mètres* », le sol n'est qu'une très mince pellicule à l'interface de la lithosphère, de

¹ Charte européenne des sols. (1972). Résolution (72) 19 du Comité des Ministres du Conseil de l'Europe.

² <https://www.cerema.fr/fr/actualites/prendre-compte-multifonctionnalite-sols-amenagement>

³ lettre du 26 février 1937 adressée à tous les gouverneurs des États-Unis, concernant une loi sur la conservation des sols

l'hydrosphère et de l'atmosphère. Intrinsèquement ensuite, une interface de par leur composition : dans un sol bien structuré, il est communément admis que la porosité (*i.e.* l'espace entre les particules solides du sol) représente *grosso modo* 50 % du volume ; cette porosité est occupée par de l'air (atmosphère du sol) ou de l'eau (solution du sol) en proportions variables.

2) le trait le plus intuitif est que **les sols proviennent de « l'altération du matériau parental » et des processus de « pédogenèse »**. Le matériau parental correspond à une couche géologique non consolidée, qui provient directement de l'altération de la roche mère sous-jacente ou de dépôts non liés à la roche mère (alluvions, lœss, dépôts glaciaires).

La pédogenèse est classiquement résumée en 3 grandes étapes, qui schématiquement se succèdent, mais qui en réalité peuvent se dérouler simultanément et sont interconnectées :

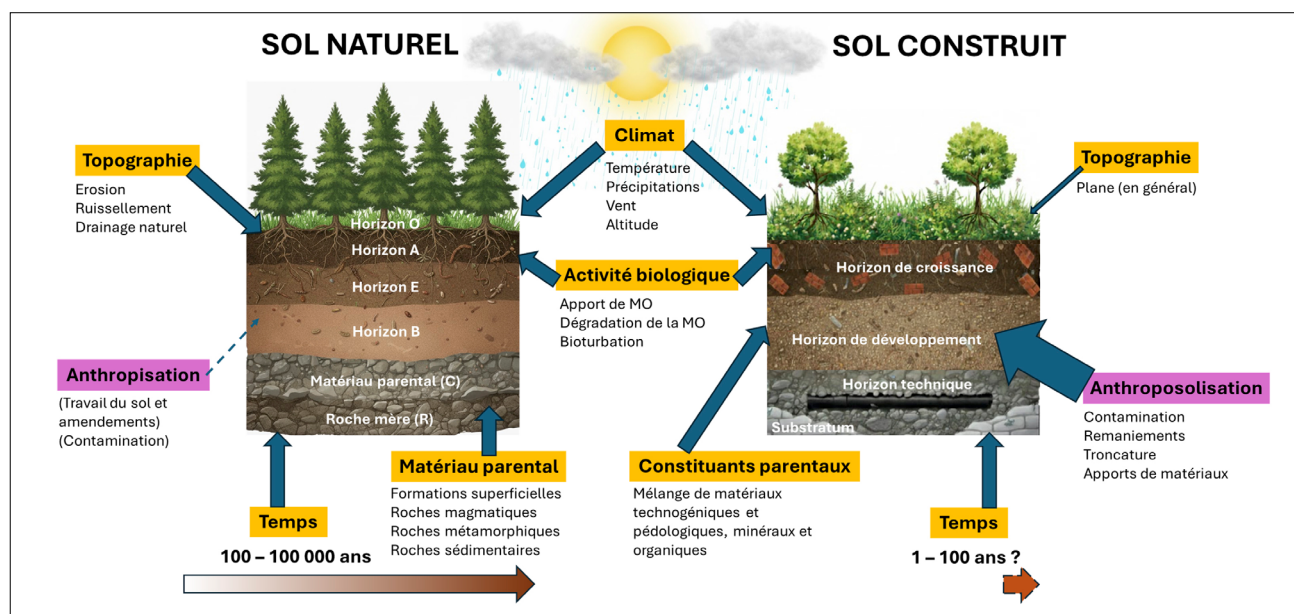
- la météorisation, *i.e.* les modifications mécaniques ou physico-chimiques subies par les roches au contact des agents atmosphériques
- l'enrichissement en matière organique : les débris végétaux et animaux tombent à la surface, s'incorporent et se transforment progressivement. Ces processus enrichissent la couche supérieure du sol et lui confèrent une grande partie de ses propriétés.
- enfin l'horizonation est la différenciation du profil et sa structuration : tandis qu'il s'épaissit, le sol commence à prendre sa structure caractéristique en horizons distincts, à

travers une différenciation verticale (du haut vers le bas) par migration et accumulation des éléments comme les argiles ou les oxydes de fer ou d'aluminium, vers les horizons inférieurs. La pédogenèse est un processus lent qui se déroule sur des échelles de temps de l'ordre de centaines, milliers, dizaines voire centaines de milliers d'années. Elle est le résultat d'une interaction complexe entre 5 grands facteurs naturels (*Figure 1*) : outre le matériau parental (r) déjà évoqué, on retrouve le climat (cl), la topographie (p), les organismes vivants (o) et le temps (t). La formule descriptive popularisée par Jenny (1941), $\text{sol} = f(\text{cl}, \text{o}, \text{r}, \text{p}, \text{t})$, peut être revisitée en ajoutant un 6^{ième} facteur, l'Homme (facteur anthropique, *via* l'agriculture, l'urbanisation et l'industrie), aujourd'hui reconnu comme un facteur à part entière, parfois marquant, et souvent (mais pas toujours) dominant en contexte urbain (Dudal *et al.*, 2002 ; Montagne, 2020 ; Libessart, 2022), même si la quantification de l'impact du facteur humain sur la formation des sols fait néanmoins largement défaut à l'heure actuelle (Montagne, 2020).

Concernant ce facteur anthropique, Ducommun *et al.* (2023) conceptualisent les sols urbains comme le fruit d'une pédogenèse originelle (liée aux 5 grands facteurs naturels) modulée par une dénaturation pédologique de degré variable, résultat du mode d'urbanisation des sols (vocation d'usage actuelle et époque d'urbanisation). L'auteur définit par ailleurs l'anthroposolisation comme « *les processus humains conduisant à l'apparition des solums anthropiques, anthropisés ou d'Anthroposols tels que définis par le RP* ».

Figure 1 : Organisation et facteurs de pédogenèse comparés entre un sol naturel autochtone évolué de type Luvisol et le modèle de sol construit le plus repris par la littérature.

Figure 1: Comparative organization and pedogenetic factors between a well-developed natural autochthonous Luvisol-type soil and the constructed soil model most frequently described in the literature.



3) découlant directement du point précédent, **les sols possèdent une organisation interne systémique** (« *organisation des constituants organiques et/ou minéraux (la terre)...* »), organisation qui s'exprime à plusieurs niveaux. A l'échelle de la fosse pédologique (échelle stationnelle), le sol est organisé en « couches » (Figure 1), horizons distincts qui ont chacun des propriétés différentes (texture, structure, couleur, composition chimique ...). A un niveau plus fin, les constituants solides élémentaires du sol s'agencent entre eux en unités plus grandes, caractérisant sa structure. L'observation montre que le sol est constitué d'une juxtaposition d'éléments structuraux : mottes, macro-agrégats et agrégats élémentaires. A l'échelle microscopique, le complexe argilo-humique est considéré comme l'assemblage fondamental emblématique du sol.

4) enfin les sols **sont le résultat et le siège d'une importante** (hors conditions extrêmes) **activité biologique** (« *lieu d'une intense activité biologique (racines, faune et micro-organismes)...* »). Les sols abritent en effet une grande diversité d'organismes vivants, plus d'un quart de la biodiversité mondiale (FAO, 2021) : la flore (végétaux), les micro-organismes (ou microflore : bactéries, champignons, protozoaires, etc) et la pédofaune, espèces animales de quelques mm à plusieurs cm : collemboles, acariens, nématodes, vers de terre, etc. (Tscheiller *et al.*, 2025). Ce trait est le plus récemment développé par les scientifiques, bien que la perception du « sol vivant » soit plus ancienne (Pessis, 2020). Parmi toutes ces espèces, les vers de terre sont sans doute les plus iconiques, considérés comme des ingénieurs du sol. Si Aristote les qualifiait déjà d'« *intestins du sol* » il y a plus de 2 000 ans (Gobat *et al.*, 2013), c'est Charles Darwin qui fut le premier à observer de manière approfondie et décrire le rôle des vers de terre dans la formation et la fertilité de la « terre végétale » (Darwin, 1881).

2.3. Ce que les sols sont et font, au bénéfice de l'Homme

Que trouve-t-on dans un sol ? Au-delà de la définition du sol et des principaux traits décrits dans la partie précédente, il est aussi intéressant de caractériser les sols par leurs constituants. Au niveau fonctionnel, rappelons que le sol est un milieu poreux composé de 3 phases : solide, liquide et gazeuse. Les différents constituants de la phase solide sont de nature minérale ou organique. Les composants minéraux du sol sont primaires, hérités directement de la roche mère, ou néoformés, issus de sa transformation chimique. Ils peuvent être classés par leur taille (sables, limons, argiles granulométriques, *i.e.* la terre fine, graviers, cailloux, etc) et/ou par leur qualité minéralogique : carbonates, oxy-hydroxydes métalliques, argiles minéralogiques (kaolinite, illite, smectite...), etc. Les matières organiques sont un constituant clef du sol, supportant directement de nombreuses propriétés et fonctions. Certains la considèrent poétiquement comme « l'âme du sol » (Davey, 1997), car elle est au centre de

la fertilité physique, chimique et biologique (Gobat *et al.*, 2013 ; Lal, 2020). Les matières organiques présentes dans les sols sont pour l'essentiel mortes (débris végétaux et animaux plus ou moins décomposés). Pédofaune et micro-organismes constituent la partie organique vivante du sol, en compagnie des racines des végétaux. Au final, les constituants des sols interagissent pour lui conférer ses propriétés physiques, chimiques et biologiques et permettent son fonctionnement. La texture est une propriété clef, à la base de beaucoup d'autres (structure, porosité, régime hydrique, etc). Gobat *et al.* (2013) présentent 11 propriétés physiques ou physico-chimiques essentielles, à côté desquelles se tiennent également des propriétés biologiques.

Depuis une vingtaine d'années, les concepts de fonctions des sols et de services rendus sont mis en avant dans la littérature scientifique et dans les politiques publiques (Eglin *et al.*, 2021). Historiquement, la notion de « fonction du sol » a été pour la première fois décrite par Fallou en 1862. C'est le maillon conceptuel qui permet l'articulation entre les processus et les services écosystémiques. INRAE définit une fonction (on parle aussi de fonction écologique) comme un assemblage de processus bio-physico-chimiques assurant une action intégrée qui permet au sol de fonctionner (Cousin *et al.*, 2024). Elles sont le résultat des flux de matière, d'énergie et d'information dont le sol est l'interface. Formulé plus simplement, les fonctions des sols sont « *ce que fait le sol* », indépendamment d'un bénéfice pour l'Homme. Après une synthèse bibliographique d'ampleur, INRAE a choisi de retenir 6 grandes fonctions, définies comme une action sur un objet : réguler l'eau en quantité et en qualité, réguler les contaminants, stocker du carbone, fournir des nutriments à la biocénose, entretenir la structure du sol, supporter la biodiversité.

Les services écosystémiques fournis par les sols sont les avantages/bénéfices que les humains tirent directement ou indirectement de l'écosystème « sol » (« *ce que fait le sol au bénéfice des sociétés humaines* »). Autrement dit, les services écosystémiques sont une interprétation anthropocentrée des fonctions écologiques du sol, représentant les bénéfices que les sociétés humaines retirent de ces fonctions naturelles. Afin d'en permettre une quantification exhaustive et précise, de nombreuses classifications des services ont été élaborées depuis le début des années 2000 (Montagne *et al.*, 2025). La classification élaborée dans le cadre du *Millenium Ecosystem Assessment* (MEA) en 2005 est la plus utilisée : elle identifie une vingtaine de types principaux de services écosystémiques, regroupés en quatre grandes catégories (Walter *et al.*, 2015) :

- services d'approvisionnement (production alimentaire et de biomasse, eau potable, matériaux de construction, fibres naturelles, ...),
- services de régulation (du climat, du cycle de l'eau, des maladies et des bioagresseurs, dégradation des polluants, ...),
- services culturels : valeur esthétique et récréative, patrimoine culturel et historique, valeurs spirituelles et religieuses),

- services de support ou d'auto-entretien : catégorie peu à peu abandonnée au profit des trois autres pour éviter les doubles comptabilisations (Montagne *et al.*, 2025).

Les relations entre les propriétés du sol et les processus qu'elles permettent, les fonctions qui résultent de l'assemblage de ces processus, et les services écosystémiques qui en découlent sont classiquement représentées sous la forme d'un modèle en cascade (Figure 2). Par exemple, la fonction « réguler l'eau en quantité » dépend (entre autres) de la propriété « réservoir utilisable en eau » (propriété qui dépend elle-même d'autres propriétés : texture, la teneur en MO, la densité apparente, etc) et offre (parmi d'autres) le service de « fourniture d'eau aux plantes ».

3. EXISTE-T-IL ENCORE DES SOLS NATURELS ?

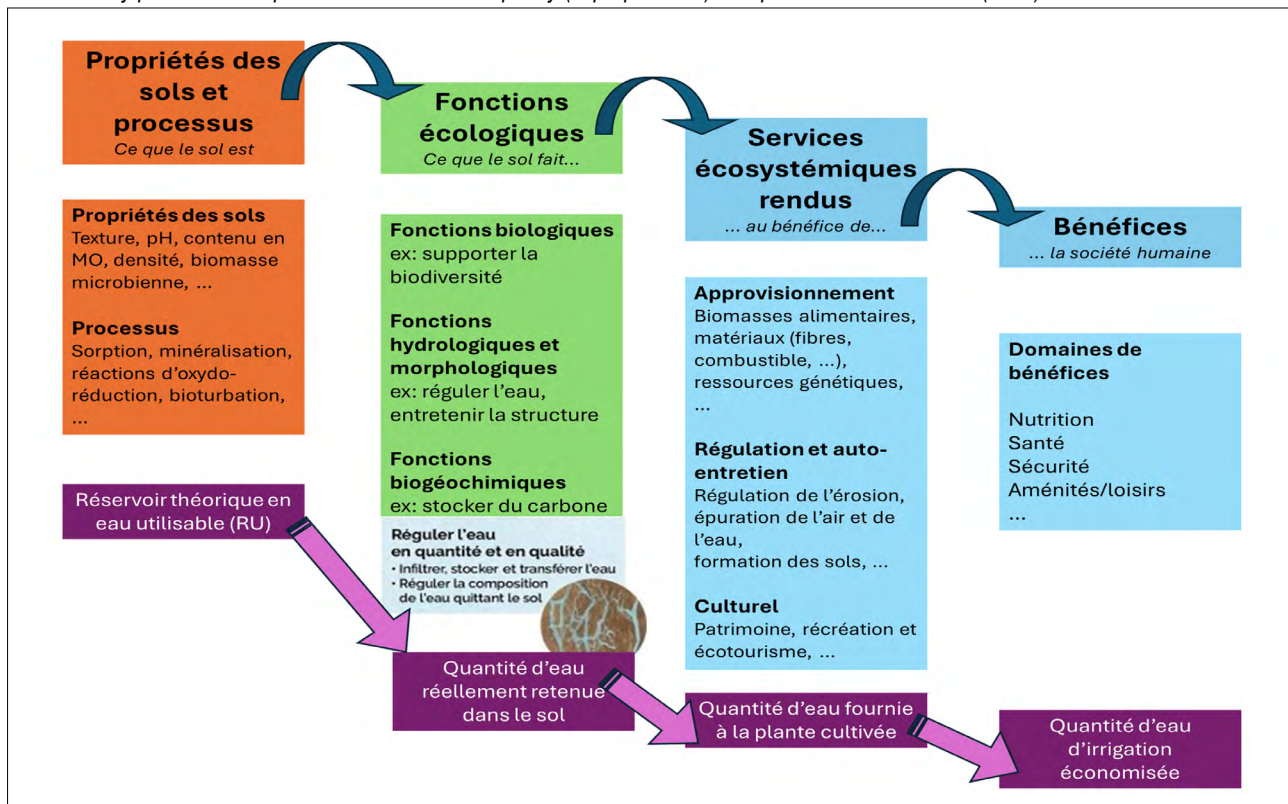
La réponse n'est ni évidente ni tranchée. La notion de « naturalité » est ici à concevoir comme l'antonyme de l'artificialisation. Depuis les débuts de l'agriculture et plus

tard de l'industrialisation, l'extension au cours du temps des perturbations anthropiques a rendu peu probable la possibilité de rencontrer des sols non perturbés par les activités humaines (Dambrine *et al.*, 2013). Certains pédologues affirment même que « dans les espaces occupés par des populations humaines sur les temps longs, comme la France métropolitaine, il n'existe plus de sols « naturels » au sens de sols non modifiés par les activités humaines » (Montagne, 2021). En effet des sols *a priori* vierges ont pu être influencés par exemple par des pratiques agricoles anciennes ou des contaminations diffuses comme celles d'éléments traces, produits phytosanitaires et autres contaminants organiques. Mais on peut tout de même imaginer qu'il est encore possible de trouver des sols naturels dans certains milieux reculés comme les forêts primaires, les zones désertiques ou de haute montagne, les toundras, etc., dans des zones comme l'Amazonie, la Sibérie, l'Alaska ou d'autres parcs nationaux et zones naturelles.

Stricto sensu, il semble qu'il n'existe guère plus de sols naturels en France. Mais dans un sens plus élargi, certains considèrent que les sols les moins affectés par les actions humaines peuvent être qualifiés de naturels (« sont dits naturels les sols les moins

Figure 2 : Modèle « en cascade » décrivant les relations entre propriétés/processus, fonctions et services rendus par les sols. Exemple de la réserve utile en eau (en mauve). D'après Cousin *et al.* (2024).

Figure 2: The cascade framework describing the relationships between soil properties/processes, functions, and the ecosystem services they provide. Example of available water capacity (in purple color). Adapted from Cousin *et al.* (2024).



affectés par les actions humaines » (Dambrine *et al.*, 2013). Ces auteurs parlent de « bon sens » pour localiser ces sols naturels : espaces peu intensifiés où la biomasse ligneuse ou herbacée est élevée et les humus constitués (*i.e.* forêts, prairies), ou espaces souvent et intensément perturbés par des facteurs naturels, où les peuplements végétaux sont pionniers et les sols peu évolués.

Au-delà, apparaissent des concepts semi-quantitatifs de degré de « naturalité », s'opposant au « gradient d'anthropisation », ou encore de « dénaturation pédologique » :

- « *il existe [...] uniquement des sols diversement modifiés par des activités humaines anciennes ou récentes, volontaires ou involontaires, de faibles ou de fortes amplitudes* » (Montagne, 2021) ;
- « *quantifier la naturalité des sols revient à caractériser les modifications dues aux actions humaines, volontaires et involontaires* » (Dambrine *et al.*, 2013) ;
- « *dénaturation pédologique : dégradation morphologique des sols conduisant à la perte partielle à totale de leurs horizons originels, par troncature, mélange, ou recouvrement.* » Résultat de l'anthroposolisation, elle exprime le décalage entre la morphologie du sol observé et celle du sol naturel présagé (Ducommun *et al.*, 2023).

Dans les faits, comment effectuer cette (semi) quantification ? Dambrine *et al.* (2013) parlent de « *comparer [...] divers descripteurs de l'état et du fonctionnement des sols, à différentes échelles spatiales et temporelles* » en utilisant un raisonnement en 3 axes : horization et âge des pédogenèses, actions anthropiques et hétérogénéités, traces et résilience.

De manière plus simple, Montagne (2021) propose de nous interroger sur les « constituants » (d'origine naturelle ou artificielle) et « l'organisation » des sols (intensité des perturbations et dérive par rapport à l'organisation initiale), aboutissant à une classification à gradient d'anthropisation croissant :

- 1) les sols dont les constituants sont très majoritairement d'origine naturelle et dont l'organisation n'a été que peu modifiée par les activités humaines : ce sont les sols « naturels » au sens large. On pourrait aussi les qualifier de « pseudo-naturels ».
- 2) les sols dont les constituants sont d'origine naturelle mais dont l'organisation a été perturbée par les activités humaines, souvent par des remaniements mécaniques répétés (labour) ou non (terrassement) ;
- 3) les sols fabriqués par les activités humaines à partir de matériaux terreux d'origine naturelle (sols des espaces verts) ; *i.e.* les sols reconstitués ou apparentés.
- 4) les sols fabriqués par les activités humaines à partir de matériaux technologiques ou artificiels, seuls ou en mélange (sols de nombreuses friches industrielles), *i.e.* les sols construits ou apparentés.

En contexte urbain, Ducommun *et al.* (2023) proposent une classification du degré de dénaturation pédologique en 5 catégories, en fonction de la profondeur et du nombre d'horizons

impactés, allant de « pseudo-dénaturé » à « totalement dénaturé ». Cette conceptualisation permet de rattacher la dénaturation pédologique au RP.

4. ANTHROPOSOLS CONSTRUITS ET GÉNIE PÉDOLOGIQUE

4.1. Définitions

Au niveau terminologique, les classifications scientifiques comme le Référentiel Pédologique Français (RP), ou la World Reference Base (WRB) permettent de décrire les sols en fonction du degré et de la nature de l'anthropisation (AFES, 2008). De manière générale dans le RP, les sols significativement modifiés ou fabriqués par l'Homme, sur plus de 50 cm d'épaisseur depuis la surface sont nommés « Anthrosols » (Baize, 2014). Si les modifications ou ajouts concernent moins de 50 cm d'épaisseur, on ne parle plus d'Anthrosols *stricto sensu* mais de sols anthropisés : on utilise alors des qualificatifs comme anthropique, anthropisé ou épianthropique, rattachés à d'autres références de sols « classiques » (Calcisol, Brunisol, etc) pour décrire le solum observé.

Dans la famille des Anthrosols, certains (reconstitués ou construits) résultent du génie pédologique, *i.e.* « *d'actes volontaires de fabrication d'un « sol » avec des objectifs précis, en particulier pour obtenir un milieu aussi fertile que possible dans le cadre d'opérations de végétalisation* » (AFES, 2008). Ces 2 qualificatifs d'Anthrosols ne sont pas équivalents, car répondant à des compositions et à des objectifs différents.

Les Anthrosols reconstitués « *résultent de l'utilisation de matériaux pédologiques transportés, remaniés, puis mis en place dans les jardins, parcs et espaces verts pour les plantations de végétaux d'ornement* » (Baize, 2014). La reconstitution de sol est une pratique simple d'ajouter un substrat exogène au sol en place (apport généralement unique et en quantité importante), lorsque celui-ci ne possède pas des propriétés agronomiques suffisantes à la croissance et au développement de végétaux choisis (Quadu *et al.*, 2021), sans réelle volonté de s'inspirer du fonctionnement naturel des sols ni réflexion approfondie sur les services écosystémiques rendus. Le « matériau pédologique transporté » (autrement dit des terres excavées) est un déchet⁴ selon la législation française dès lors qu'il sort du chantier émetteur, mais une ressource non renouvelable et sujette à menaces pour l'agronome. Il peut s'agir de la « terre végétale » du paysagiste, souvent constituée d'horizons de surface de sols agricoles ou pseudo-naturels provenant de volumes excédentaires de

⁴ directive 2008/98/CE et ordonnance n° 2010-1579 du 17 décembre 2010 ; codes déchet 17 05 04 et 20 02 02

terrassements réalisés lors de divers projets. Autrement, la profession parle de « substrat fertile », « terre végétale reconstituée » ou « recyclée » lorsque des terres excavées issues d'horizons plus profonds sont amendées en matières organiques et autres intrants (sables, calcaires, etc).

D'un degré de complexité supérieur, les Anthrosoles construits « sont le résultat d'une action volontaire de construction d'un « sol » en utilisant des matériaux technologiques, considérés comme des déchets, pour l'installation d'une végétation... capable de jouer à la fois un rôle esthétique (verdure) et un rôle de protection contre l'érosion éolienne et hydrique » (Baize, 2014). Il s'agit ici de la création d'un nouveau sol, différent de l'original en termes de structure et de fonction, assurant un niveau de fonctionnalité plus élevé que simplement être support de culture (maintien du cycle de l'eau et des nutriments, habitat biologique, ...) (Gautier *et al.*, 2023). Une véritable réflexion autour des fonctions et services rendus par ces sols artificiels, ainsi que sur leur durabilité est menée lors de leur conception (Quadu *et al.*, 2021 ; El Faricha, 2022 ; Joimel, 2024).

4.2. La construction de sol : principes et exemples

Concrètement, comment et avec quoi sont conçus les Anthrosoles construits ? Les exemples sont encore peu nombreux, et chaque projet de construction de sol peut être considéré comme unique. Le *tableau 1* est une synthèse (non exhaustive) de quelques retours d'expérience disponibles en France.

Elle démontre une diversité des usages, des compositions/structurations et des fonctions évaluées. De manière générale, les sols construits s'inspirent de l'organisation et du fonctionnement des sols naturels (Gautier *et al.*, 2023 ; Montagne *et al.*, 2024) : épaisseur totale de l'ordre du mètre, superposition d'horizons (couches fonctionnelles), enrichissement en MO en surface, inoculation de vers de terre et/ou de micro-organismes (Grard, 2017 ; Mondon, 2022 ; Cheval, 2023). Le génie pédologique affine leur conception en vue d'un usage donné et de fonctions et services écosystémiques attendus. Après cette première phase de définition des usages/fonctions/services, Séré (2024) évoque une démarche en 3 étapes : choix des composants parents (en fonction de leurs propriétés, disponibilité locale, innocuité), mise en œuvre (mélange, organisation, compactage, drainage, etc), suivi de l'évolution et du maintien des performances. Il y a notamment à la fois une réflexion sur les matériaux minéraux (importants pour la structure) et organiques (disponibilité des nutriments). Le protocole de construction est aussi modulé spécifiquement en fonction du contexte climatique, topographique ou géologique et du système de production, cultures et itinéraires techniques (Montagne *et al.*, 2024).

Les caractéristiques communément demandées à un sol construit sont les suivantes : fertilité chimique en adéquation

avec les besoins des biomasses installées, épaisseur suffisante à l'enracinement des plantes, capacité de portance adaptée (piétinement, stationnement, circulation), perméabilité convenable pour permettre l'infiltration des eaux pluviales et limiter le ruissellement tout en bénéficiant d'une capacité de rétention en eau qui assure les besoins des végétaux, concentrations en polluants inférieures aux seuils réglementaires (Cheval, 2023). Leurs degrés d'importance et leurs contours exacts dépendent de l'usage et de fonctions attendues de l'infrastructure verte. Typiquement 3 types d'horizons reposant sur le reliquat du substratum initial (voir *Figure 1*) sont définis par rapport à leurs fonctions (Gautier *et al.*, 2023 ; Joimel *et al.*, 2024) :

- de croissance : permettent la germination et le développement initial des plantes ;
- de développement : permettent l'implantation racinaire et assurent la nutrition minérale ou hydrique ainsi que l'ancrage ;
- techniques : assurent la gestion de l'eau (drainage des eaux en excès ou stockage additionnel) ; ou de confinement.

La présence de trois couches n'est pas toujours nécessaire : il est possible d'atteindre les objectifs avec la création de seulement 2 couches, voire d'une unique (Cheval, 2023).

4.3. Utilité des sols construits

S'il reste encore en France des sols naturels au sens de peu affectés par les actions humaines, il est devenu évident qu'avec l'urbanisation et l'industrialisation croissantes, de nombreux sols sont dominés par l'action de l'Homme (Libessart, 2022). Cette anthropisation des sols se caractérise par leur modification profonde et évoque souvent des effets délétères renvoyant à des dégradations (scellement, tassement, pollution, etc). Mais elle peut néanmoins manifester un côté positif avec le génie pédologique (Séré, 2018). Il intervient pour recréer des sols « vivants » et à la fertilité adaptée à leur usage là où ils ont été dégradés ou détruits. En particulier les sols construits ont pour raison d'être de restaurer voire d'augmenter les fonctions et les services écosystémiques que le sol naturel a perdus ou n'a jamais eus, tout en répondant aux besoins pratiques liés à l'urbanisation et à la gestion des déchets. Concrètement la nécessité de construire un sol apparaît généralement face à 2 grands types de situation (Ducreux, 2025) :

- sur une surface hors sol déconnectée de la « pleine terre » : jardin sur dalle, toiture végétalisée,
- sur un sol support existant mais non compatible avec le ou les usages envisagés : sols pollués et/ou non fertiles.

Tableau 1 : Exemples de sols construits en France : usages, nature et composition des horizons et fonctions étudiées.**Table 1:** Examples of constructed soils in France: land use, horizons characteristics and composition, and functions investigated.

Usage/contexte	Nature et épaisseur des horizons		Composition	Fonctions étudiées	Source
Requalification d'une friche industrielle dégradée	croissance (15 cm)		100 % compost DV*	support de végétation, fourniture d'éléments, rétention en eau, échange/filtre, support de la biodiversité, stockage de carbone	Séré, 2007
	développement (60 cm)		mélange terre industrielle traitée thermiquement (50 %) et sous-produit papetier (50 %)		
	technique (25-30 cm)	« éponge végétale » (30 cm)	100 % sous-produit papetier		
		« confinement » (25 cm)	100 % sous-produit papetier chaulé et compacté		
Maraîchage toiture productive	« nutritif » (15 cm)		mélange compost biodéchets (60 %) et résidus de champignonnière (40 %)	production alimentaire, recyclage de résidus urbain, rétention des eaux de pluies et qualité des eaux de percolations	Grard, 2017
	« squelette » (15 cm)	organique	100 % bois broyé		
		minéral	100 % briques/tuiles concassées		
	technique (3 cm)		100 % briques/tuiles concassées		
Micro-maraîchage bio-intensif	organo-minéral (30 cm)		mélange de filler (48 %), sablon (17 %), bentonite (18 %), briques concassées (4 %), compost DV (5 %), fumier cheval (5 %), fientes volailles (3 %)	production alimentaire, habitat pour la pédofaune d'intérêt	Cheval, 2023
	minéral (30 cm)		mélange de filler (55 %), sablon (19 %), bentonite (21 %), briques concassées (4 %)		
Fosses pour arbres d'alignement	croissance (25 cm)		mélange de briques concassées (58 %) et de compost de boues d'épuration et de DV (42 %)	support de végétation, fourniture de nutriments, capacité de rétention en eau	Cannavo <i>et al.</i> , 2018
	structure (32 cm)		mélanges entre terres excavées d'horizon profonds, éléments grossiers (ballast ou gravats de démolition) et matières organiques (compost de DV ou de boues d'épuration)		
Plantation d'arbres	1 seul horizon (120 cm)		mélange de terres excavées d'horizons profonds (20 %), béton concassé (70 %) et compost DV (10 %)	croissance des végétaux, colonisation par la macrofaune	Pruvost, 2018
Végétalisation, espaces verts d'agrément	croissance (35 cm)		mélange de molasse (99 %) et compost DV (1 %)	production de biomasse	Wurst, 2025
	support (20 à 35 cm)		mélange de molasse (65 %), argiles (20 %) et compost DV (15 %)		
	drainage (20 cm)		non précisé		
Agriculture (grandes cultures)	croissance (20 cm)		terre végétale (horizon L)	production de biomasse, réserve utile en eau	Terra Innova (com. pers.)
	développement (25 cm)		terres excavées de sub-surface à profonde		
	technique ; réserve hydrique (25 cm)		marnes et altérations calcaires		

*DV = déchets verts

5. SOLS NATURELS VS SOLS CONSTRUITS

5.1. L'évolution de la pédologie

L'évolution de la discipline étudiant les sols a été une nécessité au regard de l'étude et de l'intérêt récents pour les sols anthropisés. Elle est aussi le reflet de la réflexion autour de la place de ces sols, en particulier les Anthrosols construits, par rapports aux sols naturels. Avec l'urbanisation et l'industrialisation croissantes, il est devenu évident que de nombreux sols sont dominés par l'action de l'Homme (Libessart, 2022), nécessitant une adaptation des concepts classiques.

Si la pédologie a été historiquement fondée sur l'observation des sols naturels forestiers ou agricoles (Séré, 2018), ses concepts ont ensuite été adaptés et étendus pour inclure les sols anthropisés : introduction de nouveaux horizons diagnostiques, création de catégories de sols spécifiques (Dudal *et al.*, 2002). Elle est passée de l'étude des sols formés par des processus purement géologiques et écologiques à une science qui intègre la composante humaine comme un facteur de pédogenèse à

part entière. Alors que la pédologie du XX^e siècle s'est surtout construite autour des approches minéralogiques et physico-chimiques, la pédologie contemporaine s'oriente résolument vers une vision biologique, écologique et systémique du sol (Pédro, 2008 ; Baize 2021). Aussi, le concept de fonctionnalité du sol est devenu central, alors que d'autres émergent (qualité et santé notamment).

5.2. Les sols construits, des sols à part entière

Le fait que les sols construits s'inspirent des sols naturels dans leur composition et leur organisation (horizons avec propriétés distinctes) est déjà un argument en lui-même. Premièrement, les sols construits répondent majoritairement à la définition et aux caractéristiques fondamentales des sols. Tout comme les sols naturels, ils constituent des interfaces avec les autres compartiments (atmosphère, hydrosphère, biosphère) excepté avec la lithosphère s'ils en sont déconnectés (par exemple par une membrane imperméable ou une dalle en béton). Ils possèdent une organisation interne systémique, *a minima* à travers leur fabrication en couches distinctes (horizons de

Tableau 2 : Comparaison des similarités et différences entre sols naturels et sols construits.

Table 2: Comparison of similarities and differences between natural and constructed soils.

	Sols naturels	Sols construits
Statut	Ressource essentielle non renouvelable ; patrimoine irremplaçable	Outil d'ingénierie et d'aménagement (économie circulaire)
Organisation typique	Autochtones : horizons O, A, E, B, C et R Allochtones récents : horizons J, IIB, IIR	1 à 3 horizons : croissance, développement, technique
Composition	Mélange de composés minéraux et organiques issus de processus naturels	Mélange hétérogène de matériaux (minéraux ou organiques) technologiques, géologiques, pédologiques
Etat initial	Matériau parental : roche mère ou allochtone	
Facteurs	5 facteurs naturels	Facteur anthropique majoritaire (création), puis facteurs naturels et anthropique (évolution)
Processus	Identiques 1 ou 2 majoritaires par horizon	
Durée	• Formation et évolution indissociables : plusieurs siècles à centaines de milliers d'années (échelle géologique) • 3 grandes étapes (météorisation, enrichissement en MO, horizonation) • Evolution lente et continue (hors perturbations naturelles) ; pseudo-équilibre	• Création quasi-instantanée, technique, dirigée ; non-équilibrée avec son environnement • Evolution (très) rapide : quelques années (échelle humaine) puis stabilisation • Durabilité ? « Naturalisation » ?
Fonctions écologiques	Identiques Intrinsèques, héritées; multifonctionnalité choisies; plurifonctionnalité	
Services écosystémiques	Identiques (sauf culturels ?) (intrinsèques) (dirigés)	

PEDOGENESE

NEO-PEDOGENESE

croissance, développement, technique). Ils sont biologiquement actifs, car très souvent fortement enrichi en matières organiques à leur surface, parfois même inoculés avec divers organismes (vers de terre, bactéries ou champignons mycorhiziens). Toutefois, ils ne sont pas issus à proprement parler de l'altération d'un matériau parental et de processus de pédogenèse. C'est justement là que se trouve la différence majeure entre sols naturels et construits, au niveau de la pédogenèse (voir *partie 5.4.* et *Tableau 2*). D'autre part, sols naturels et construits ont des constituants pour partie identiques (matériaux pédologiques ou d'origine géologique, certaines matières organiques), qui engendrent des propriétés d'ordre similaire au moins dans leur dimension physico-chimique (texture, pH, CEC, porosité, etc) ; la similarité des propriétés biologiques est plus discutable (activité et diversité biologiques ; les sols construits sont parfois inoculés lors de leur fabrication).

Au niveau des constituants, les sols construits contiennent toutefois une proportion plus ou moins importante de matériaux technogéniques en particulier dans leur composante minérale, artefacts qui sont absents des sols naturels.

Les sols construits peuvent remplir (au moins sur le papier) les mêmes fonctions écologiques et fournir les mêmes services écosystémiques que celles et ceux définis généralement pour les sols naturels, avec tout de même plusieurs nuances. La première est que fonctions et services sont dirigés et planifiés en fonction des objectifs du projet pour les sols construits, tandis qu'ils sont intrinsèques et hérités spontanément d'une histoire pédogénétique pour les sols naturels.

Les quelques retours d'expérience disponibles dans la littérature (*Tableau 1*) sont plutôt positifs et démontrent que les sols construits sont capables de remplir efficacement une ou plusieurs fonctions écologiques (Séré, 2019). On peut donc parler de leur plurifonctionnalité : ils assurent plusieurs fonctions distinctes (et vues indépendamment les unes des autres) comme produire de la biomasse, réguler l'eau, supporter la biodiversité, etc. Néanmoins il semble encore difficile d'évoquer une multifonctionnalité de ces sols dans le sens où les interactions, l'interdépendance entre fonctions et le fonctionnement intégré ne sont pas clairement établis, contrairement aux sols naturels où elles sont interconnectées et auto-entretenues.

Aussi au niveau des services écosystémiques culturels, la dimension patrimoniale des sols construits ne semble pas encore avoir été établie. Au contraire même, un rejet social (du fait de l'utilisation de déchets et des risques perçus) et sociétal (absence de réglementation et de guides méthodologiques spécifiques) est possible (El Faricha, 2022), précisément en raison du manque de naturalité de ces sols d'origine technique. Enfin des services négatifs (ou disservices) sont parfois constatés : par exemple Grard, 2017 évoque une altération des eaux de percolation par lixiviation du carbone dans le cas de sols construits majoritairement à partir de matières organiques.

5.3. Des sols allochtones anthropiques ?

Si nous devons rapprocher les Anthroposols construits d'une référence naturelle, les sols allochtones nous viendraient rapidement à l'esprit. Contrairement aux sols autochtones formés sur place à partir d'une roche mère, les sols allochtones sont issus de matériaux déplacés (transportés) par des agents naturels : eau (alluvions), vent (loess), glace (moraines) ou gravité (colluvions). Les Anthroposols construits le sont à partir de matériaux (géologiques, pédologiques, organiques, technogéniques) transportés puis mis en place par l'Homme. Les qualifier de sols allochtones anthropiques est donc une façon de voir les choses. De manière générale, ils partagent aussi d'autres similitudes que leur origine « externe » :

- une formation parfois rapide voire brutale lorsque liée à un événement extrême,
- une composition souvent hétérogène (par exemple un mélange de pierres et d'éléments plus fins),
- une structure initialement peu évoluée et souvent instable,
- une fertilité potentiellement très haute (sols alluviaux, loessiques, volcaniques),
- un dynamisme et une évolution rapide de ces sols jeunes, en opposition aux sols autochtones plus stables.

Sous une autre entrée, le terme de néosol n'est pas présent dans le RP, mais la WRB l'utilise pour désigner les sols très jeunes et peu développés, formés sur des surfaces géologiquement nouvelles ou récemment remaniées, à la suite de processus naturels rapides ou de perturbations anthropiques. Certains considèrent donc que les Anthroposols sont des néosols anthropiques (Montagne, 2020 ; Ducreux, 2025), qui sont donc soumis à une néo-pédogenèse.

5.4. Pédogenèse des sols naturels, néo-pédogenèse des sols construits

La pédogenèse désigne l'ensemble des processus (physiques, chimiques et biologiques) concourant à la formation et à l'évolution des sols à partir des matériaux parentaux au cours du temps. Concrètement, elle est le résultat de phénomènes (réactions physiques, chimiques ou biologiques isolées) individuels (par exemple altération minérale, biodégradation, humification, lixiviation, lessivage, bioturbation, etc) qui se combinent de façon coordonnée et agissent sur le long terme, définissant les processus pédogénétiques (podzolisation, andosolisation, brunification...). La pédogenèse peut donc également être considérée au niveau fonctionnel comme un ensemble dynamique, sommation et assemblage de ces phénomènes/processus progressifs, simultanés ou successifs, et caractérisés par des cinétiques variées, journalières, saisonnières et annuelles, de la seconde à plusieurs milliers d'années (Calvet, 2003 ; Baize, 2021).

Même s'il peut y avoir débat sur ce point, le concept de pédogenèse (vue en un sens comme une succession d'états d'équilibre résultant de différentes pressions environnementales au sens large) peut donc par extension s'appliquer aux sols construits (Séré, 2018). Ceci étant dit, une différence majeure apparaît : la formation et l'évolution des sols naturels sont imbriquées, indissociables et continues, tandis que les sols construits proviennent d'une formation instantanée puis évoluent (en 2 phases temporellement distinctes).

5.4.1. Formation

La pédogenèse d'un sol naturel est un processus lent et complexe qui se déroule en moyenne sur des milliers d'années, et qui converge vers un pseudo-équilibre (Montagne, 2020). Les sols naturels autochtones proviennent de l'altération d'une roche mère R sous-jacente, qui s'altère directement en un matériau parental C (*Figure 1*). Les sols allochtones sont issus de matériaux transportés par des agents naturels, formant initialement un nouvel horizon J situé au-dessus d'un socle différent et plus ancien IIR et/ou IIB. Dans les 2 cas, le matériau parental (en général plutôt massif et homogène pour les sols autochtones) représente l'état zéro du système sol et subit une transformation progressive conceptualisée en 3 grandes étapes (météorisation, enrichissement en MO, horizonation) sous l'influence des autres grands facteurs (climat, biosphère, topographie et temps). On estime souvent de manière simplifiée qu'il faut 1 siècle à 1 millénaire pour que la Nature « fabrique » 1 cm de sol sous nos climats tempérés.

La pédogenèse des sols construits peut se diviser en 3 parties. La première est leur création par l'Homme de manière quasi-instantanée et intentionnelle en 1 seule étape ; « l'état zéro » du système étant ici un mélange de matériaux pédologiques, géologiques et d'artefacts. Il n'y a en général aucun lien de parenté entre ces Anthrosols et les substrats géologiques sous-jacents. La néo-pédogenèse des Anthrosols construits ne commence réellement qu'après leur réalisation et se manifeste par une évolution en 2 phases. La formule de Jenny, écrite pour les sols naturels, pourrait être revisitée ainsi, en ajoutant un 6^{ème} facteur, le facteur anthropique h : $\text{sol} = h + f(\text{cl}, \text{o}, \text{r}, \text{p}, \text{t}, \text{h})$.

En effet, bien que d'origine anthropique pour tout ou partie, les composants parentaux sont soumis après leur mise en place à l'influence des facteurs environnementaux (en particulier climatiques et biologiques ; *Figure 1*).

5.4.2. Une première phase d'évolution très rapide

Nous avons encore peu de recul (aussi bien en termes de nombre d'essais pilotes que d'années de suivi) sur l'évolution de ces sols artificiels, mais nous disposons tout de même, depuis une vingtaine d'années tout au plus, de quelques retours d'expériences intéressants (*Tableau 1*).

L'élément marquant est que l'évolution des sols construits débute par une 1^{ère} phase très réactive et dont les premiers

stades se caractérisent par leur intensité, leur rapidité et leur caractère non habituel (Séré, 2018). Cette dynamique rapide est l'expression d'un déséquilibre thermodynamique marqué des composants parentaux par rapport à leur environnement de dépôt. Le génie pédologique crée fréquemment des assemblages hétérogènes sans équivalent dans la nature, avec parfois côte à côte des éléments très réactifs (cendres, résidus miniers, boues, ...) ou réfractaires au potentiel d'évolution très limité (verre, *black carbon*, ...), régulièrement finement divisés (quelque cm ou mm) (Séré, 2018). Ils contiennent souvent des phases facilement altérables (gypse, sulfures, oxydes de calcium, etc) (Séré, 2018 ; Montagne, 2020 ; El Faricha, 2022). Les sols construits contiennent également bien souvent des quantités massives de produits organiques comme des composts ou des boues qui peuvent subir une transformation rapide (décomposition et minéralisation, en quelques mois ou années) en particulier lorsqu'ils se situent en surface. De plus, les variabilités de composition et d'assemblage observées dans les sols construits créent des hétérogénéités comme des fentes de dessiccation, des interfaces entre des couches aux propriétés contrastées, ou des zones d'écoulement préférentiel qui sont le siège potentiel de réactions spécifiques. Précisons que le dynamisme accru décrit ci-dessus n'est pas l'apanage exclusif du début de l'évolution des sols construits ; il peut être rencontré dans certains cas chez des sols naturels comme les sols allochtones jeunes ou les sols ayant subi un déséquilibre environnemental. Notons que de fortes incertitudes subsistent également sur la vitesse des processus pédogénétiques dans les sols naturels (Séré, 2018).

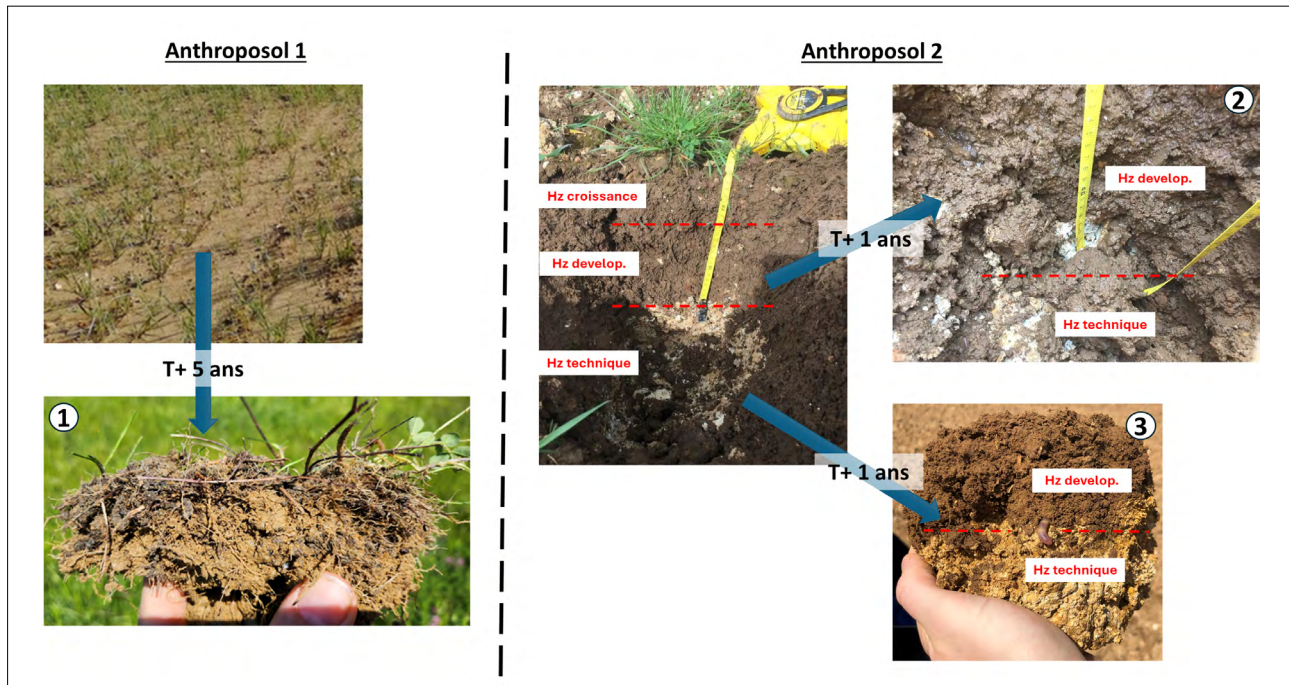
Un autre point fondamental est d'ailleurs que les phénomènes et processus pédogénétiques observables dans les Anthrosols construits sont intrinsèquement de nature comparable à ceux d'un sol naturel, mais différent cependant par l'intensité, la simultanéité et la combinaison inhabituelle de plusieurs de ces processus (Séré, 2018). Quelques résultats d'essais pilotes disponibles dans la littérature décrivent les éléments suivants (Grard, 2017 ; Séré, 2018 ; El Faricha, 2022 ; Cheval, 2023) :

- altération bio-géochimique de minéraux (silice amorphe, calcite, oxydes de fer), échange d'ions, lixiviation des composés solubles (carbonates, sulfates, carbone organique),
- biodégradation des matières organiques (minéralisation),
- tassements, changements de porosité et de fonctionnement hydrique,
- colonisation biologique progressive : racines, pédofaune,
- structuration, agrégation, horizonation.

De manière simple, rappelant l'une des grandes étapes de la pédogenèse des sols naturels, l'auteur de cet article a par exemple pu observer sur un premier Anthrosol réalisé majoritairement à partir d'une altération micaschisteuse non amendée en MO mais semée avec un engrais vert (mélange Poacées/Fabacées), l'apparition d'un horizon organo-minéral AZ de quelques mm cinq années après sa mise en place

Figure 3 : Suivi de l'évolution d'Anthroposols récents (photos J. Laurette), 1 = apparition d'un horizon organo-minéral AZ sur un horizon de sub-surface d'altération micaschisteuse (JpZ), initialement non amendé et semé avec un engrais vert. 2 = tassement et apparition d'un engorgement en eau entre l'horizon de développement et l'horizon technique. 3 = bioturbation entre horizons de développement et technique (présence de vers anéciques).

Figure 3: Monitoring the evolution of recent Anthroposols (photo credits J. Laurette). 1 = Development of an organo-mineral AZ horizon over a mica-schist weathering sub-surface horizon (JpZ), initially unamended and sown with a cover crop. 2 = compaction and occurrence of waterlogging between the developing horizon and the technical horizon. 3 = bioturbation at the contact between pedogenic and technic horizons (anecic earthworms).



(Figure 3). Sur un second Anthroposol réalisé à partir de marnes et autres altérations calcaires, sont apparus un tassement et un engorgement en eau 1 an après la mise en place ; le processus de bioturbation s'est aussi mis en place.

Aucun indice de réactions intervenant de manière exclusive dans des sols fortement anthropisés n'a pu être mis en évidence (Séré, 2018). La diversité des processus pédogénétiques en jeu sur un laps de temps donné et au sein d'un même sol construit est généralement supérieure à celle décrite pour des sols naturels (Séré, 2018). Les horizons diagnostics des groupes de sols décrits par les classifications (RP ou WRB) résultent au maximum de 2 processus conjoints. La combinaison de ces processus peut être parfois inattendue : des auteurs comme Huot *et al.* (2014) ont décrit dans un même Anthroposol des phénomènes tels que la décarbonatation et/ou la précipitation carbonatée, l'altération du verre, et la ségrégation du manganèse, alors qu'habituellement on les observe individuellement dans des sols naturels différents (respectivement des sols carbonatés, volcaniques et hydromorphes).

5.4.3. Une 2nde phase d'évolution plus classique : vers une naturalisation ?

Après cette première phase d'évolution rapide, intense et inhabituelle, que certains qualifient de pédogenèse « précoce » (Séré, 2018), s'ensuit une 2nde phase plus lente et « classique ». En effet, les Anthroposols construits semblent acquérir leurs propriétés en une dizaine d'années maximum (Séré, 2024). Par la suite, que vont devenir ces sols d'origine artificielle à moyen et long terme ?

Il apparaît établi que l'influence des matériaux technogéniques sur la pédogenèse tend à diminuer avec le temps. Séré (2018) affirme que ces Anthroposols pourraient être rattachés à une autre référence de sol naturel au bout d'un certain temps d'évolution, le caractère « technique » restant toutefois perceptible. Il évoque par exemple les Régosols ou les Cambisols. Le même auteur nous fait remarquer que les classes de Technosols ou d'Anthroposols sont utilisées pour caractériser et rattacher des sols très anthropisés durant leurs premiers stades d'évolution, mais ne décrivent en rien leur fonctionnement et leur dynamique d'évolution.

5.4.4. Durabilité et maintenance des sols construits

S'ils sont conçus pour être fonctionnels dès leur mise en place, une question connexe à l'évolution des Anthrosols construits concerne leur durabilité. Leur cinétique d'évolution se compte en années, et peu de données sur leur pérennité et le maintien de leurs performances sont disponibles (Grard, 2017 ; Séré, 2024). La durabilité dans le temps des fonctions de ces sols, leur fertilité à court et moyen terme, et leur résistance à l'érosion sont peu étudiées (El Faricha, 2022).

S'agissant de ses modèles de sols construits à base de terre industrielle traitée thermiquement et de sous-produits papetiers, Séré (2007) estime que la fertilité chimique devrait rester stable pour plusieurs décennies. L'horizon technique devrait jouer un rôle de réserve hydrique durant plusieurs dizaines d'années ; de même dans une autre modalité, l'horizon de confinement devrait demeurer efficace pendant une large période de temps.

Sur des sols construits en bacs majoritairement à partir de matières organiques et destinés au maraîchage sur toiture, les auteurs ont constaté en suivant des indicateurs de fertilité et de biodiversité, ainsi que les rendements potagers, le maintien des services écosystémiques à dix ans (Grard, 2017 ; Boyer *et al.*, 2023). Mais ils ont également mesuré une augmentation des teneurs en éléments traces, qui se rapprochent des teneurs recommandées, incitant à limiter l'usage de ces sols à une décennie en contexte urbain. De plus, la dégradation des différentes matières organiques a engendré une perte d'épaisseur de l'ordre de 10 à 20 % la première année (sans tassement ni évolution marquée de la porosité), suggérant la nécessité de « rechargements » réguliers en composants organiques pour maintenir l'épaisseur de sol (Grard, 2017).

Cannavo *et al.* (2018) se sont interrogés sur la disponibilité à long terme des macro-éléments Ca, Mg et K (N et P étant majoritairement fournis par l'horizon de croissance) de l'horizon structural d'Anthrosols construits à partir de terres excavées, d'éléments grossiers recyclés et de matières organiques, destinés à la plantation d'arbres d'alignement. Ils ont estimé qu'en conditions réelles, la fourniture de ces éléments serait suffisante pour au moins 20 ans. Mais la réserve en eau disponible de cet horizon ne serait que de 3 à 4 semaines en été, soulevant la question de la nécessité d'une irrigation, en fonction de la réserve utile des horizons sous-jacents et de l'encaissant et de la pluviométrie utile.

En résumé, le suivi voire la « maintenance » des Anthrosols construits, qui subissent des transformations rapides dès leur mise en place, semblent essentielles, sous peine d'un risque de diminution ou de perte de leurs fonctions. En effet, l'évolution naturelle (*i.e.* sans influence anthropique) des sols se montre « sourde et aveugle » à toute finalité dans le sens où elle peut produire des conditions favorables tout aussi bien que défavorables (Montagne, 2020).

6. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Les sols dans leur ensemble ne sont aujourd'hui plus considérés uniquement comme de simples supports de productions agricoles ou d'infrastructures. Ils forment un compartiment essentiel de l'environnement contribuant à la fourniture de multiples fonctions et services indispensables au bien-être des sociétés humaines. Il reste encore en France des sols naturels dans le sens de non ou très peu affectés par l'Homme. Autrement, les sols présentent un gradient variable d'anthropisation ou de dénaturation pédologique dont les Anthrosols constituent la borne supérieure.

Au final sont-ils si éloignés ? Les sols naturels sont issus d'une pédogenèse qui correspond à un équilibre morpho-climatique établi au bout de plusieurs milliers d'années par cinq grands facteurs. Ce sont des systèmes complexes et autonomes, qui demeurent des références écologiques, à la fois ressource non-renouvelable et patrimoine à sanctuariser (Arrouays, 2009).

S'ils contiennent une proportion de composants technogéniques et sont parfois déconnectés de la lithosphère, les Anthrosols construits répondent majoritairement à la définition et aux caractéristiques fondamentales des sols. Ils reproduisent certes efficacement des fonctions et services isolés, mais pas une complexité structurale et systémique.

S'approchant des sols allochtones, ces néosols anthropiques sans histoire pédogénétique ni équilibre vis-à-vis de leur environnement sont formés de manière instantanée et dirigée par la main de l'Homme à partir de matériaux hétérogènes. La néo-pédogenèse ne commence réellement qu'après leur mise en place : elle se démarque d'une pédogenèse classique en débutant par une phase d'évolution rapide, où des processus naturels se mettent en marche de manière accélérée, parfois avec une intensité et/ou une simultanéité inhabituelles, avant de ralentir après quelques années. La forte hétérogénéité intrinsèque dans leur composition et leur mise en place et le manque de recul sur l'évolution des quelques cas d'études pilotes rendent particulièrement difficile l'évaluation de cette néo-pédogenèse, en particulier de la durabilité et du maintien des fonctions, et de la convergence possible à moyen/long terme vers des références naturelles. La qualification et la quantification des évolutions de ces sols constitue tant d'un point de vue sociétal que scientifique une « nouvelle frontière » pour la pédologie, et ouvriront peut-être à plus long terme la possibilité d'une pédogenèse assistée par l'Homme (Montagne, 2020). Les sols construits sont en effet des outils d'aménagement : solution technique d'adaptation dans le cadre de politiques de sobriété foncière (ZAN) et de verdissement des villes, ils permettent de contrebalancer, à une échelle encore très locale, les effets délétères de l'anthropisation des territoires sur la couverture pédologique (Séré, 2024).

Bien qu'ils soient conçus pour restaurer ou imiter le fonctionnement des sols naturels, les Anthrosols construits ne doivent pas être envisagés comme des équivalents de leurs

modèles. Le génie pédologique est une solution technique de réparation ou de reconquête déployé là où le sol a été détruit, pollué ou recouvert. Les sols construits ne peuvent pas servir d'argument pour justifier à bonne conscience l'artificialisation et la destruction de sols naturels : la priorité restera toujours de préserver les sols naturels fonctionnels. En conclusion, la place des Anthrosols construits par rapport aux sols naturels ne se comprend pas en termes d'opposition pas plus que d'équivalence, mais plutôt en termes de complémentarité, en particulier en contexte urbain.

REMERCIEMENTS

L'auteur remercie chaleureusement les relecteurs Anne Blanchart et Christophe Ducommun pour le temps consacré à l'évaluation de ce manuscrit et pour leurs remarques constructives, qui ont permis d'en améliorer significativement la qualité.

BIBLIOGRAPHIE

- AFES (2008). *Référentiel Pédologique*. Editions Quae.
- Arrouays D. (2009). Le développement durable passe par les sols. Pour la science n°382. Août 2009. <https://www.pourlascience.fr/sd/environnement/le-developpement-durable-passe-par-les-sols-1219.php>. Consulté le 19/11/2025.
- Baize D. (2014). Les anthrosols selon le Référentiel pédologique 2008.
- Baize D. (2021). Naissance et évolution des sols. La pédogenèse expliquée simplement. Editions Quae. 160 p.
- Blanchart A. (2018). Vers une prise en compte des potentialités des sols dans la planification territoriale et l'urbanisme opérationnel. Université de Lorraine. Thèse de doctorat. 382 p. <https://theses.hal.science/tel-02075744/>
- Boulaine J. (1985). Etapes et progrès de la science du sol. Annales de géographie. 525, pp. 513-533.
- Boyer C., Joimel S., Grard B., Chenu C. (2023). Les dix ans d'un Technosol de toiture potagère. 16^{es} Journées d'Etudes des Sols. Dijon, 26-29 juin 2023.
- Calvet R. (2003). Le sol, propriétés et fonctions. Tome 1, Constitution, structure, phénomènes aux interfaces. Paris : éditions France agricole.
- Cannavo P., Guénon R., Galopin G., Vidal-Beaudet L. (2018). Technosols made with various urban wastes showed contrasted performance for tree development during a 3-year experiment. Environmental Earth Sciences, 77:650. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7848-x>
- Cheval P. (2023). Construction de technosols fonctionnels et fertiles à partir de matériaux, déchets et sous-produits urbains pour un usage en micro-maraîchage bio-intensif. Ecologie, Environnement. Université de Lille. Thèse de doctorat. 317 p. <https://doi.org/10.70675/c7a5a7e4z7e1az467az8e7cz5f9240467e8e> ; <https://theses.hal.science/tel-04245016>
- 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., Itay J., Keller C., Laroche B., Lelièvre V., de Mareschal S., Meulemans G., Montagne D., Pérès G., Saby N., Vaudour E., Villerd J., Violle C. (2024). Préserver la qualité des sols : vers un référentiel d'indicateurs. Synthèse du rapport d'étude, INRAE. 126 p. <https://hal.inrae.fr/hal-04934694>
- Dambrine E., Etienne D., Dupouey J.L., Brun J.J., Andre J. (2013). Naturalité des sols - Horizonation, âge, hétérogénéité et résilience. Une réflexion en construction. Dans : *Naturalité des eaux et des forêts*. Lavoisier Tec & Doc. pp. 25-38. <https://doi.org/10.3917/lav.valla.2016.01.0025>
- Darwin C. (1881). *The Formation of Vegetable Mould, through the Action of Worms, with Observations on their Habits*. John Murray, Londres.
- Davey C.B. (1997). *Nursery Soil Management-Organic Amendments*. National proceedings: forest and conservation nursery associations - 1996. Gen. Tech. Rep. PNW-GTR-389. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station. 282 p.
- Dokoutchaiev V.V. (1883). *Russian Chernozem*. In *Selected Works of V.V. Dokuchaev*, Vol. 1, pp. 14-419. Moscow, 1948. Israel Program for Scientific Translations Ltd. (for USDA-NSF), S. Monson, Jerusalem, 1967. (Translated from Russian into English by N. Kaner).
- Ducommun C., Duvigneau C., Vidal Beaudet L. (2023). Cartographie des sols urbains : Méthode de caractérisation d'une couverture pédologique soumise à différentes formes de dénaturation et d'anthroposolisation. *Étude et Gestion des Sols*, 30, pp. 127-143
- Ducreux J.L. (2025). Les technosols. Problématique et fabrication des sols fertiles. *Atelier d'écologie urbaine*.
- Dudal R., Nachtergaele F.O., Purnell M.F. (2002). The human factor of soil formation. *Proceedings of 17th world congress of soil science*. Bangkok (Thailand).
- Eglin T., Cousin I., Walter C. (2021). Contribution aux réflexions sur les concepts de fonctions des sols et de services écosystémiques, et leur évaluation. *Étude et Gestion des Sols*, 28, pp. 143-146.
- El Faricha S. (2022). Fabrication d'agrégats à partir de déchets : recherche sur l'incorporation d'argiles réactives dans des matériaux dédiés aux filières de construction de sol. *Sciences de la Terre*. Université de Limoges. Thèse de doctorat. <https://theses.hal.science/tel-04520985v1>
- Fallou F.A. (1862). *Pedologie oder allgemeine und besondere Bodenkunde*. Schönfeld's Buchhandlung, Dresde.
- FAO (2021). L'état des connaissances sur la biodiversité des sols - L'état actuel, les enjeux et potentialités, résumé à l'intention des décideurs. <https://doi.org/10.4060/cb1929fr>
- Gautier A.L., Limasset E., Drzewiecki P., Grand C., Girot E. (2023). Avis d'expert - La santé des sols urbains au service de l'aménagement des villes et du territoire. 13 p. ADEME.
- Gobat J.M., Aragno M., Matthey W. (2013). *Le sol vivant : bases de pédologie, biologie des sols*. 3^e édition, revue et augmentée. Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne.
- Grard B. (2017). Des technosols construits à partir de produits résiduels urbains : services écosystémiques fournis et évolution. *Ecologie, Environnement*. Université Paris-Saclay. Thèse de doctorat. <https://theses.hal.science/tel-01779723>
- Huot H., Simonnot M.O., Watteau F., Marion P., Yvon J., De Donato P., Morel J.L. (2014). Early transformation and transfer processes in a Technosol developing on iron industry deposits. *European Journal of Soil Science* 65, pp. 470-484.
- Jenny H. (1941). *Factors of soil formation: a system of quantitative pedology*. Dover Publications, New York, 281 p.
- Joimel S. (2024). Les technosols construits : une solution pour préserver les ressources naturelles et renaturer les villes. <https://www.lab-recherche-environnement.org/fr/article/les-technosols-construits-une-solution-pour-preserver-les-ressources-naturelles-et-renaturer-les-villes/>. Consulté le 26/11/2025
- Joimel S., Oblin J., Montagne D., Vieublé-Gonod L. (2024). Quels enjeux autour de la construction de sols i.e. Technosols construits ? Sols urbains & nature en ville : clés de voûte des villes résilientes. Jeudi 27 juin 2024. Lab recherche environnement - Vinci Paristech. <https://www.lab-recherche-environnement.org/wp-content/uploads/sols-urbains-et-nature-en-ville-sophie-joimel-agro-20240627.pdf>. Consulté le 20/02/2026.

- Lal R. (2020). Soil organic matter content and soil quality. *Journal of Soil and Water Conservation*, 75(2), 27A-35A. <https://doi.org/10.2489/jswc.75.2.27A>
- Lal R. (2024). Soil, soul, spirituality, and stewardship. *Journal of Soil and Water Conservation*, 79(1), 10A-14A. <https://doi.org/10.2489/jswc.2024.1129A>
- Libessart G. (2022). Modélisation prédictive des propriétés des sols urbains basée sur leur historique d'usages. Université de Lorraine. Thèse de doctorat. <https://theses.hal.science/tel-03994394v1>
- Lothodé M., Séré G., Blanchart A., Chérel J., Warot G., Schwartz C. (2020). Prendre en compte les services écosystémiques rendus par les sols urbains : Un levier pour optimiser les stratégies d'aménagement. *Étude et Gestion des Sols*, 27, pp. 361-376.
- Meulemans G. (2020). Urban pedogeneses: the making of city soils from hard surfacing to the urban soil sciences. *Environmental Humanities* 12 (1): 250-266. <https://doi.org/10.1215/22011919-8142330>
- Mondon A. (2022). La construction de sol : création d'un anthroposol construit fertile. Etude de cas du chantier de Pré Gaudry. Mémoire de fin d'études. L'Institut Agro Rennes Angers. <https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-03894990>
- Montagne D. (2020). Quantifier les pédogenèses anthropiques : un outil pour la gestion durable des sols. HdR. Science des sols. Université Paris-Saclay. <https://agroparistech.hal.science/tel-03204585v1>
- Montagne D. (2021). Sols : entre contaminations et reconstitutions. Interview du 29 juillet 2021, publiée par terrestres.org. <https://www.terrestres.org/2021/07/29/sols-entre-contaminations-et-reconstitutions/>. Consulté le 25/11/2025
- Montagne D., Oblin J., Joimel S., Vieublé-Gonod L. (2024). Quelles modalités pour la construction de sols à vocation agricole ? Quelques éléments issus de la littérature scientifique. Journée d'étude de la Chaire Transition foncière. 21 mars 2024. https://paris-est.archi.fr/media/pages/pratique/telechargements/doc-recherche/chaire-transition-fonciere/c97b4ab7de-1714482370/ensape_montagne.pdf. Consulté le 20/02/2024.
- Montagne D., Scammacca O., Walter C., Cousin I. (2025). Le concept de services écosystémiques et sa déclinaison au sol : entre promesses et réalités. Dans : *Agropédologie : gestion durable des sols agricoles*, ISTE Sciences - Agronomie.
- Pédro G. (2008). Le sol, maillon-clé de la gestion écosystémique de la biosphère anthropisée. *Etude et Gestion des Sols*, Volume 15 (1): 69-76
- Pessis C. (2020). Histoire des « sols vivants ». Genèse, projets et oublis d'une catégorie actuelle. *Revue d'anthropologie des connaissances* 14 (4)
- Pruvost C. (2018). Potentiel de la biodiversité dans la construction de technosols à partir de déchets urbains. Ingénierie de l'environnement. Université Paris-Est. 177 p. Thèse de doctorat. <https://theses.hal.science/tel-02371928/>
- Quadu F., Bâlon P., Limasset E., Malherbe A. (2021). Projet SOILval - Fiche technique « Le génie pédologique pour recréer des sols fertiles ... »
- Séré G. (2018). Mieux connaître la pédogenèse et le fonctionnement des Technosols pour optimiser les services écosystémiques rendus. HdR. Sciences de l'environnement. Université de Lorraine. <https://hal.univ-lorraine.fr/tel-01785605v1>
- Séré G. (2007). Fonctionnement et évolution pédogénétiques de Technosols issus d'un procédé de construction de sol. Sciences de la Terre. Institut National Polytechnique de Lorraine. 229 p. Thèse de doctorat. <https://hal.inrae.fr/tel-02824222>
- Séré G. (2019). Construction de sols. Définitions, méthodes, fonctions écosystémiques & pédogenèse. Webinaire AFES 41 du 14 mars 2019. <https://www.afes.fr/ressources/la-construction-de-sols/>. Consulté le 20/02/2026
- Séré G. (2024). Construction de sols : le génie pédologique au service de la renaturation des sols urbains et industriels. Chaire Transition foncière. Journée d'étude du 21 mars 2024. Restaurer les fonctions des sols ? Cahier n°1. <https://www.calameo.com/read/00396868802bd91b63a96>. Consulté le 24/02/2026
- Taddei A., Fallot A. (2020). En quête de métaphores. hal-03164879
- Tscheiller R., Riah-Anglet W., Brauman A., Cahurel J.Y., Delporte F., Dizien C., Gontier I., Le Net J., Nassr N., Obriot F., Perrin A.S., Revalier C., Thioye B., Valé M. (2025). Indicateurs de fonctionnement biologique des sols agricoles - Fiches pratiques - Recueil de fiches issues des travaux du Réseau Mixte Technologique BOUCLAGE.
- Walter C., Bispo A., Chenu C., Langlais A., Schwartz C. (2015). Les services écosystémiques des sols : du concept à sa valorisation. *Cahiers Demeter*, 15, pp. 53-68, 2015.
- Wurst A.X. (2025). La fabrique du sol. G'Plus Romandie. 4/2025, pp. 27-31. <https://www.hesge.ch/hepia/sites/default/files/Medias/Articles/com-rp-gplusromandie-fabriquesols-20250812.pdf>. Consulté le 10/03/2026.

