

Prendre en compte les services écosystémiques rendus par les sols urbains :

Un levier pour optimiser les stratégies d'aménagement

M. Lothodé^(1*), G. Séré⁽²⁾, A. Blanchart⁽³⁾, J. Chérel⁽¹⁾, G. Warot⁽¹⁾ et C. Schwartz⁽²⁾

- 1) SCE Aménagement et Environnement, 44262 Nantes, France.
- 2) Laboratoire Sols et Environnement, Université de Lorraine-INRAE, UMR 1120, F-54505 Vandœuvre-lès-Nancy, France.
- 3) Sol &co, 54500 Vandœuvre-lès-Nancy, France.

* Auteur correspondant : maiwenn.lothode@sce.fr

RÉSUMÉ

Dans un contexte mondial d'urbanisation croissante et d'intensification des pressions sur les ressources naturelles, la prise en compte des sols dans l'aménagement urbain devient un enjeu incontournable pour rendre les villes plus durables. Cet article se propose de préciser la définition du terme de sol urbain en décrivant la variabilité de ce qu'il recouvre et en le confrontant à ses représentations par les acteurs du monde de l'aménagement. Au travers d'une étude croisée de documents d'urbanisme et la conduite d'entretiens avec ces acteurs, il apparaît que les sols sont un compartiment des écosystèmes urbains dont le potentiel est méconnu et sous-estimé, mais qu'ils sont néanmoins considérés comme une ressource par les maîtres d'ouvrage, les maîtres d'œuvre et les entreprises de terrassement. Les services écosystémiques qu'ils peuvent rendre apparaissent comme un concept central qui permet de faire le lien entre les experts (pédologues, agronomes, paysagistes) et les décideurs. Sur ces bases, nous formulons un certain nombre de suggestions pour le développement d'outils d'aide à la décision permettant de prendre en compte les potentialités des sols à l'échelle d'un projet d'aménagement. Inspirée de la démarche mise en œuvre dans le projet Destisol, nos propositions se basent notamment sur l'évaluation des services écosystémiques des sols urbains à partir de l'analyse de leurs caractéristiques physiques, chimiques et biologiques.

Mots-clés

Sol urbain, services écosystémiques, aménagement, outil d'aide à la décision, artificialisation, fertilité, contamination.

Comment citer cet article :

Lothodé M., Séré G., Blanchart A., Chérel J., Warot G. et Schwartz C., 2020 - Prendre en compte les services écosystémiques rendus par les sols urbains : un levier pour optimiser les stratégies d'aménagement, *Etude et Gestion des Sols*, 27, 361-376

Comment télécharger cet article :

<https://www.afes.fr/publications/revue-etude-et-gestion-des-sols/volume-27/>

Comment consulter/télécharger

tous les articles de la revue EGS :

<https://www.afes.fr/publications/revue-etude-et-gestion-des-sols/>

SUMMARY**TAKING INTO CONSIDERATION ECOSYSTEM SERVICES PROVIDED BY URBAN SOIL TO IMPROVE URBAN PLANNING**

To face global urbanization and increasing pressure on natural resources, taking into account soil in city construction is becoming an unavoidable challenge towards more sustainable cities. This paper first aims at redefining the term urban soil by describing its variability and by assessing its representations by the stakeholders. Through a cross-study of urban planning documents on the one hand and interviews with these stakeholders on the other hands, it appears that soils are an overlooked part of urban ecosystems. However, they are actually considered as a resource by project owners, project managers and earthwork companies. The ecosystem services they can provide also emerge as a central concept linking experts (soil scientists, agronomists, urban designers) and decision-makers. Based on that, several proposals are made for the development of decision support tools to take into account the opportunities provided by soils at the scale of a project. Enriched by the latest advances of the Destisol project, the authors described a framework based on the evaluation of the ecosystem services potentially provided by urban soils, through the measurement of their physical, chemical, and biological properties..

Key-words

Urban soils; ecosystem services; planning; decision support tool; artificialization; fertility; contamination.

RESUMEN**TOMAR EN CUENTA LOS SERVICIOS ECOSISTÉMICOS PRESTADOS POR LOS SUELOS URBANOS:
una palanca para optimizar las estrategias de ordenación**

En el contexto mundial de urbanización creciente y de intensificación de las presiones sobre los recursos naturales, la toma en cuenta de los suelos en la ordenación urbana llega a ser un desafío imprescindible para producir ciudades más sostenibles. Este artículo propone precisar la definición del término de suelo urbano describiendo la variabilidad de lo que abarca y confrontándolo a sus representaciones por los actores del mundo del ordenamiento. A través de un estudio cruzado de documentos de urbanismo y la realización de entrevistas con estos actores, aparece que los suelos son un compartimiento de los ecosistemas urbanos cuyo el potencial es desconocido y subestimado, pero que son no obstante considerados como un recurso por los coordinadores de obras, los contratistas y las empresas de movimiento de tierra. Los servicios ecosistémicos que pueden prestar aparecen como un concepto central que permite hacer el vínculo entre los expertos (pedólogos, agrónomos, paisajistas) y los decisores. Sobre estas bases, formulamos una serie de sugerencias para el desarrollo de herramientas de ayuda a la decisión que permite tomar en cuenta las potencialidades de los suelos a escala del proyecto de ordenamiento. Inspirado del enfoque desarrollado en el proyecto Destisol, nuestras propuestas se basan en particular sobre la evaluación de los servicios ecosistémicos de los suelos urbanos a partir del análisis de sus características físicas, químicas y biológicas.

Palabras clave

Suelo urbano; servicios ecosistémicos; ordenamiento; herramienta de ayuda a la decisión; artificialización; fertilidad; contaminación.

Si les sols urbains ont été longtemps un sujet d'étude « exotique » dans le paysage scientifique, ils font aujourd'hui l'objet d'un intérêt croissant (de Kimpe et Morel, 2000; Schwartz *et al.*, 2001; Morel *et al.*, 2005). Les sols des territoires très anthropisés sont en effet au cœur d'enjeux sanitaires, environnementaux, fonciers et économiques majeurs. Cependant, il y a quelques décennies, les sols urbains et industriels étaient encore largement ignorés par les sciences du sol et parfois qualifiés de non-sols. La gestion des sols urbains s'est historiquement focalisée sur des approches sanitaires et économiques, respectivement en réponse à des crises sanitaires majeures induites par des contaminations des sols dues à des activités industrielles et en réponse à des pressions foncières. Ces démarches sont indispensables, en particulier afin de connaître et de limiter les risques de dissémination des polluants, dans un objectif de préservation de la santé humaine et des écosystèmes. Il ne s'agit alors pas de remettre en cause cette logique d'évaluation des risques liés à la contamination/pollution des sols, mais de l'étendre à des approches plus intégratrices de la qualité et de la multifonctionnalité des sols urbains.

Si les sols sont incontestablement un compartiment des écosystèmes urbains, la ville a évidemment besoin de sols fonctionnels. Un enjeu est alors d'intensifier la prise en compte des sols qui, au-delà de leur surface, constituent des volumes vivants et potentiellement fertiles pour la construction de la ville. Il apparaît alors nécessaire de dépasser les approches quasi-exclusivement limitées à une vision foncière, de surface. Le concept de service écosystémique est ainsi proposé comme un point de convergence et un élément de langage commun, compréhensible et appropriable par l'ensemble des acteurs concernés et impliqués dans la gestion des territoires urbains.

Dans ce contexte, plusieurs projets récents ont eu pour ambition de promouvoir une prise en compte de la qualité des sols en amont des projets d'aménagement, pour tendre vers une adéquation entre qualité des sols, couverture et usage (*e.g.* Uqualisol-ZU; Destisol; Destisol/AU; MUSE; SUPRA). Pour cela, la démarche adoptée s'appuie sur une traduction de paramètres d'état des sols en fonction des sols puis en services écosystémiques potentiellement rendus. Cette approche apparaît à la fois intégratrice de la complexité de l'objet sol, mais aussi comme une manière pertinente de communiquer sur leurs potentialités auprès des décideurs. Après avoir précisé la définition des sols urbains et les services écosystémiques qu'ils rendent, cet article analyse la prise en compte des sols dans les documents de planification et par les acteurs de l'aménagement, ainsi que les opportunités offertes par un outil d'aide à la décision qui permet d'intégrer tous les éléments présentés précédemment.

SOLS URBAINS ET SERVICES ÉCOSYSTÉMIQUES

Les sols urbains, un potentiel méconnu et sous-estimé

La polysémie du terme "sol urbain" rend son appréhension complexe. Avec une entrée spatiale, il peut décrire la couverture pédologique du milieu urbain; on considérera alors que tout sol situé dans une aire urbaine fait référence à un sol urbain. De manière complémentaire, le terme "sol urbain" est aussi fréquemment utilisé comme un synonyme de "sol anthropisé"; AnthropeSol, selon le Référentiel Pédologique Français (Baize et Girard, 2009) et TechnoSol selon la base de référence mondiale (IUSS Working Group, 2014). En ce sens, le sol urbain est la résultante à la fois d'activités anthropiques sur une certaine profondeur (apport de matériaux exogènes, décapage, compaction, contamination, fertilisation intense) et des facteurs de la pédogenèse (*e.g.* temps, climat, activité biologique, topographie). Plus précisément, et à des niveaux variables en fonction des référentiels ou classification, l'adjectif "anthropisé" ou "urbain" requiert un niveau d'anthropisation significatif du sol (que ce soit en termes d'abondance de matériaux d'origine anthropique ou exogène rapportés, ou d'intensité de l'anthropisation). Afin d'éviter le plus possible toute confusion, nous suggérons ici de distinguer de manière explicite le "sol urbain: couverture pédologique des aires urbaines" du "sol anthropisé: sol avec forte influence humaine". Il est alors possible d'affirmer que les sols urbains sont fréquemment des sols anthropisés, mais peuvent également être des sols (pseudo) naturels dans le sens où ils ont été très peu modifiés par l'Homme (*figure 1*). La proportion de sols anthropisés et naturels parmi les sols urbains peut varier significativement d'une aire urbaine à l'autre comme l'illustrent différents exemples européens (Schleuß *et al.*, 1998; Stroganova *et al.*, 1998; Sobocka, 2010; Nehls *et al.*, 2013; Hulisz *et al.*, 2018; Blanchart, 2018).

Les sols urbains se caractérisent par une forte diversité des usages: support de bâtiments (*e.g.* d'habitation, commerciaux, industriels), d'infrastructures (*e.g.* routières, ferroviaires), d'installations de loisirs (*e.g.* sportives, récréatives) ou encore production de biomasse (*e.g.* jardins potagers, parcs) sur une zone restreinte. Il apparaît alors que, malgré une forte proportion de sols scellés, ils se distinguent aussi par une gamme large de couvertures, partiellement scellées et/ou végétalisées (*figure 1*). Ces nombreux usages, fréquemment superposés dans le temps, peuvent se traduire par des modifications profondes de l'état initial du sol (Baumgartl, 1998). Il en résulte une forte hétérogénéité spatiale (de l'échelle centimétrique à décimétrique) à la fois verticale et horizontale de leurs propriétés physiques, chimiques et biologiques (Craul, 1992; Schwartz *et al.*, 2001; Morel *et al.*, 2005; Béchet *et al.*, 2009; Blanchart, 2018). Cette hétérogénéité

Figure 1 - Illustration de la diversité des sols rencontrés en milieu urbain : a) Sol pseudo-naturel en espace vert urbain surplombé d'une couverture naturelle ; b) Profil de Technosol urbain présentant plusieurs couches d'apports anthropiques ainsi qu'une couverture scellée (enrobé bitumineux, assise de chaussée et couche de forme). Crédit photographique : C. Schwartz, UL-INRAE.

Figure 1 - Illustration of the diversity of soils from urban areas: a) Pseudo-natural soil in urban green space with a natural cover; b) Urban Technosol profile with several layers of anthropogenic inputs with a sealed cover (asphalt mix, pavement base and sub-base layer). Photo credit : C. Schwartz, UL-INRAE.



implique une bien plus grande variété de sols en milieu urbain que dans d'autres milieux.

Au regard de leur fertilité, les sols urbains se singularisent à nouveau par une très forte dispersion des caractéristiques observées ou mesurées. En effet, si les concentrations moyennes de phosphore disponible et d'azote total des sols anthropisés sont peu différentes de celles des sols plus naturels, notamment forestiers et agricoles, elles présentent des amplitudes beaucoup plus fortes, témoignant des contrastes très marqués entre eux (Joimel *et al.*, 2016). Ceci est également vrai pour le carbone organique, mais dans ce cas, il est à noter que la valeur moyenne mesurée sur les sols anthropisés est supérieure à celle de tous les autres sols (Joimel *et al.*, 2016; Cambou *et al.*, 2020). Le recours massif au béton et autres liants hydrauliques explique qu'une très large majorité des sols anthropisés présente des pH nettement alcalins (Morel *et al.*, 2005). En effet, les sols urbains ont, en moyenne, des pH supérieurs à la neutralité (pH moyen = 7,6), avec une dispersion limitée, au contraire des sols agricoles (pH moyen = 7), des sols de prairie (pH moyen = 6) et forestiers

(pH moyen = 5) (Joimel *et al.*, 2016). En milieu urbain, il n'est pas rare de rencontrer des zones de scellement (béton, matériaux compactés) en surface ou en profondeur (Baumgartl, 1998). Les valeurs de masse volumique apparente rencontrées y sont extrêmes (moins de $0,5 \text{ g.cm}^{-3}$ jusqu'à plus de 2 g.cm^{-3}) (Morel *et al.*, 2005). L'incorporation de matériaux d'origine anthropique ainsi que le support ou la proximité d'activités humaines polluantes entraînent une pollution fréquente des sols urbains (Béchet *et al.*, 2009; El Khalil *et al.*, 2013), à la fois dans la fraction grossière et dans la terre fine (El Khalil *et al.*, 2008). Plusieurs travaux témoignent de concentrations moyennes en éléments traces métalliques supérieures dans les sols urbains par rapport aux autres sols (Ajmone-Marsan et Biasoli, 2010; Johnson et Ander, 2008; El Khalil *et al.*, 2008; El Khalil *et al.*, 2013; El Khalil *et al.*, 2016; Joimel *et al.*, 2016). Enfin, de récents travaux indiquent que les sols urbains présentent de réelles potentialités, sous-estimées, aussi bien en termes d'habitat pour la biodiversité (Joimel *et al.*, 2017) que pour le stockage de carbone (Cambou *et al.*, 2018; Cambou *et al.*, 2020).

Figure 2 - Chantier d'aménagement urbain avec terrassement, excavation et remaniement engendrant une importante déstructuration du sol en place. Crédit photographique : C. Schwartz, UL-INRAE.

Figure 2 - Urban construction site with earthworks, excavation and reshaping resulting in a significant degradation of the existing soil. Photo credit : C. Schwartz, UL-INRAE.



Les services écosystémiques rendus par les sols urbains

Les bénéfices que les populations humaines peuvent tirer des écosystèmes ou services écosystémiques (Costanza *et al.*, 1997) font l'objet d'études de plus en plus nombreuses car la gestion raisonnée et optimisée des écosystèmes apparaît indispensable à la viabilité de nos sociétés (Gómez-Baggethun et Barton, 2013 ; Boyd et Banzhaf, 2007). Malgré les impacts générés par les activités humaines (*figure 2*), les sols urbains peuvent contribuer à rendre des services écosystémiques essentiels à la viabilité des sociétés humaines. Pourtant, ils restent une ressource insuffisamment reconnue pour la conception et la construction de la ville durable (Morel *et al.*, 2014).

Etant donné que plus de 80 % de la population française vit en milieu urbain (INSEE, 2019), ceux-ci concentrent de nombreux enjeux environnementaux (*e.g.* atténuation de l'îlot de chaleur urbain, régulation du risque inondation, autosuffisance alimentaire, épuration des eaux pluviales) (Craul, 1992 ; Jenerette *et al.*, 2011 ; ONU, 2014). L'attention portée aux questions environnementales

est donc grandissante dans les zones urbaines (Bolund et Hunhammar, 1999 ; Chambers *et al.*, 2016). Ceci se traduit de manière emblématique par la place de plus en plus forte donnée au végétal en ville. Il y joue un rôle social, culturel et écologique (Nielsen et Hansen, 2007). Support de croissance des végétaux, le sol est donc un compartiment essentiel de l'écosystème urbain, contribuant directement ou indirectement à notre qualité de vie (de Hollander et Staatsen, 2003 ; van Kamp *et al.*, 2011). Toutefois, les sols urbains sont rarement perçus comme étant multifonctionnels et par là même une ressource potentielle de services écosystémiques. Les travaux menés jusqu'à présent se réfèrent à des sujets spécifiques, tels que le stockage du carbone dans les sols urbains (Davies *et al.*, 2011 ; Jim et Chen, 2009 ; Pouyat *et al.*, 2006 ; Cambou *et al.*, 2020) ou la régulation de l'îlot de chaleur urbain (Cameron *et al.*, 2012 ; Jenerette *et al.*, 2011 ; Lehmann *et al.*, 2014 ; Norman *et al.*, 2012). Le rôle du sol en milieu urbain, en tant qu'écosystème capable de fournir un plus large éventail de services écosystémiques, est aujourd'hui peu abordé dans la littérature scientifique (Morel *et al.*, 2014 ; Schwartz *et al.*, 2015 ; Blanchart *et al.*, 2018). Cependant, dans une logique de gestion

raisonnée des sols et en vue d'une optimisation de l'organisation territoriale, il apparaît nécessaire dans le développement des villes de tirer avantage de tous les écosystèmes, y compris des environnements fortement anthropisés (Gómez-Baggethun et Barton, 2013; Damas et Coulon, 2016).

Vers une proposition de classification des services écosystémiques fournis par les sols urbains

En vue de concilier à la fois les « services urbains » rendus par la ville (e.g. activité économique, transports, services de santé) et les « services écosystémiques » rendus par les écosystèmes, les sols des milieux urbains nécessitent fréquemment d'être aménagés, c'est-à-dire modifiés par l'Homme. Une proposition de classification des services écosystémiques des sols urbains a été précédemment faite au sein du projet Destisol et reprise par Blanchart *et al.* (2017) (*tableau 1*) qui se sont appuyés sur les recommandations de nombreux auteurs (Escobedo *et al.*, 2011). Ils ont en particulier avancé une adaptation des listes de services écosystémiques proposées dans la littérature en y intégrant ceux qui sont jugés pertinents au regard des enjeux spécifiques de l'espace urbain et des rôles du sol dans ces milieux (Costanza *et al.*, 1997; de Groot *et al.*, 2002; MEA, 2005; Wallace, 2007; Fisher et Turner, 2008; Fisher *et al.*, 2009; Walter *et al.*, 2015; Adhikari et Hartemink, 2016). Cette liste se compose de trois catégories de services écosystémiques (régulation, approvisionnement et culture) en excluant la mention de services supports. Cela se justifie par la proposition faite par la classification internationale commune des services écosystémiques (Haines-Young et Potschin, 2011), qui prend en considération les services de support comme des prestations écosystémiques intermédiaires en ne les incluant pas de fait dans l'inventaire de services écosystémiques finaux. De plus, cette liste a été adaptée au contexte urbain ce qui a conduit à ouvrir la catégorie des services d'approvisionnement à des services tels que l'accueil d'activités humaines, le support d'infrastructures ou la fourniture de ressources ornementales qui sont des questions essentielles en matière d'urbanisme. Chacun des services écosystémiques fournis directement par le sol, et souvent par le couple sol-végétation en milieu urbain, est détaillé par Blanchart *et al.* (2017).

Cette classification a ensuite été confrontée à la perception qu'ont les acteurs de l'aménagement en ville. Cette confrontation a conduit à une simplification (qui fût notamment utilisée dans le projet Destisol, *tableau 2*) basée sur : i) la compréhension que pouvaient avoir les acteurs de l'aménagement urbain de cette classification en tant qu'outil d'aide à la décision ii) la capacité à traduire une observation et/ou des analyses pédologiques et une occupation du sol en services écosystémiques avec une approche semi-quantitative. En effet, aujourd'hui plusieurs études tendent à une quantification d'un niveau de services écosystémiques rendus par les sols *via* l'utilisation de proxy

ou d'indicateurs (morphologiques, physiques ou chimiques) témoignant des fonctions des sols (ou processus) (Fossey *et al.*, 2020).

QUELLE PERCEPTION PAR LES ACTEURS DE L'AMÉNAGEMENT DES SERVICES ÉCOSYSTÉMIQUES RENDUS PAR LES SOLS

Dans les documents d'urbanisme

Les documents de planification sont considérés en France comme le reflet direct de la vision politique que portent les collectivités territoriales sur leur territoire et des moyens et décisions qu'elles mettent en œuvre pour agir (Blanchart, 2018). Ce sont des documents publics, régissant l'aménagement d'un territoire à une échelle définie (e.g. Région, Département, intercommunalité, commune, bassin versant) et permettant de garantir un équilibre « entre le renouvellement urbain, un développement urbain maîtrisé, le développement de l'espace rural, d'une part, et la préservation des espaces affectés aux activités agricoles et forestières et la protection des espaces naturels et des paysages, d'autre part, en respectant les objectifs du développement durable » (Code de l'Urbanisme, article L.121-1). Ces documents ont également des objectifs définis : certains traitent du logement à l'instar du programme local de l'habitat (PLH), des transports comme le plan de déplacements urbains (PDU), de la biodiversité comme le schéma régional des cohérences écologiques (SRCE), du climat comme le schéma régional du climat, de l'air et de l'énergie (SRCAE) ou encore de l'eau à l'instar du schéma d'aménagement et de gestion des eaux (SDAGE). Enfin, en plus d'être liés à une échelle et une thématique précise, une des spécificités de ces documents de planification est qu'ils sont soumis entre eux à un rapport normatif (*figure 3*). Selon les cas, ces documents doivent être conformes (niveau d'opposabilité le plus contraignant), compatibles ou prendre en compte (niveau d'opposabilité le moins contraignant) les documents d'échelle supérieure (*figure 3*).

Une analyse lexicale de documents de planification au sein de 15 aires urbaines françaises a permis de quantifier les occurrences du mot « sol » et de préciser quelle considération y était systématiquement rattachée : à un sol-surface (approche foncière dans l'aménagement du territoire, où le sol est une surface qui permet d'accueillir différents usages) ou à un sol-ressource (sol entendu du point de vue du pédologue et de l'agronome : comme volume en trois dimensions, un système ayant des caractéristiques physiques, chimiques et biologiques variables dans le temps et l'espace et ayant la capacité de fournir des bienfaits aux sociétés humaines) (Blanchart, 2018).

Tableau 1 - Proposition de classification des services écosystémiques rendus par les sols urbains (Blanchart *et al.*, 2017)**Table 1:** Classification proposal for ecosystem services provided by urban soils (Blanchart *et al.*, 2017)

| Classes | Services | Catégories de services | |
|-----------------------|---|--|--|
| Régulation | Régulation de la qualité de l'air | CO ₂ | |
| | | O ₃ | |
| | | Particules fines (poussières) | |
| | | Pluies acides | |
| | Régulation du climat | Climat local | |
| | | Climat global | |
| | | Climat d'intérieur | |
| | Traitement des déchets | Stockage | |
| | | Recyclage | |
| | Purification de l'eau | Dégradation des polluants | |
| | Régulation des aléas naturels | Tempêtes | |
| | | Inondations | |
| | | Séismes, mouvements de terrains | |
| | | Erosion | |
| Parasites et maladies | | | |
| Céréales et légumes | | | |
| Approvisionnement | Aliments | Fruits | |
| | | Viande | |
| | | Poissons et fruits de mer, crustacés | |
| | | Champignons | |
| | | Energie | Solaire |
| | | | Eolien |
| | Biomasse | | |
| | Géothermie autre | | |
| | Géothermie (puits provençaux/canadiens) | | |
| | Habitat pour la faune | Habitat pour la biodiversité | |
| | | Réservoir de ressources génétiques | |
| | Support physique d'infra/super structures | Voirie super lourde | |
| | | Voirie lourde | |
| | | Voirie légère | |
| | | Voie ferrée | |
| | | Réseaux VRD | |
| | | Espaces publics (places, parcs...) | |
| | | Bâtiment sans fondation | |
| | | Bâtiment léger avec fondations | |
| | | Bâtiments "lourds" avec fondations | |
| | | Accueil d'activités humaines | Activités très sensibles (e.g. école, centre de soins) |
| | Activités sensibles (e.g. résidentiel, agriculture) | | |
| | Activités peu sensibles (e.g. commerce, industrie) | | |
| | Ressources ornementales | Pelouses | |
| | | Arbustes | |
| | | Arbres | |
| | | Fleurs | |
| Culturel | Conservation patrimoine / histoire | Patrimoine / histoire / archéologie / pédagogie / symbolique/ mémoire | |
| | Attrait de l'environnement | Activités sportives et de loisirs en extérieur | |
| | | Paysage / Contemplation / esthétique / aménités liées à la présence de la nature | |
| | | Tourisme | |
| | | Spirituel / culturel | |

Tableau 2 - Proposition de classification des services écosystémiques rendus par les sols urbains susceptibles d'être évalués dans le cadre de la création d'un outil d'aide à la décision.

Table 2 - A proposed classification of the ecosystem services provided by urban soils that can be evaluated as part of the development of a decision-support tool.

| Classes | Services | Catégories de services |
|------------------------------|--|-------------------------------|
| Régulation | Régulation de la qualité de l'air | |
| | Régulation du climat | Climat local Climat global |
| | Régulation des aléas naturels | Inondations Erosion |
| | Stockage des déchets | |
| | Purification de l'eau | |
| | | |
| Approvisionnement | Habitat pour la biodiversité | |
| | Aliments | |
| | Ressources ornementales | Herbacées / Fleurs |
| | | Arbustes |
| | | Arbres |
| | Energie | Production de biomasse |
| | Support physique d'infrastructures / superstructures | Voirie légère / stationnement |
| | | Voirie lourde |
| | | Bâtiment |
| Réseaux VRD | | |
| Support d'activités humaines | Activités sensibles et très sensibles (e.g. école, centre de soins, résidentiel) | |

Figure 3 - Hiérarchie des documents d'urbanisme français et liens d'opposabilité, d'après l'Agence Scalen - Blanchart, 2018.

Figure 3 - Hierarchy of French urban planning documents and opposability links, according to the Scalen Agency - Blanchart, 2018.

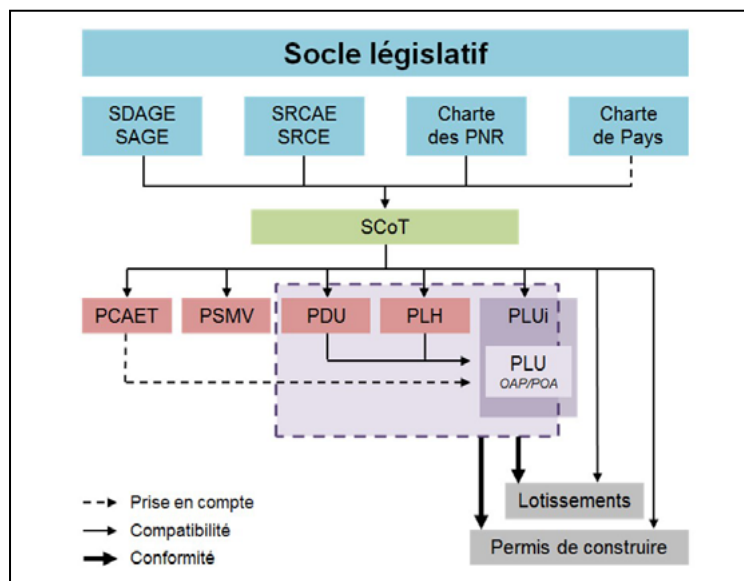


Tableau 3 - Liste des documents de planification étudiés pour l'analyse lexicale - Blanchart, 2018.**Table 3** - List of planning documents considered for lexical analysis - Blanchart, 2018.

| Document de planification | Portée principale | Thématique principale | Echelle d'application |
|---|---|------------------------|-----------------------|
| PLU : Plan local d'urbanisme | Principal document de planification de l'urbanisme, niveau communal ou intercommunal | Occupation du sol | Locale |
| PDU : Plan de déplacements urbains | Document de planification qui détermine l'organisation du transport des personnes et des marchandises, la circulation et le stationnement | Transport | |
| PLH : Programme local de l'habitat | Principal dispositif en matière de politique du logement au niveau local | Habitat | |
| ScoT : Schéma de cohérence territoriale | Document de planification qui détermine, à l'échelle de plusieurs communes ou groupements de communes, un projet de territoire visant à mettre en cohérence l'ensemble des politiques sectorielles notamment en matière d'habitat, de mobilité, d'aménagement commercial, d'environnement et de paysage | Occupation du sol | Intercommunale |
| SRCAE : Schéma régional du climat, de l'air et de l'énergie | Il décline aux échelles régionales une partie du contenu de la législation européenne sur le climat et l'énergie | Climat, air et énergie | Régionale |
| SRCE : Schéma régional de cohérence écologique | Schéma d'aménagement du territoire et de protection de certaines ressources naturelles (biodiversité, réseau écologique, habitats naturels) et visant le bon état écologique de l'eau imposé par la directive cadre sur l'eau | Ecologie | |
| SDAGE : Schéma d'aménagement et de gestion des eaux | Document de planification ayant pour objet de mettre en œuvre les grands principes de la loi sur l'eau du 03/01/92 | Eau | Bassin versant |

L'analyse lexicale générale se voulait la plus exhaustive possible, afin d'être représentative de l'ensemble des documents afférents aux politiques publiques locales. A cet égard, ce sont 7 documents de planification qui ont été sélectionnés, correspondant chacun à une échelle de territoire et une thématique d'étude différente (tableau 3).

Enfin, la sélection des aires urbaines s'est faite en considérant les 20 plus grandes aires urbaines de France (INSEE, 2016) ainsi que leurs communes. Ce panel d'aires urbaines a l'avantage de présenter des caractéristiques démographiques, géographiques, climatiques différentes, reflétant ainsi l'hétérogénéité des aires urbaines françaises. Cinq aires urbaines ont dû être retirées de l'analyse car leurs documents d'urbanismes n'étaient pas consultables en ligne.

Cette analyse lexicale révèle que la moyenne d'occurrence du terme « sol » est beaucoup plus faible que les moyennes d'occurrences des termes « transport », « logement », « eau » et « végétation » dans les documents étudiés (figure 4).

Elle a également permis de mettre en exergue le fait que le SCoT, le SRCAE ou encore le SDAGE appréhendent majoritaire-

ment le sol en tant que ressource (figure 5). À l'inverse, certains documents de planification, et notamment ceux ayant trait à la planification locale, appréhendent majoritairement le sol comme une surface foncière (figure 5).

Révélee par une démarche quantitative, cette différence de considération du « sol-ressource » dans les documents d'urbanisme se retrouve également dans leur analyse qualitative. Dans les PLU, le terme « sol » est fortement lié aux notions d'occupation et d'utilisation du sol, de coefficient d'emprise au sol, d'aptitude des sols à recevoir un système d'assainissement des eaux usées, d'artificialisation des sols ou encore de pollution des sols. Dans les ScoT, il est fait référence à la protection des sols agricoles et forestiers. La lecture des SRCAE indique que, dans ces documents, le terme sol est principalement lié à la notion d'adaptation au changement climatique et de pollution du sol dans une logique de préservation de la qualité de l'air. Le terme « sol » au sein du SRCE concerne principalement l'idée que les sols sont des supports d'habitats pour la biodiversité. Enfin, dans les SDAGE, ce terme renvoie principalement à la notion de service que rend le sol pour la régulation des eaux (e.g. « quantité d'eau

Figure 4 - Indices d'occurrences des mots étudiés dans l'analyse lexicale de 105 documents d'urbanisme français - Blanchart, 2018.

Figure 4 - Occurrence Indices for the words studied in the lexical analysis of 105 French urban planning documents - Blanchart, 2018.

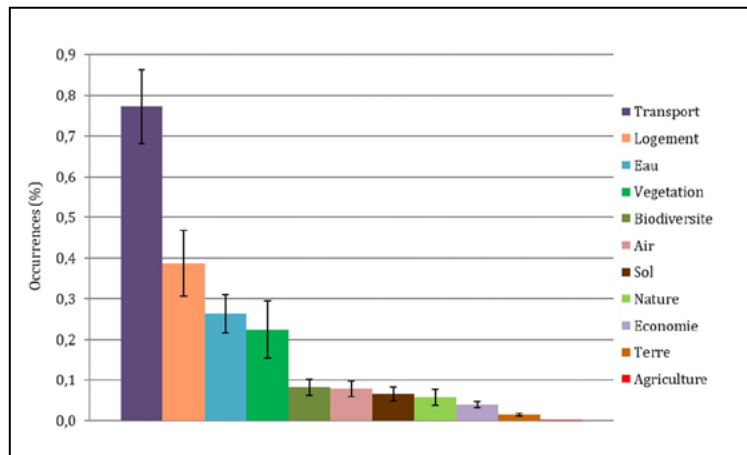
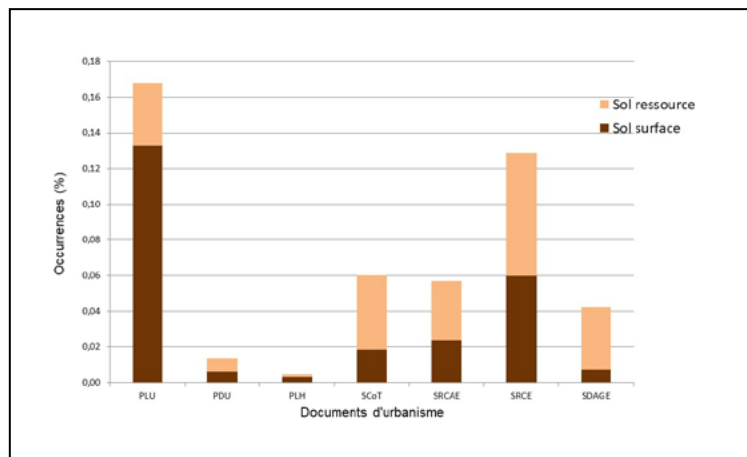


Figure 5 - Indices d'occurrences de « sol-surface » et « sol-ressource » par document d'urbanisme pour les 105 documents de planification étudiés - Blanchart, 2018.

Figure 5 - Indexes of "soil-surface" and "soil-resource" occurrences per planning document for the 105 planning documents studied - Blanchart, 2018.



dans les sols », « absorber l'eau du sol ») et pour la purification des eaux (e.g. « fixation des polluants ») dans un contexte de préservation de la qualité de l'eau d'un point de vue de la santé humaine.

Dans l'urbanisme opérationnel

Cette analyse des documents d'urbanisme a été complétée par une enquête dans le secteur de l'urbanisme opérationnel réalisée sous la forme d'entretiens auprès d'acteurs provenant de différents corps de métiers dans différents secteurs (société d'aménagement, maîtrise d'ouvrage (MOA), maîtrise d'œuvre (MOE) et BTP), dans des régions différentes (Marseille, Nantes, Nancy) et travaillant sur différents projets d'urbanisme (écoquartier, rénovation urbaine et extension urbaine) (Blanchart, 2018). Cette enquête a montré que les acteurs de l'urbanisme opérationnel n'ont pas tous la même perception du sol en fonction de leur profession. En effet, les acteurs de chantier (BTP), de la maîtrise d'ouvrage (MOA) et les aménageurs présentent tendanciellement une plus faible considération du sol comme ressource que les

acteurs de la maîtrise d'œuvre (MOE). L'analyse des entretiens a fait apparaître que les acteurs intervenant sur des projets urbains de rénovation urbaine ont une plus forte considération du sol en tant que ressource que les acteurs intervenant sur des projets d'écoquartiers et d'extension urbaine. Lorsqu'il a été proposé aux acteurs de l'aménagement d'énumérer eux-mêmes les services rendus par les sols urbains qu'ils jugent prioritaires lors du développement d'un projet urbain, ce sont le support au développement des végétaux, le support de ce qu'ils ont appelé le « système géographique » (e.g. paysage, espaces verts, espaces publics, espaces privés, infrastructures) et la gestion de l'eau, ainsi que la régulation du climat local qu'ils ont mis en avant.

Lorsqu'une liste de services écosystémiques potentiellement rendus par les sols en milieu urbain leur est proposée afin qu'ils leur attribuent une note (Blanchart, 2018), les acteurs interrogés allèguent alors majoritairement que le sol urbain peut: (i) participer à la régulation des aléas naturels (érosion, inondation), (ii) permettre le développement de ressources ornementales, (iii) garantir le support d'infrastructures et (iv) le support des activités

humaines, (v) être un lieu d'habitat pour la biodiversité et enfin (vi) permettre la bonne gestion des eaux (figure 6). D'autres services leur semblent beaucoup plus secondaires: (i) la production d'énergie, (ii) la production de biomasse, (iii) la régulation de la qualité de l'air et iv) la régulation du climat global. Il apparaît que ces services sont beaucoup moins connus que les précédents par les acteurs de projets urbains.

Les résultats de cette étude menée aux échelles de la planification du territoire et de l'urbanisme opérationnel tendent à indiquer que les professionnels de l'aménagement du territoire ont su développer une vision du sol comme système fonctionnel au cours de ces dernières années, capable notamment de répondre à des objectifs réglementaires (e.g. trame verte et bleue, protection de la biodiversité, risques d'inondation) ou en voie de développement (e.g. jardins partagés, familiaux). Cependant, cette approche systémique ne semble pas encore leur permettre d'appréhender l'intégralité des bienfaits offerts par les sols urbains lors du développement d'un projet urbain (Blanchart *et al.*, 2018).

Il est donc important de proposer un outil qui aide les acteurs à appréhender les systèmes complexes que sont les sols et les services qu'ils offrent dans le cadre d'un projet d'aménagement.

VERS UNE PROPOSITION D'OUTIL D'AIDE À LA DÉCISION

Philosophie de l'outil d'aide à la décision

A partir de l'ensemble des éléments précédemment exposés, il apparaît nécessaire de favoriser le développement d'une ville durable en valorisant au mieux les possibilités offertes par les sols dans l'aménagement urbain. Ceci peut alors se traduire - comme c'est le cas notamment dans les projets Uqualisol-ZU (Robert, 2012), Destisol, Destisol/AU, MUSE et SUPRA - par une méthode d'évaluation des potentialités des sols en termes d'usages et de

services écosystémiques. À l'échelle d'un projet d'aménagement, il s'agit alors, non seulement de prendre en compte la compatibilité entre usages et qualité des sols en place, mais aussi de montrer l'apport d'un projet en termes de services écosystémiques, voire de comparer plusieurs projets entre eux.

Un tel outil doit guider les aménageurs en amont de leurs projets sans être une contrainte (financière et technique), mais plutôt une opportunité (réduction des intrants notamment en terre végétale, réduction des coûts de traitement ou des travaux sur les sols). Il peut alors dans un premier temps être utilisé pour des projets d'aménagement de l'échelle de l'îlot à celle du quartier. Cette échelle permet en effet une certaine flexibilité dans la conception du projet, là où l'échelle territoriale induit de fait une complexité en termes de gouvernance et d'ingénierie, et là où l'échelle du projet immobilier présente moins de possibilités d'adaptation (taille du terrain, contraintes urbanistiques, porteur de projet...).

Dans cette logique, il est alors possible d'envisager une estimation du niveau de services écosystémiques rendus sur un site aménagé. Dans un premier temps, notre recommandation serait de se tourner vers une évaluation semi-quantitative, considérant les nombreuses difficultés et écueils encore aujourd'hui inhérents à l'évaluation des services écosystémiques (comme la monétarisation, pour citer la plus controversée (Ay *et al.*, 2020)). Nos réflexions nous ont aussi amenés à proposer une évaluation systématique en notes allant de 0 à 3. Les règles de décision offrent alors la possibilité d'avoir 4 niveaux d'interprétation, mais, bien sûr, dans les calculs, des valeurs intermédiaires peuvent être obtenues. Quatre nous a semblé un compromis intéressant entre l'expression de la complexité des questions posées (e.g. interpréter en termes de fertilité des valeurs de pH, exprimer la compatibilité entre un sol donné et une occupation recherchée, évaluer la capacité d'un sol donné à rendre plus ou moins bien un service écosystémique) et la facilité de mise en œuvre (e.g. déterminer des gammes de valeur au sein d'un référentiel, réaliser des calculs, fixer des règles de décision). Cette évaluation devrait

Figure 6 - Services considérés comme importants par les acteurs de projets urbains (services notés) - Blanchart, 2018.

Figure 6 - Services considered important by urban project actors (rated services) - Blanchart, 2018.

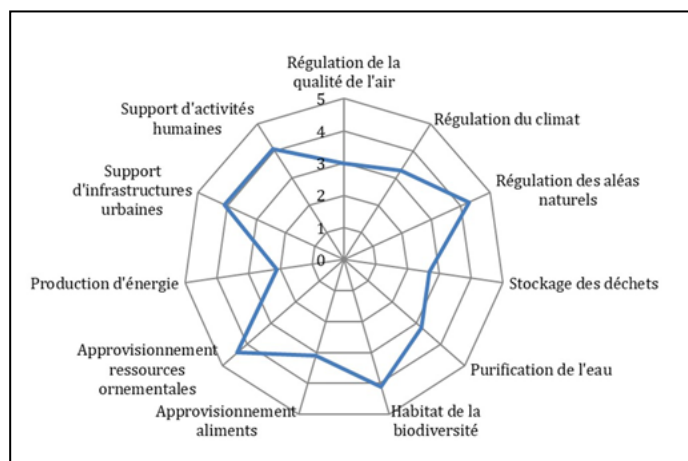


Figure 7 - Présentation de la démarche d'évaluation de services écosystémiques mise en œuvre dans le projet Destisol.

En haut à droite de la figure, intitulé « Projet 1 », il s'agit du plan masse d'un projet sur un site à aménager sans tenir compte d'un outil d'aide à la décision.

Le concept de l'outil d'aide à la décision est décrit dans l'encadré orange à gauche.

Cela débute en :

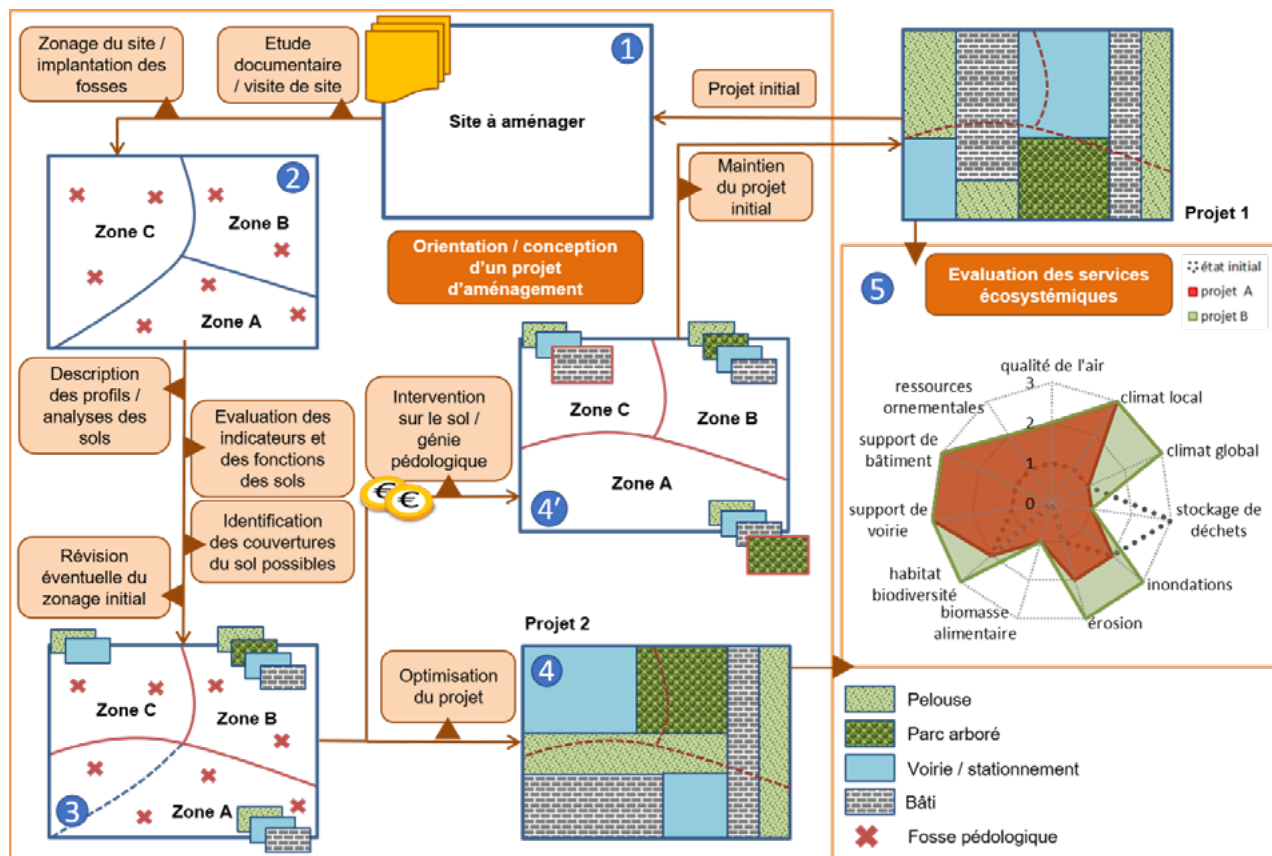
- (1) par l'étude d'un site à aménager (cf. partie 4.2: Étape 1) permettant de proposer un zonage.
- (2) pour chaque zone, plusieurs fosses pédologiques sont ouvertes, un profil de sol moyen est décrit, des analyses sont effectuées. Les indicateurs sont mesurés et les fonctions des sols sont calculées (cf. partie 4.3: Étape 2). Cela permet d'obtenir (3) les couvertures compatibles avec les propriétés du sol (cf. partie 4.4: Étape 3).
- (4) l'aménageur peut alors décider d'optimiser son projet en fonction des couvertures conseillées ou (4') d'intervenir sur le sol pour le rendre compatible à son projet d'aménagement.
- (5) Les services écosystémiques sont calculés en fonction du projet d'aménagement choisi. Les projets peuvent être comparés les uns aux autres.

Figure 7 - Presentation of the ecosystem services valuation approach implemented in the Destisol project.

In the upper right-hand corner of the figure, entitled "Project 1", it is the blueprint of a project on a site scheduled for construction, without consideration a decision-support tool.

The concept of the decision support tool is described in the orange box on the left.

- (1) Study of the site (cf. part 4.2: Step 1) and site zoning
- (2) or each zone several soil pits are opened, an average soil profile is described, and soil sample analyses are carried out. Indicators are assessed or measured and soil functions are computed (see part 4.3: Step 2). This allows to obtain (3) the covers compatible with the soil properties (cf. part 4.4: Step 3).
- (4) can then decide to optimize his project according to the suggested covers or (4') to intervene on the soil to make it compatible with his initial project.
- (5) Ecosystem services are computed according to the selected project. Projects can be compared with one another.



être conduite sur la base d'indicateurs¹ des sols acquis aussi bien que par des observations/descriptions sur le terrain que sur l'analyse de paramètres bio-physico-chimiques d'échantillons représentatifs de la diversité de la couverture pédologique du site d'étude. Les interactions existantes entre indicateurs du sol, fonctions du sol, couvertures du sol et services écosystémiques doivent ensuite être retranscrites dans un outil de calcul ou par un système de notation dûment référencés (c'est-à-dire avec un référentiel explicite associant des gammes de valeurs à des notes) et justifiés (c'est-à-dire supportés par des références bibliographiques ou par des dires d'expert). Dans la logique de notre proposition, plusieurs étapes sont nécessaires à la mise en œuvre de cette méthode (figure 7).

Étape 1 : Etude et diagnostic

La première est une phase d'étude et de diagnostic qui doit permettre de définir des zones de sol homogènes à l'échelle du site et d'obtenir les indicateurs du sol à saisir dans l'outil (figure 7). Ce travail s'effectue tout d'abord par la collecte de données documentaires (e.g. historique, contexte géologique, hydrogéologique, topographie, analyse de photos aériennes). Cette recherche « au bureau » est alors complétée par une visite de site qui doit permettre de compléter les premières informations recueillies par, notamment, des observations sur la densité et la nature de la végétation, les traces visibles en surface d'activités biologiques, l'observation d'échantillons de sol prélevés par exemple à la tarière à main ou encore la réalisation de mesures de terrain simples et rapides (Béchet *et al.*, 2018). Ceci permet alors de pré-positionner des zones de sol homogènes. Sur chacune de ces zones, nous recommandons alors de réaliser *a minima* 3 profils de sol par l'ouverture de fosses pédologiques dont les caractéristiques sont décrites sur le terrain et pour lesquelles des échantillons sont prélevés afin de réaliser des analyses en laboratoire (figure 7). Une étape délicate est évidemment la réalisation d'une synthèse générant un profil de sol modèle par zone sur la base de l'ensemble des profils réalisés. Il nous semble également pertinent, dans un premier temps, de choisir de manière avisée les indicateurs retenus afin que les coûts d'investigation soient acceptables pour une étude intervenant à un stade amont de projets d'aménagement. En effet, la mobilisation de nombreux indicateurs augmente la fiabilité du diagnostic mais augmente également le coût et la complexité de la mise en œuvre de l'outil.

Étape 2 : Transformation des indicateurs en fonctions

Cette première phase d'obtention des indicateurs peut alors être suivie d'une phase de calcul/détermination en quatre étapes. Dans un premier temps, les fonctions rendues par le sol en lui-même sont évaluées sur la base d'un référentiel d'interprétation de paramètres d'état - ici appelés indicateurs - adaptés à chaque fonction (figure 7), chaque fonction étant l'agrégation d'un certain nombre d'indicateurs. Par exemple, la fonction infiltration de l'eau pourrait - *a minima* - dépendre des indicateurs suivants: pente, profondeur du sol, hydromorphie, puis intégration pour les différents horizons de la structure pédologique, de la texture, de la compacité et de la charge en éléments grossiers. Il est important de souligner ici qu'un même paramètre peut disposer d'un référentiel différent selon la fonction considérée (e.g. une structure de sol particulaire est très favorable à l'infiltration de l'eau, mais défavorable à la rétention d'eau utile pour les plantes). Une question ouverte est ici celle de la pondération de certains indicateurs pour l'évaluation des fonctions. Nous recommandons pour l'instant de se contenter d'avoir des indicateurs dits « déclassant » (i.e. si la note de cet indicateur est nulle, ceci annule la note de la fonction, quelles que soient les notes des autres indicateurs).

Étape 3 : Évaluation des couvertures compatibles

À ce stade, nous suggérons l'implémentation d'une étape rarement considérée dans les travaux que nous avons recensés. Nous proposons en effet, sur la base des notes des fonctions obtenues lors de l'étape précédente, d'évaluer les occupations de sol - que nous appellerons « couvertures de sol » - compatible avec l'état des sols (figure 7). Pour cela, nous avons établi une liste de neuf couvertures, sur la base de classifications existantes. Elles sont classées en fonction du degré d'imperméabilité du sol (bâti, voies de circulation, sol nu, pelouse et prairies urbaines, jardin potager et ornemental, arbustes, arbres...). Les couvertures dites « compatibles » sont des couvertures que le sol peut accueillir en l'état, sans modification de ses caractéristiques intrinsèques. À titre d'exemple, un sol fertile mais peu profond peut, *a priori*, accueillir une couverture du type « pelouse ». En revanche, fortement limité en termes de capacités offertes pour l'enracinement, il ne constitue pas un substrat éligible pour l'accueil d'espèces arborées.

Étape 4 : Prise en compte de l'influence des couvertures sur les fonctions

Il est évident que la couverture du sol influence la nature et le fonctionnement de l'écosystème. Par exemple, l'imperméabilisation d'un sol par un bâtiment ou une voirie annule la fonction « infiltration de l'eau » initialement remplie par ce sol, alors

¹ Indicateur : paramètre d'état assorti d'un référentiel d'interprétation

que cette dernière est améliorée par l'implantation d'un couvert végétal. La phase suivante consiste donc à une réévaluation des notes attribuées à certaines fonctions du sol. En d'autres termes, il s'agit d'évaluer les fonctions remplies par chaque couple [sol ; couverture]. Il nous semble ici pertinent d'affecter des règles de décision en détaillant comment chaque fonction du sol est affectée par chaque couverture. Une matrice peut alors être produite qui s'appliquera à toutes les couvertures dites compatibles. À nouveau, les règles à appliquer peuvent être discutées. Dans le cadre du projet Destisol, nous proposons 4 règles : i) la couverture annule la fonction ; ii) la couverture divise par deux la note de la fonction ; iii) la couverture ne modifie pas la note de la fonction ; iv) la couverture multiplie par deux la note de la fonction.

Étape 5 : Évaluation des services écosystémiques fournis par un couple sol-couverture

Les services écosystémiques peuvent alors être estimés pour chaque couple [sol ; couverture]. Par agrégation, une évaluation peut même être faite à l'échelle de tout le site aménagé (figure 7). Nous recommandons que cette étape soit effectuée encore une fois par agrégation des notes des fonctions corrigées par les couvertures pour chaque service écosystémique. À titre d'exemple, le service de régulation du climat local, directement relié à la capacité d'un site à contribuer à l'atténuation de l'îlot de chaleur urbain, pourrait être approché par les processus d'évaporation et de transpiration ; ce service pourrait donc être estimé sur la base de la note de la fonction « fertilité » (décrivant la capacité du sol à permettre le développement de la végétation) et de la fonction « rétention de l'eau » (décrivant la capacité du sol à retenir de l'eau susceptible d'être évaporée). Notre expérience durant le projet Destisol nous amène à suggérer à de potentiels développeurs qu'il peut être pertinent d'effectuer une pondération des fonctions dans cette nouvelle étape d'évaluation. Dans l'exemple précédent, nous avons par exemple considéré que le poids de la fonction « fertilité » était plus fort que celui de la fonction « rétention de l'eau », ce que nous avons traduit par l'utilisation de différents facteurs multiplicatifs au moment du calcul du service.

Quelles fonctionnalités offertes par un tel OAD* ?

Il nous semble alors possible qu'un OAD développé dans le cadre décrit ci-dessus puisse en premier lieu constituer une aide à la décision portant sur le choix de la couverture du sol, c'est-à-dire sur la nature des aménagements et surtout sur

leur localisation sur le site. L'OAD peut en effet indiquer à son utilisateur si, en l'état, les sols de chacune des zones identifiées sur le site permettent ou non d'assurer telle ou telle couverture. Deux stratégies s'offrent alors à l'aménageur :

- Maintenir le projet initial, sous réserve d'intervenir sur le sol afin d'en modifier les caractéristiques (e.g. apport de terre végétale, chaulage, dépollution) en cas d'incompatibilité entre le sol en place et la couverture envisagée (figure 7).
- Modifier le projet en prenant en compte les résultats de l'OAD et en modifiant la localisation de ces aménagements afin d'exploiter les potentialités des sols en place conduisant ainsi à limiter le coût de l'aménagement (figure 7).

De plus, un tel OAD peut contribuer à modifier la manière d'appréhender l'aménagement. En effet, en appréhendant le projet sous l'angle de niveaux de services écosystémiques rendus, l'aménageur peut chercher à optimiser certains services qui paraissent prioritaires au regard d'enjeux locaux (e.g. limiter les risques d'inondations, créer du bâti pour le logement ou les activités économiques) ou pour traduire les ambitions stratégiques du projet en termes de développement durable (e.g. favoriser la biodiversité, lutter contre l'îlot de chaleur urbain).

Nous faisons l'hypothèse que ce type de démarche peut être déployé par les maîtrises d'ouvrages, mais aussi les maîtrises d'œuvre pour la conception d'une ville durable dans laquelle le sol est valorisé comme une ressource et non plus comme une surface foncière ou - comme c'est fréquemment le cas en milieu urbain - un déchet dont il faudrait se débarrasser pour le remplacer par de la terre végétale provenant des zones rurales plus ou moins éloignées.

CONCLUSION

Au moment où la prise de conscience environnementale est en plein essor dans la société française, la nécessité de mieux gérer les espaces urbains pour limiter leurs impacts négatifs sur les écosystèmes constitue aussi une réelle opportunité de s'intéresser aux sols urbains. Les sols urbains doivent désormais être définis comme étant la couverture pédologique localisée dans l'aire urbaine. Ils intègrent de ce fait des sols anthropisés mais aussi des sols (pseudo-)naturels. Invisibles dans leur profondeur bien sûr - comme tous les sols -, mais surtout hétérogènes compte tenu de la complexité de l'histoire et des changements d'usages et de couvertures qui les ont façonnés. Les sols urbains ne doivent surtout plus être considérés *de facto* comme dégradés ou contaminés comme c'est trop fréquemment le cas actuellement, conduisant à les décaper et à les envoyer en centre de stockage de déchets inertes. Les propositions que nous formulons ici, et qui ont été conduites dans le cadre du projet Destisol, se fondent sur une classification des services écosystémiques rendus par les sols urbains. Une étude réalisée à partir de l'analyse de nombreux documents d'urbanisme et auprès des acteurs de l'aména-

* OAD : Outil d'Aide à la Décision

gement urbain a permis de mettre en exergue une hétérogénéité de la prise en compte de la ressource sol au sein des documents de planification et une perception variable des services rendus par les sols par les acteurs de l'urbanisme opérationnel. Cependant, notre travail a aussi permis de montrer une attente et une adhésion au fait que les sols des milieux urbains représentent un compartiment indispensable à considérer pour construire des villes plus durables. Dans ce cadre, la démarche décrite ici vise à dépasser les *a priori* souvent négatifs qui leur sont attachés pour évaluer de manière objective leurs potentialités dans la démarche d'aménagement urbain. Plus globalement, l'enjeu est alors, par l'usage de concepts nouveaux, d'approches et d'outils, de créer une acculturation, de permettre à d'autres disciplines que la pédologie de s'approprier le sol en tant qu'écosystème fonctionnel. Il est alors possible de se prendre à rêver à ce que serait la ville durable de demain si la qualité de ses sols était le fil conducteur de la stratégie de son développement.

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier l'ADEME, la Région Grand-Est, l'INRAE et l'Université de Lorraine pour leur soutien dans les projets Destisol (convention de financement n°1372C0059 et n°1972C002), Destisol'AU (projet soutenu par INRAE, prématuration 2019-2020) et SUPRA (convention ADEME-Graine n°1772C0035). Notre reconnaissance va également à l'ensemble des partenaires de ces projets.

BIBLIOGRAPHIE

- ADEME, 2020 - Destisol - Les sols, une opportunité pour un aménagement durable : <https://www.ademe.fr/destisol-sols-opportunit-amenagement-urbain-durable>
- Adhikari K., Hartemink A.E., 2016 - Linking soils to ecosystem services - A global review. *Geoderma*, 262, pp. 101-111.
- Ajmone-Marsan F., Biasoli M., 2010 - Trace elements in soils of urban areas. *Water, Air & Soil, Pollution*, v.213, pp. 121-143.
- Ay J.-S., Pousse, N., Rigou L., Thannberger, L., 2020 - Vers une évaluation des coûts de la dégradation des sols : Éléments de cadrage, outil d'analyse et études de cas. *Etude et Gestion des Sols*, 27 (1), pp. 147-162.
- Baize D., Girard M. C., 2009 - Référentiel pédologique 2008. Editions Quae.
- Baumgartl Th., 1998 - Physical soil properties in specific fields of application especially in anthropogenic soils. *Soil & Tillage Research*, v.47, pp.51-59.
- Béchet B., Carré F., Florentin L., Leyval C., Montanarella L., Morel J.L., Raimbault G., Rodriguez F., Rossignol J.P., Schwartz C., 2009 - Caractéristiques et fonctionnement des sols urbains, Sous les pavés la terre, Cheverry et Gascuel éd., Omniscience, Montreuil, pp. 45-74.
- Béchet B., Joimel S., Jean-Soro L., Hursthouse A., Agboola A., Leitão T.E., Costa H., Cameira M., Le Guern C., Schwartz C., Lebeau T., 2018 - Spatial variability of trace elements in allotment gardens of four European cities: assessments at city, garden and plot-scale. *Journal of Soils and Sediments*, DOI 10.1007/s11368-016- 1515-1
- Blanchart A., Séré G., Cherel J., Stas M., Consalès J.N., Warot G., Schwartz C., 2017 - Contribution des sols à la production de services écosystémiques en milieu urbain - une revue. *Environnement Urbain / Urban Environment*, Volume 11. | 2017, mis en ligne le 12 juillet 2017, consulté le 25 août 2020. URL : <http://journals.openedition.org/eue/1809>
- Blanchart A., Séré G., Stas M., Consalès J.N., Morel J.L., Schwartz C., 2018 - Towards an operational methodology to optimize ecosystem services provided by urban soils. *Landscape and Urban Planning*, 176, pp. 1-9.
- Blanchart A., 2018 - Vers une prise en compte des potentialités des sols dans la planification territoriale et l'urbanisme opérationnel. Thèse Université de Lorraine.
- Bolund P., Hunhammar S., 1999 - Ecosystem services in urban areas. *Ecological Economics*, v. 29, pp. 293-301.
- Boyd, J., Banzhaf, S., 2007 - What are ecosystem services? The need for standardized environmental accounting units. *Ecological Economics*, v. 63, pp. 616-626.
- Cambou A., Shaw R. K., Huot H., Vidal-Beaudet L., Hunault G., Cannavo P., Nold F., Schwartz C., 2018 - Estimation of soil organic carbon stocks of two cities, New York City and Paris. *Science of The Total Environment*, vol.644, pp. 452-464.
- Cambou A., Vidal-Beaudet L., Cannavo P., Schwartz C., 2020 - Stockage du carbone dans les sols urbains, bilan et perspectives. *Techniques de l'Ingénieur*, GE-1 072, 16 p.
- Cameron RWF, Blanus T., Taylor JE., Salisbury A., Halstead AJ., Henricot B., Thompson K., 2012 - The domestic garden - Its contribution to urban green infrastructure. *Urban Forestry & Urban Greening*, v. 11, pp. 129-137.
- Chambers L.G., Chin Y.-P., Filippelli G.M., Gardner C.B., Herndon E.M., Long D.T., Lyons W.B., Macpherson G.L., McElmurry S.P., McLean C.E., Moore J., Moyer R.P., Neumann K., Nezat C.A., Soderberg K., Teutsch N., Widom E., 2016 - Developing the scientific framework for urban geochemistry. *Applied Geochemistry*, vol. 67, pp. 1-20.
- Costanza R., d'Arge R., de Groot R., Farber S., Grasso M., Hannon B., Limburg K., Naeem S., O'Neill RV., Paruelo J., Raskin RG., Sutton P., van den Belt M., 1997 - The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 387, pp. 253-260.
- Craul P.J., 1992 - Urban soil in landscape design, John Wiley & Sons.
- Davies Z.G., Edmondson J.L., Heinemeyer A., Leake J.R., Gaston K.J., 2011 - Mapping an urban ecosystem service: quantifying above-ground carbon storage at a city-wide scale. *Journal of Applied Ecology*, v. 48, pp. 1125-1134.
- de Groot R.S., Wilson M.A., Boumans R.M.J. (2002). À typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services. *Ecological Economics*, v. 41, pp. 393-408.
- De Hollander A.E.M., Staatsen B.A.M., 2003 - Health, Environment and Quality of Life: An Epidemiological Perspective on Urban Development. *Landscape and Urban Planning*, vol. 65, pp. 53-62.
- De Kimpe C.R., Morel J.L., 2000 - Urban soil management: A growing concern. *Soil Science*, 165, pp. 31-40.
- Damas O., Coulon A., 2016 - Créer des sols fertiles : du déchet à la végétalisation urbaine, Editions Le Moniteur, Antony, 336 p.
- Destisol'AU : <https://www.inrae.fr/actualites/Destisol%27AU>
- El Khalil H., Schwartz C., El Hamiani O., Kubiniok J., Morel J.L., Boularbah A., 2013 - Distribution of major elements and trace metals as indicators of technosolisation of urban and suburban soils. *Journal of Soils & Sediments*, v.13, pp.519-530.
- El Khalil H., Schwartz C., El Hamiani O., Kubiniok J., Morel J.L., Boularbah A., 2008 - Contribution of technic materials to the mobile fraction of metals in urban soils in Marrakech (Morocco). *Journal of Soils and Sediments*, 8, pp. 17-22.
- El Khalil H., Schwartz C., El Hamiani O., Sirguey C., Kubiniok J., Boularbah A., 2016 - How physical alteration of technic materials affects mobility and phytoavailability of metals in urban soils? *Chemosphere*, 152, pp. 407-414.

- Escobedo F. J., Kroeger T., Wagner J. E., 2011 - Urban forests and pollution mitigation: Analyzing ecosystem services and disservices. *Environmental pollution*, 159(8-9), pp. 2078-2087.
- Fisher B., Turner R.K., 2008 - Ecosystem services: classification for valuation. *Biological Conservation*, v. 141, pp. 1167-1169.
- Fisher B., Turner R. K., Morling P., 2009 - Defining and classifying ecosystem services for decision making. *Ecological economics*, v. 68, pp. 643-653.
- Fossey M., Angers D., Bustany C., Cudennec C., Durand P., Gascuel-Oudou C., Jaffrezic A., Pérès G., Besse C., Walter C., 2020 - À Framework to consider soil ecosystem services in territorial planning. *Frontiers in Environmental Science*, 8, pp. 28.
- Gomez-Baggethun E., Barton D.N., 2013 - Classifying and valuing ecosystem services for urban planning. *Ecological Economics*, v.86, pp.235-245.
- Haines-Young R., Potschin M., 2011 - Common international classification of ecosystem services (CICES): 2011 Update. Nottingham: Report to the European Environmental Agency.
- Hulisz P., Charzynski P., Greinert A., 2018 - Urban soil resources of medium-sized cities in Poland: a comparative case study of Toruń and Zielona Góra. *Journal of Soils and Sediments*, v.18, pp.358-372.
- INSEE, 2016 - <https://www.insee.fr/fr/statistiques/4277602?sommaire=4318291&q=population+urbaine>
- INSEE, 2019 - <https://www.insee.fr/fr/statistiques/4252859>
- IUSS Working Group, 2014 - World Reference Base for Soil Resources 2014. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports No. 106. FAO, Rome.
- Jenerette G.D., Harlan S.L., Stefanov W.L., Martin C.A., 2011 - Ecosystem services and urban heat riskscape moderation: Water, green spaces, and social inequality in Phoenix, USA. *Ecological Applications*, v.21, pp. 2637-2651.
- Jim C.Y., Chen W.Y., 2009 - Ecosystem services and valuation of urban forests in China. *Cities*, v. 26, pp. 1887-194.
- Johnson C.C., Ander E.L., 2008 - Urban geochemical mapping studies: How and why we do them. *Environmental Geochemistry and Health*, v.30, pp.511.
- Joimel S., Cortet J., Jolivet C.C., Saby N.P.A., Chenot E.D., Branchu P., Consalès J.N., Lefort C., Morel J.L., Schwartz C., 2016 - Physico-Chemical Characteristics of Topsoil for Contrasted Forest, Agricultural, Urban and Industrial Land Uses in France. *Science of The Total Environment*, v. 545, pp. 40-47.
- Joimel S., Schwartz C., Hedde M., Kiyota S., Krogh P.H., Nahmani J., Pérès G., Cortet J., 2017 - Urban and industrial land uses have a higher soil biological quality than expected from physicochemical quality, *Science of the Total Environment*, v.584-585, pp.614-621.
- Lehmann I., Mathey J., Rossler S., Brauer A., Goldberg V., 2014 - Urban vegetation structure types as a methodological approach for identifying ecosystem services - Application to the analysis of micro-climatic effects. *Ecological Indicators*, v. 42, pp. 58-72.
- MEA, 2005 - Ecosystems and Human Well-being: Synthesis, Washington DC, Island press.
- Morel J.L., Schwartz C., Florentin L., de Kimpe C., 2005 - Urban soils. In D. Hillel (ed.) *Encyclopedia of Soils in the Environment*, Elsevier Ltd., Academic Press, London, pp. 202-208.
- Morel J.L., Séré G., Auclerc A., Schwartz C., Leguedois S., Watteau F., 2014 - Les sols de l'environnement urbain : Caractéristiques, services et problèmes liés à leur étude. *Bulletin BGS*, pp.49-54.
- MUSE - Intégrer la multifonctionnalité des sols dans les documents d'urbanisme (2017-2020) : <https://www.cerema.fr/fr/actualites/projet-muse-integrer-multifonctionnalite-sols-documents>
- Nehls T., Rokia S., Mekiffer B., Schwartz C., Wessolek G., 2013 - Contribution of bricks to urban soil properties. *Journal of Soils and Sediments*, 13, pp. 575 - 584.
- Nielsen T.S., Hansen K.B., 2007 - Do green areas affect health? Results from Danish survey on the use of green areas and health indicators. *Health Place*, vol. 13, n° 4, pp. 839-850.
- Norman L.M., Villarreal M.L., Lara-Valencia F., Yuan YP., Nie WM., Wilson S., Amaya G., & Sleetter R., 2012 - Mapping socio-environmentally vulnerable populations access and exposure to ecosystem services at the U.S.-Mexico borderlands. *Applied Geography*, v. 34, pp. 413-424.
- ONU, Department of Economic and Social Affairs, 2014 - World urbanization prospects: the 2014 Revision: Highlights, 978-92-1-151517-6.
- Pouyat R.V., Yesilonis I.D., Nowak D. J., 2006 - Carbon Storage by Urban Soils in the United States. *Journal of Environmental Quality*, pp. 1566-1575.
- Robert S., 2012 - UQUALISOL-ZU. Préconisation d'utilisation des sols et qualité des sols en zone urbaine et péri-urbaine. <https://www.ademe.fr/uqualisol-zu-preconisation-dutilisation-sols-qualite-sols-zone-urbaine-peri-urbaine>
- Schleuß U., Wu Q., Blume H.P., 1998 - Variability of soils in urban and periurban areas in northern Germany, *Catena*, 33, pp. 255-270.
- Schwartz C., Gérard E., Perronnet K., Morel J.L., 2001 - Measurement of in situ phytoextraction of zinc by spontaneous metallophytes growing on a former smelter site. *Science of the Total Environment* v.279, p. 215-221.
- Schwartz C., Séré G., Stas M., Blanchart A., Morel J.L., Consalès J.-N., 2015 - Quelle ressource Sol dans les villes pour quels services et quels aménagements ? *Innovations Agronomiques*, 45, pp. 1-11.
- Sobocka J., 2010 - Specifics of urban soils (Technosols) survey and mapping, WCSS Brisbane
- Stroganova M., Miagkova A., Prokofieva T., Skvortsova I., 1998 - Soils of Moscow and urban environment. Ed. PAIMS, Moscou, 178 p.
- SUPRA - Sols Urbains et Projets d'Aménagement : de l'échantillonnage des sols à l'outil d'aide à la décision (2017-2020) : <https://urbasol.agrocampus-ouest.fr/fr/projets>
- UQUALISOL-ZU - Préconisation d'utilisation des sols et qualité des sols en zone urbaine et péri-urbaine (2010-2012) : <https://www.ademe.fr/uqualisol-zu-preconisation-dutilisation-sols-qualite-sols-zone-urbaine-peri-urbaine>
- Van Kamp I., Leidelmeijer K., Marsman G., de Hollander A., Vauramo S., 2011 - Urban ecosystem services at the plant-soil interface. Department of Environmental Science. Faculty of biological and environmental science. University of Helsinki. Finland, 28 p.
- Wallace K.J., 2007 - Classification of ecosystem services: Problems and solutions. *Biological Conservation*, v. 139, pp. 235-246.
- Walter C., Bispo A., Langlais A., Schwartz C., Chenu C., 2015 - Les services écosystémiques des sols : du concept à sa valorisation. *Cahier - Club Demeter*, 15, pp. 51-68.