

# Cartographie des sols urbains :

## Méthode de caractérisation d'une couverture pédologique soumise à différentes formes de dénaturation et d'anthroposolisation

C. Ducommun<sup>(1,2\*)</sup>, C. Duvigneau<sup>(1,2)</sup> et L. Vidal-Beaudet<sup>(1,2)</sup>

1) EPHor, Institut Agro Rennes-Angers, 49000 Angers, France

2) IRSTV, 44000 Nantes, France

\* Auteur correspondant : christophe.ducommun@agrocampus-ouest.fr

### RÉSUMÉ

La cartographie des sols en milieu urbain, telle que réalisée à partir de modèles environnementaux prédictifs en milieu rural, n'a jusqu'alors pas eu d'échos. L'exploration en ville reste ponctuelle et souvent restreinte à l'horizon de surface des sols. Pourtant depuis les années 2000, une connaissance plus robuste des sols de ces espaces est recherchée pour une meilleure planification territoriale. Mais la désorganisation spatiale horizontale et verticale et l'imperméabilisation des sols urbains semblent compromettre tout effort de cartographie déterministe.

Aujourd'hui, la connaissance à petite échelle apportée par les Référentiels Régionaux Pédologiques (RRP) définit les lois d'organisation des sols à proximité des secteurs urbanisés. Si la projection de ces lois permet d'extrapoler la pédogenèse enturbane d'une part, l'analyse de ressources géographiques chronologiques favorise la perception d'éventuels facteurs perturbateurs de ces milieux d'autre part. Malgré les difficultés d'exploration liées au parcellaire privé et à l'imperméabilisation, ce travail mené sur un secteur de la ville de Nantes montre que l'organisation spatiale des sols peut être relatée sous forme d'unités cartographiques complexes au 1/10 000, superposables aux attentes des aménageurs.

### Mots-clés

Cartographie, sols urbains, dénaturation pédologique, anthroposolisation, renaturation pédologique, référentiel régional pédologique, unité cartographique de sol complexe, unité typologique de sol.

Comment citer cet article :

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

Comment télécharger cet article :

<https://www.afes.fr/publications/revue-etude-et-gestion-des-sols/volume-30/>

Comment consulter/télécharger

tous les articles de la revue EGS :

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

**SUMMARY****URBAN SOIL MAPPING: Methodological elements**

Urban soil mapping, as based on predictive environmental models in rural areas, has so far not been reported. Exploration in the city remains punctual and often restricted to the surface horizon of the soils. However, since the 2000s, a more robust knowledge of the soils of these spaces has been sought for better planning. But the disorganization and waterproofing of urban soils seem to jeopardize any deterministic mapping effort.

Today, the small-scale knowledge provided by the Regional Soil Standards (RRP) defines the laws of soil organization near urbanized areas. If the projection of these laws makes it possible to extrapolate ante-urban pedogenesis on the one hand, the analysis of the mode of spatiotemporal urbanization augurs the disruptive factors of these environments on the other hand. Despite the difficulties of exploration related to the private plot and waterproofing, this work carried out on a sector of the city of Nantes shows that the spatial organization of the soils can be related in the form of complex cartographic units at 1:10,000, superimposed on the expectations of developers.

**Key-words**

Mapping, urban soils, soil denaturation, anthroposolization, pedological renaturation, regional soil map, complex soil mapping unit, soil typological unit.

**RESUMEN****CARTOGRAFÍA DEL SUELO URBANO: Elementos metodológicos**

Hasta el momento no se ha informado de la cartografía del suelo urbano, basada en modelos ambientales predictivos en zonas rurales. La exploración en la ciudad sigue siendo puntual y a menudo restringida al horizonte superficial de los suelos. Sin embargo, desde la década de 2000, se ha buscado un conocimiento más robusto de los suelos de estos espacios para una mejor planificación. Pero la desorganización y la impermeabilización de los suelos urbanos parecen poner en peligro cualquier esfuerzo de mapeo determinista. Hoy en día, el conocimiento a pequeña escala proporcionado por los Estándares regionales de Suelo (RRP) definen las leyes de organización del suelo cerca de áreas urbanizadas. Si la proyección de estas leyes permite extrapolar la pedogénesis anteurbana por un lado, el análisis del modo de urbanización espaciotemporal augura los factores disruptivos de estos entornos por otro. A pesar de las dificultades de exploración relacionadas con la parcela privada y la impermeabilización, este trabajo realizado en un sector de la ciudad de Nantes muestra que la organización espacial de los suelos se puede relacionar en forma de unidades cartográficas complejas a 1:10.000, superpuestas a las expectativas de los desarrolladores.

**Palabras clave**

Cartografía, suelos urbanos, desnaturalización de suelos, antroposolización, renaturalización pedológica, mapa regional de suelos, unidad de mapeo complejo de suelos, unidad tipológica de suelos.

## INTRODUCTION

Les attentes sont fortes concernant la connaissance de l'écosystème urbain. Celui-ci doit répondre à des enjeux environnementaux, économiques et politiques et offrir un cadre de développement plus durable : (i) gestion des flux hydriques et des inondations, (ii) maîtrise du microclimat et des îlots de chaleur, (iii) développement d'une végétation et accueil de la biodiversité, (iv) stockage du carbone et (v) contrôle des pollutions aériennes et souterraines. Si la pédosphère est située au carrefour de ces enjeux, les rares cartographies disponibles ne s'intéressent qu'à quelques paramètres des sols souvent en lien avec les risques de pollution par des éléments trace ou des hydrocarbures et les surfaces étudiées sont restreintes à quelques hectares au maximum.

L'opérationnalité d'une carte pédologique urbaine est avant tout liée à sa grande échelle, superposable aux détails des activités qui s'y déroulent. Les techniques de construction des villes peuvent perturber fortement les sols, par l'ajout de couches de matériaux (Burghardt, 2015) ou par simple remaniement. Ainsi, l'hétérogénéité des sols urbains serait liée à leurs usages (Cornu *et al.*, 2021) et à la succession des activités anthropiques (Morel *et al.*, 2015). Pour Lothodé *et al.*, 2020, le sol anthropisé constitue une catégorie de l'ensemble des sols urbains, qui subissent une forte influence humaine. L'enjeu consiste donc à élaborer une approche déterministe de cartographie des sols urbains, qui présage d'unités cartographiques continues.

### La spatialisation de l'occupation des sols

L'occupation du sol peut expliquer pour partie leur perturbation. Une première source d'informations est la base de données Corine Land Cover (CLC) qui présente les « territoires artificialisés » selon quatre classes (CGDD, SOeS, 2009 ; Jégou, 2009). Mais l'échelle du 1/100 000 et le nombre de classes ne sont pas adaptés à la gestion précise des espaces urbains et périurbains (Robert et Autran, 2012). L'Atlas urbain, coordonné par l'Agence Européenne de l'Environnement, détaille plus précisément cette classification pour les principales aires fonctionnelles urbaines européennes (European Commission, 2020). Mais les 17 classes élaborées au 1/10 000 sont encore peu satisfaisantes (Robert et Autran, 2012). Enfin, le programme Teruti Lucas du Ministère de l'agriculture suit l'évolution de l'occupation et de l'usage des sols français via 9 sous-catégories artificialisées d'usages, qui restent peu transposables.

Ces différents outils de spatialisation de l'occupation du territoire, notamment pour des raisons d'échelle, de catégories d'usages trop contraintes et d'informations historiques limitées, poussent à recourir à d'autres sources d'informations.

## L'évolution de la cartographie des sols urbains

Souvent, l'approche pédologique urbaine lorsqu'elle existe, se limite à l'étude ponctuelle de profils de sols dans le cadre d'un projet d'aménagement sans objectif ou possibilité d'aboutir à une information spatiale continue (l'information est ponctuelle, éparse, et non polygonale jointive), et la restitution d'analyses de laboratoire se borne le plus souvent à l'horizon de surface. Dans ces milieux, la cartographie des sols n'en est qu'à ses balbutiements.

Plusieurs raisons expliquent cette tendance :

- (i) jusqu'à récemment, cartographier les sols urbains ne présentait pas d'intérêt majeur, les préoccupations étant plutôt polarisées vers le milieu rural.
- (ii) Le scellement des terrains limite les possibilités d'observation des sols à la tarière.
- (iii) Le parcellaire dense, privé et clos restreint l'accessibilité aux sites d'observation.
- (iv) Le remaniement des sols est *a priori* trop intense pour encore percevoir les lois d'organisation des sols originels.
- (v) L'hétérogénéité des horizons anthropisés limite la catégorisation précise des sols (Vidal-Beaudet et Rossignol, 2018). Même si le Référentiel Pédologique (Baize et Girard, 2008) ou la WRB (World Reference Base ; FAO, 2014) proposent un cadre intéressant, la diversité des situations reste difficile à décliner et à cartographier en sous-catégories précises.

La littérature scientifique recense néanmoins quelques expériences d'approches de cartographie des sols urbains. En fonction des pays, l'état d'avancement dans l'identification et la caractérisation des sols urbains varie en lien avec les classifications et les méthodes choisies.

À la fin du XX<sup>e</sup> siècle, deux pays ont principalement développé des recherches sur les sols urbains et la cartographie pédologique de ces milieux : les États-Unis et l'Allemagne. Les premières études de cartographie pédologique urbaine aux États-Unis datent de 1970 et sont des rapports d'enquêtes pédologiques des villes américaines de Baltimore et Beltsville (« Soil Series-Urban land complexes ») (Burghardt *et al.*, 2015). Elles correspondent à des cartes d'urbanisation régionales au 1/250 000 qui quantifient les surfaces des (i) sols non perturbés, (ii) sols urbains remblayés sur 45 cm ou plus ou alors tronqués et (iii) sols de transition (Effland and Pouyat, 1997). Dans les années 1990, une quinzaine de villes étasuniennes spatialisent la pollution des sols au 1/24 000 ou au 1/12 000. Il ne s'agit pas de véritables cartes pédologiques (Burghardt *et al.*, 2015), mais cela a permis d'étudier les perturbations de différentes aires urbaines (Shaw et Riddle, 2019). Le USDA's (United States Department of Agriculture) Soil Conservation Service a par ailleurs essayé de décrire et classer les sols altérés ou transportés (human-altered and human-transported soils (HAHT)) par l'Homme tandis que l'International Committee for Anthropogenic Soils

(ICOMANTH) envisageait (1) une évolution de la classification des sols américains (U.S. Soil Taxonomy), d'après leur nature chimique (Ryan, 2015) et (2) une facilitation de la cartographie des espaces urbains (Galbraith et Shaw, 2018). À New York, des observations de terrain basées sur l'origine naturelle ou transportée du matériau parental, ont abouti à 39 séries de sols naturels et 30 séries de HAHT (Shaw et Isleib, 2017). Les sols appartiennent à une même série quand ils possèdent le même matériau parental, une granulométrie similaire de leurs horizons et le même fonctionnement hydrique (Vargas, 2018). Cette cartographie au 1/12 000 des sols de New York City a permis d'obtenir une répartition entre les surfaces imperméables ou scellées pour 62,6 %, les HAHT pour 27,4 %, les sols naturels pour 8,8 % et 1,2 % de diverses autres situations.

Dans le même temps en Allemagne, la spatialisation des sols intervient dans les projets de planification urbaine de Sarrebruck, Karlsruhe et Stuttgart (Makowsky et Schneider, 2017). En 1998, un guide de cartographie des sols urbains propose une clé de détermination dédiée aux matériaux technogéniques. À partir de 2005, une procédure cartographique aboutit à l'ébauche d'une carte où le choix d'échelle et des propriétés de sol à évaluer dépend du site et des objectifs affichés (Schwartz, 2013). Finalement, la nature des matériaux parents conduit à des cartes interprétatives de fonctions des sols (Makowsky et Schneider, 2017). Les études ponctuelles réalisées dans le cadre de projets de planification urbaine permettent d'identifier les perturbations subies par les sols et démontrent que seulement 33 à 50 % des couches situées à moins d'1 m de profondeur sont originelles (Makki *et al.*, 2021). Les échelles cartographiques choisies (1/6 000 à 1/12 000) sont suffisamment précises compte tenu du nombre élevé d'unités par zone étudiée (Burghardt, 2007). Ce guide de cartographie des sols urbains complétera à terme le guide national de cartographie des sols allemands (Makki *et al.*, 2021).

La cartographie systématique des sols en France métropolitaine s'est développée dès la fin des années 1960. Cependant, dans la plupart des cartes réalisées, les sols urbains ont été simplement détournés et considérés comme des « non-sols » (Voltz *et al.*, 2018). Ainsi, la plupart des cartes pédologiques sont dentelées par les zones urbanisées non renseignées. La carte des sols 1/100 000 d'Angers est une exception qui propose des unités typologiques de sols (UTS) anthropiques au sein d'unités cartographiques de sols (UCS) calquées sur celles de CLC (Vidal-Beaudet et Rossignol, 2018). Dans le cadre d'études récentes sur l'aménagement urbain, l'acquisition de connaissances a porté principalement sur la qualité sanitaire des sols. Depuis 2010, le BRGM collecte ponctuellement des données sur les teneurs des principales substances minérales et organiques potentiellement toxiques présentes dans les sols anthropisés urbains pour établir des référentiels de valeurs de fonds pédo-géochimiques via la base de données BDSolU (<http://www.bdsolu.fr/>).

Ainsi, si la littérature montre que la production de cartes des sols urbains, s'appuie dans un premier temps sur les outils cartographiques classiques (géologie, topographie, photographies aériennes prises à différentes périodes) pour définir des unités en lien avec le type d'usage ou de couvert, la méthode mise en place n'est en général pas décrite.

Pour répondre efficacement aux besoins des aménageurs de la ville qui nécessitent des informations spatiales précises et continues, cette étude propose une adaptation au milieu urbain de l'approche pédologique déterministe classiquement utilisée en milieu rural ou naturel.

## MATÉRIELS ET MÉTHODES

### Choix du site d'étude

L'IRSTV (Institut de Recherche en Sciences et Techniques de la Ville) est le partenaire scientifique du projet URBINAT (H2020 ; 2018-2023 ; Healthy Corridors as drivers of social housing neighbourhoods for the co-creation of social, environmental and marketable nature base solution). Nantes est l'une des trois villes pilotes avec Porto et Sofia. La zone d'étude se situe sur le « quartier nord », où la ville souhaite développer des "solutions basées sur la nature". La connaissance de la qualité des sols est un facteur clé pour la réussite du projet.

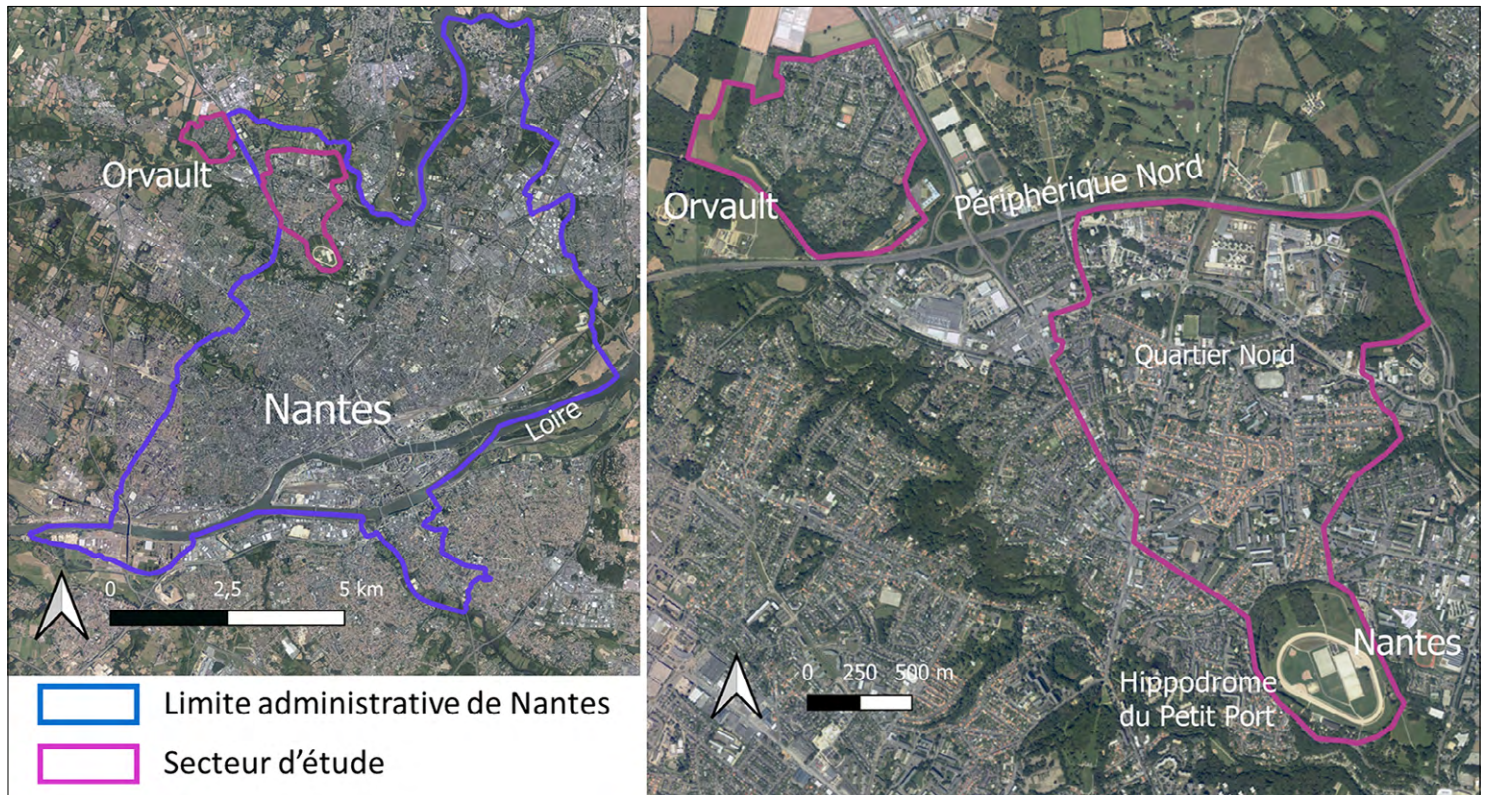
### Evolution de l'urbanisation de Nantes

En 2018, la commune de Nantes comprenait 314 138 habitants (6<sup>e</sup> de France). Sa superficie atteint 65 km<sup>2</sup> et sa densité de population est de 4 819 hab.km<sup>-2</sup>. Elle présente les étapes d'urbanisation caractéristiques des grandes métropoles françaises, avec un centre historique circonscrit à quelques kilomètres carrés, densément peuplé, où persistent des bâtis moyenâgeux. La ville a été ensuite sans cesse réorganisée, avec au XVIII<sup>e</sup> siècle la création d'un axe principal, l'aménagement des berges de la Loire et une urbanisation modérée entre le XIX<sup>e</sup> siècle et la 2<sup>de</sup> Guerre mondiale. Mais après 1945, l'urbanisation est devenue exponentielle.

Le cadre de ce travail se rapporte à un secteur de 4 km de long et d'1 km de large, entre la commune d'Orvault au nord-ouest, et l'hippodrome « du Petit Port » au sud-est. Il représente 364 ha (4,5 % de Nantes), dont 75 ha situés à Orvault et 289 ha sur le quartier Nord (*Figure 1*).

L'occupation du sol consiste en une grande diversité d'usages : lotissements et immeubles, établissements scolaires, bureaux, commerces, centre de détention, parkings, voiries, équipements sportifs enherbés ou stabilisés, parcs boisés, cimetière, et forêt.

**Figure 1 :** Localisation du secteur d'étude : (a) cadrage sur la commune de Nantes et la commune d'Orvault et (b) cadrage sur le secteur d'étude.  
**Figure 1:** Location of the study area: (a) view of Nantes and Orvault and (b) view of the study area.



### Éléments de géographie physique

Nantes possède un climat océanique franc. La température moyenne annuelle est de 12,7 °C avec des minimales et maximales moyennes de 8,3 °C et 17,1 °C, et des précipitations moyennes annuelles de 860 mm (Infoclimat 1991-2020).

La ville est ancrée dans le massif armoricain qui en cet endroit, s'y abaisse d'Ouest en Est de 60 à 30 mètres. L'étroit sillon de Bretagne granitique, orienté nord-ouest, affleure en partie occidentale de la ville. Vers l'orient, il laisse la place aux gneiss puis aux micaschistes où les fractures hercyniennes favorisent les cours d'eau (l'Erdre, la Sèvre et la Loire) dont les lits sont fortement incisés. Sur les interfluvies planes, ces roches présentent une altération poussée. Les positions planes et dépressions sont parfois le lieu de résidus graveleux à argileux plio-quadernaires. Le couloir de la Loire est quant à lui colmaté par des alluvions et basses terrasses limoneuses à sableuses (Ters *et al.*, 1968).

### Approche cartographique des sols en contexte urbain

La spatiation des sols urbains à grande échelle repose de prime abord sur la connaissance établie en contexte rural

à petite échelle par le RRP de Loire atlantique. Si les UTS n'y sont pas directement spatialisables au 1/250 000, les UCS qui les contiennent constituent une synthèse départementale exhaustive qui détient les clefs de la pédogenèse locale, nécessaires à l'approche des sols urbains.

Selon une démarche inversée, l'analyse préalable des facteurs environnementaux (lithologie, topographie, climat, organismes, temps) impliqués dans la pédogenèse d'un endroit donné, permet de sélectionner l'UCS correspondante du RRP ; on remonte ainsi à un type de sol ou une séquence de sols. En contexte urbain, le décalage entre la morphologie du sol naturel présagé et celle du sol observé peut être traduit par deux notions nouvelles : « l'anthroposolisation » d'une part, et la « dénaturation pédologique » d'autre part. Ces deux termes peuvent être associés de près ou de loin aux notions de « renaturation pédologique » (3<sup>e</sup> néologisme en science du sol) et « d'artificialisation » plus connue. Les trois premiers termes sont définis ci-après, suivis d'un rappel concernant le 4<sup>e</sup> :

- « Anthroposolisation » : non présent dans le Référentiel Pédologique (RP) (Baize et Girard, 2008), ce terme désigne logiquement les processus humains conduisant à l'apparition des sols « anthropiques », « anthropisés » ou « d'Anthroposols », tels que définis par le RP.

• « Dénaturation pédologique » : Dégradation morphologique des sols conduisant à la perte partielle à totale de leurs horizons originels, par troncature, mélange, ou recouvrement. Ce terme apporte une vision des horizons « disparus » ou « désorganisés » alors que le RP pointe plus vers ceux « créés » par apport de matériaux (même si des qualificatifs comme « recouvert par », « tronqué », etc. sont possibles dans le RP).

Le degré de dénaturation pédologique est ici évalué en considérant la profondeur et le nombre d'horizons impactés. Cinq classes de dénaturation pédologique sont proposées :

- « Peu dénaturé », si ne sont affectés que les 30 premiers centimètres ou le 2<sup>e</sup> horizon sur moins de 50 % de son épaisseur,
  - « Fortement dénaturé », si sont affectés les 50 premiers centimètres seulement, ou le 3<sup>e</sup> horizon sur moins de 50 % de son épaisseur,
  - « Extrêmement dénaturé », si la dénaturation affecte plus des 50 premiers centimètres, ou totalement les 3 premiers horizons,
  - « Totalement dénaturé », si la totalité du solum originel est impacté.
  - « Pseudo-dénaturé », en cas de solum originel resté intact mais « recouvert par » des matériaux divers, supposant un retour à l'état initial relativement aisé.
- « Renaturation pédologique ». Selon le code de l'Urbanisme (article L101-2 modifié par la LOI n° 2121-1104 du 22 août 2022), la renaturation des sols concerne l'action de restauration ou d'amélioration de la fonctionnalité des sols. Dans le cadre de ce travail, le concept de « renaturation pédologique » devient plus restrictif : il se borne à une opération de « génie pédologique », briguant la reconstitution d'un sol tel qu'il se trouvait à l'origine,

en matière d'épaisseur et de succession d'horizons. Une telle opération est très contraignante, voire impossible, puisqu'elle requiert l'accès aux matériaux originels et leur remise en place convenable. Dans le RP, un sol renaturé serait qualifié d'Anthrosol Reconstitué (Cette référence est si étendue que la réciproque est rarement vraie). La renaturation pédologique semble strictement limitée à deux actions seulement : (1) au réaligage au même endroit de « terres végétales » décapées et entreposées (lors de la finalisation d'un lotissement par exemple) ; (2) à l'extraction de remblais déposés sur un sol originel.

• « Artificialisation (des sols) ». D'une part, le code de l'urbanisme (article L101-2 modifié par la loi n° 2121-1104 du 22 août 2022) la définit comme une « altération durable de tout ou partie des fonctions écologiques », « ainsi que de son potentiel agronomique par son occupation ou son usage ». Mais alors comment mesurer cette altération sans connaître le sol originel perdu ? L'approche par « dénaturation pédologique » semble pertinente pour y arriver.

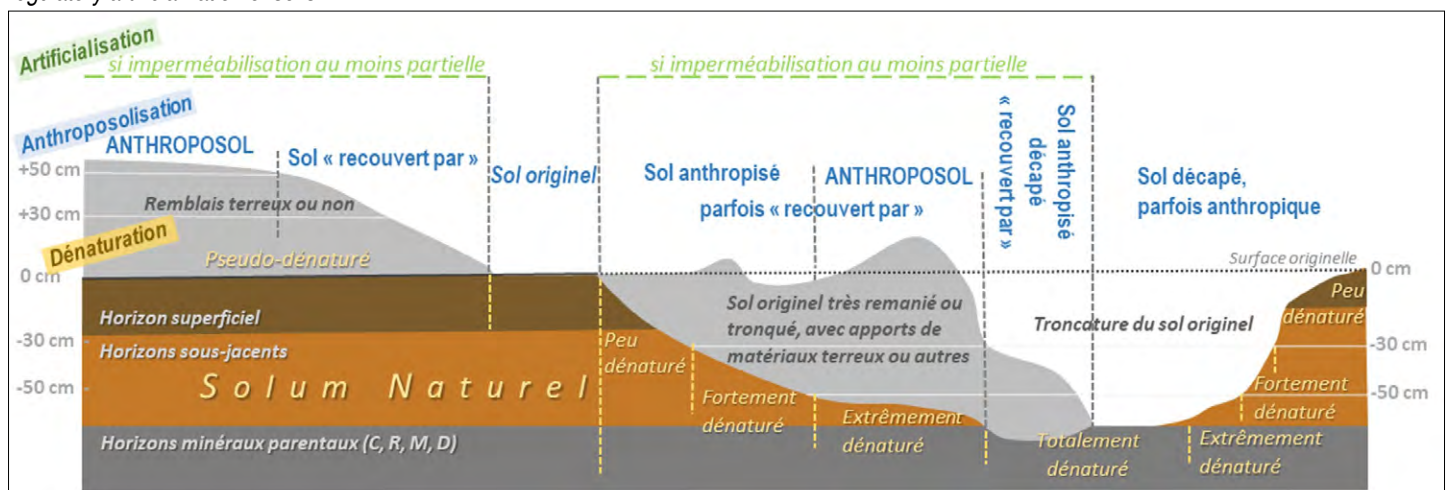
D'autre part, « l'artificialisation des sols » est une notion législative qui prend son sens dans le décret du 29 avril 2022 (<https://www.ecologie.gouv.fr/artificialisation-des-sols>).

« Elle traduit la transformation de sols naturels pour des opérations d'aménagement, destinées à satisfaire les activités urbaines ou de transport. Les sols artificialisés correspondent à des surfaces au moins partiellement imperméabilisées par des matériaux composites, même « entrecoupés d'îlots enherbés ». L'approche est donc strictement surfacique et basée sur l'imperméabilisation.

Le degré de dénaturation pédologique d'un sol est évalué à partir de l'expérience régionale (RRP) et permet de connaître précisément les horizons impactés. Considérant l'épaisseur

**Figure 2** : Schéma situant le concept de « dénaturation pédologique » parmi les références anthroposolées du Référentiel Pédologique, et la notion réglementaire d'artificialisation.

**Figure 2:** Diagram situating the concept of "soil denaturation" among anthropised references of the French Référentiel Pédologique, and the notion of regulatory artificialization of soils.



perdue ou l'ensevelissement, on peut situer le niveau de surface originel et, par exemple, tenter d'évaluer la perte ou le gain de fonctionnalités occasionnés. Cela permet d'envisager des projets de renaturation pédologique ou de construction de sols. La réalisation d'une carte thématique de dénaturation pédologique est donc envisagée dans le cadre de ce travail.

### Reconstitution de l'organisation naturelle préalable des sols

Sur le Massif armoricain, l'organisation des sols répond principalement aux facteurs lithologiques et morphologiques (Ducommun, 2017). Pour identifier puis prolonger les UCS du RRP interrompues aux portes de Nantes, ces facteurs sont analysés dans l'agglomération par croisement de la carte géologique au 1/50 000 (BRGM), avec le modèle numérique de terrain au pas de 25 mètres (IGN). D'abord réalisé au 1/100 000 (compatible avec

le RRP 44), ce croisement est ensuite agrandi jusqu'au 1/10 000 pour en affiner le tracé et faire apparaître d'éventuelles UCS de petite surface, non représentables au 1/250 000.

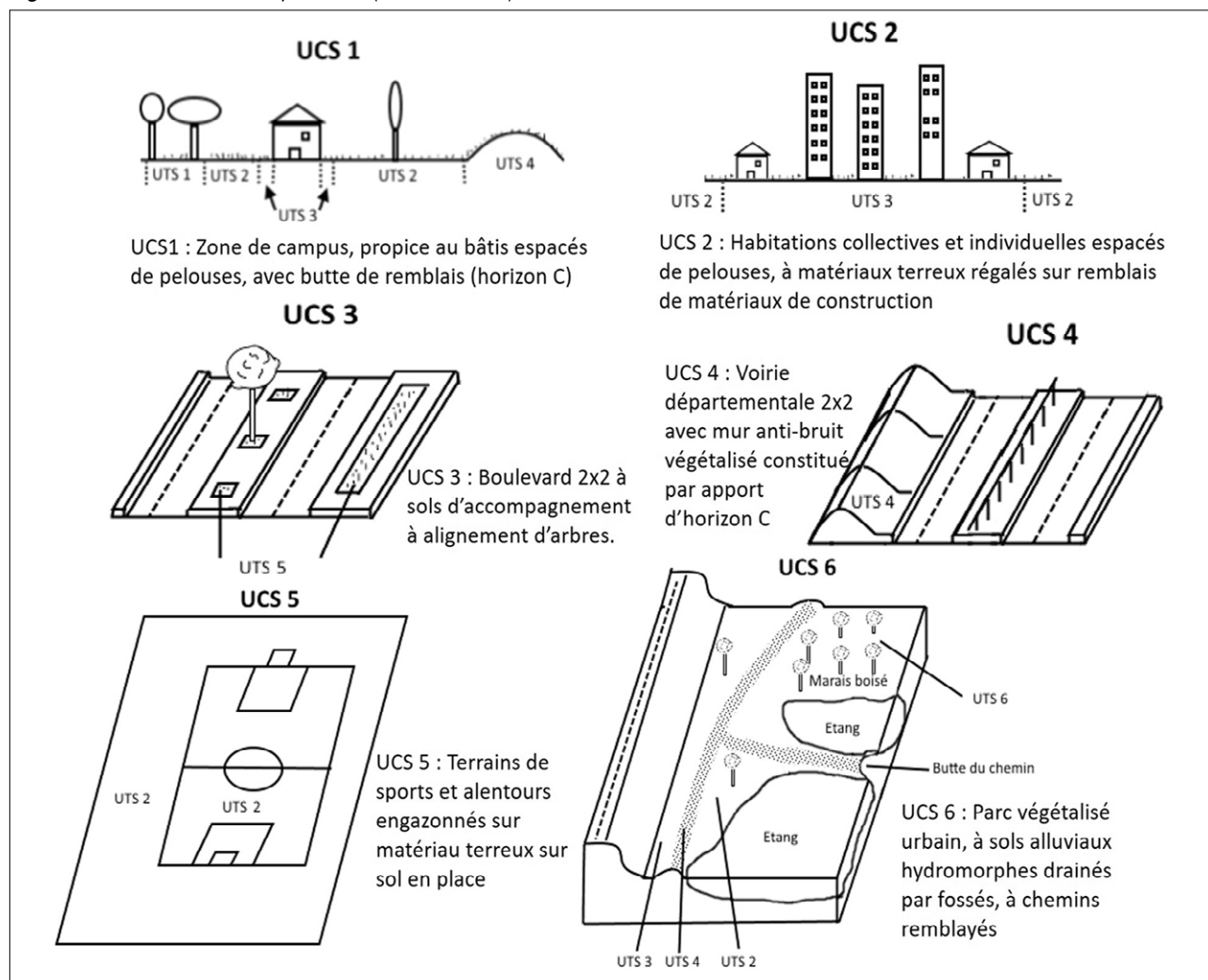
### Mode d'urbanisation des sols

Le « mode d'urbanisation » des sols (MUS) est ici défini comme le résultat de leur « vocation d'usage actuel » (commerciale, d'habitat, sportive, administrative, etc.), modulée par « l'époque d'urbanisation » qui constitue un facteur probable du degré de dénaturation pédologique des milieux urbains. Une carte du MUS permettra de visualiser les différentes catégories d'usage des sols actuels en lien avec leur histoire de création.

La vocation d'usage des sols est établie à partir des photographies aériennes les plus récentes (2012) à une résolution de 5 mètres (IGN). Des unités sont constituées entre le 1/5 000 et le 1/10 000, suivant l'emprise au sol et l'éparpillement

Figure 3 : Notion d'UCS complexes urbaines (Corbeau, 2015).

Figure 3: Notion of urban complex UCS (Corbeau, 2015).



des surfaces imperméabilisées. Pour chaque unité, on suppose que le changement d'usage traduit un remaniement homogène.

L'époque d'urbanisation pourrait révéler des perturbations relevant des techniques employées et des changements de vocation d'usage des terrains. Cette information est recueillie par l'analyse des photographies aériennes anciennes proposées par le portail « Remonter le temps » de l'IGN (<https://remonterletemps.ign.fr/>).

### Stratégie d'échantillonnage

L'exploration des sols vise à confronter les observations avec l'analyse contextuelle préalable. L'obtention d'une carte des sols à grande échelle sera confortée par une densité d'observations appropriée.

Le plan d'échantillonnage est réalisé à partir de photographies aériennes récentes (2012). Il cible prioritairement les espaces publics végétalisés accessibles. Les informations récoltées sont ensuite superposées à la carte des UCS probables pour en évaluer la pertinence au regard de la variété des situations.

### Anticipation de la nature des UCS urbaines

En milieu urbain, la pression anthropique suppose une forte variabilité latérale des sols (Efland et Pouyat, 1997). Cela implique une restitution à grande échelle, mais présage également d'UCS complexes (composées de plusieurs UTS non individualisées sur la carte). En 2015, un stage avait effectivement anticipé l'existence de telles UCS en proposant différents schémas conceptuels de caractérisation de la complexité des UCS urbaines à l'échelle du 1/2 500 (Corbeau, 2015), (Figure 3).

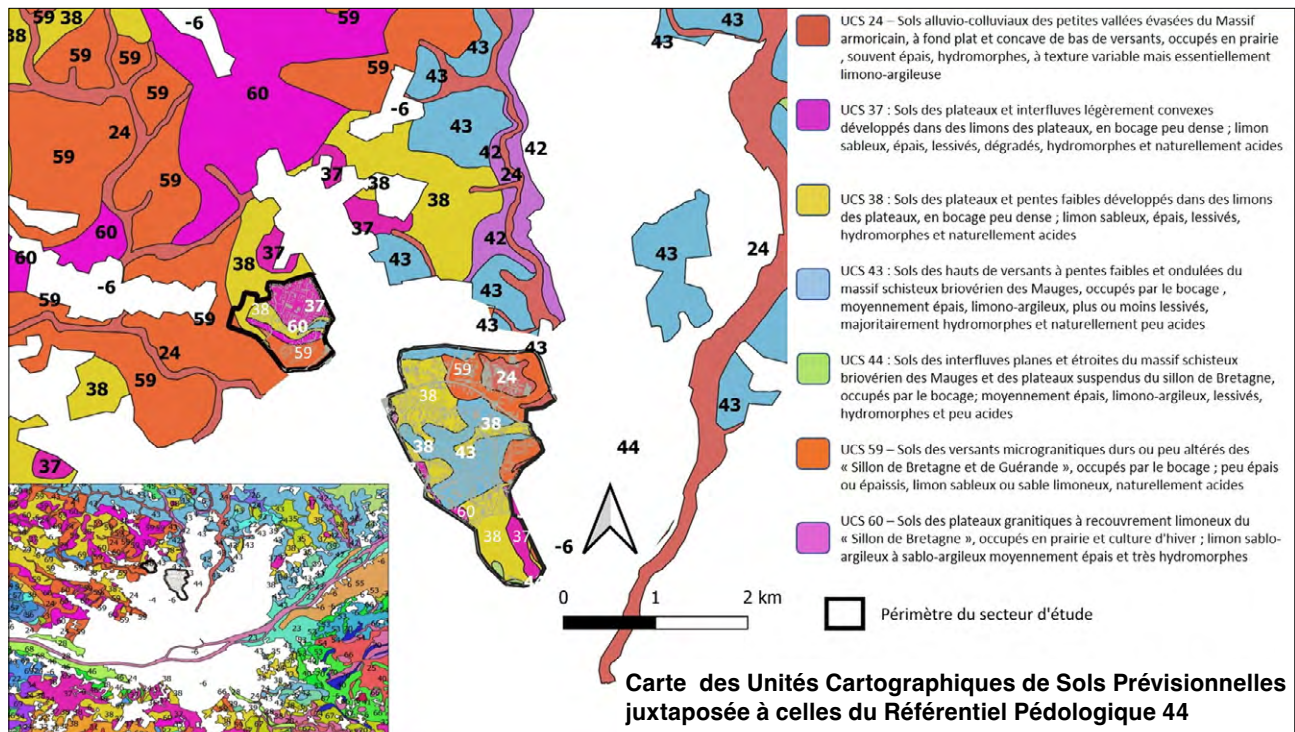
## RÉSULTATS

### Reconstitution de la couverture pédologique initiale du secteur d'étude

Le secteur d'étude mobilise 7 UCS du RRP 44. Si leur définition reste identique, le travail au 1/10 000 autorise le dessin de polygones de plus petites surfaces (Figure 4).

**Figure 4 :** Carte de transposition des UCS attendues au 1/250 000 selon le référentiel régional pédologique de Loire Atlantique pour le secteur Nantes-Nord/Orvault.

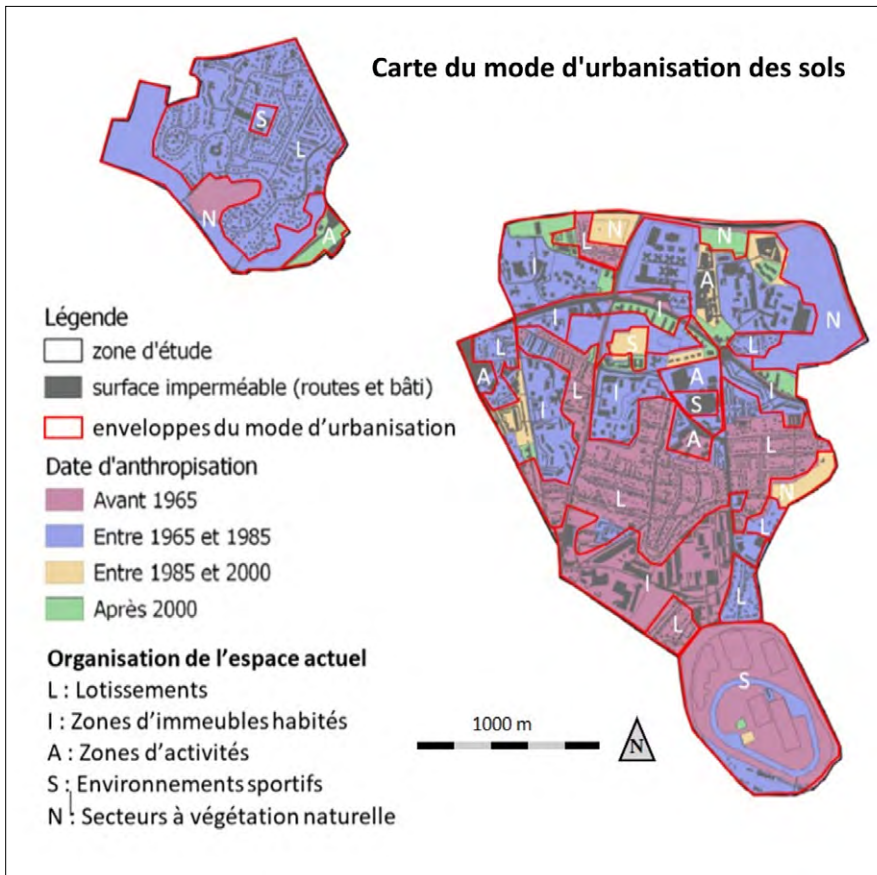
**Figure 4:** Map of the transposition of the expected UCS at 1:250,000 according to the Loire Atlantique regional soil reference system for the Nantes-Nord/Orvault sector.





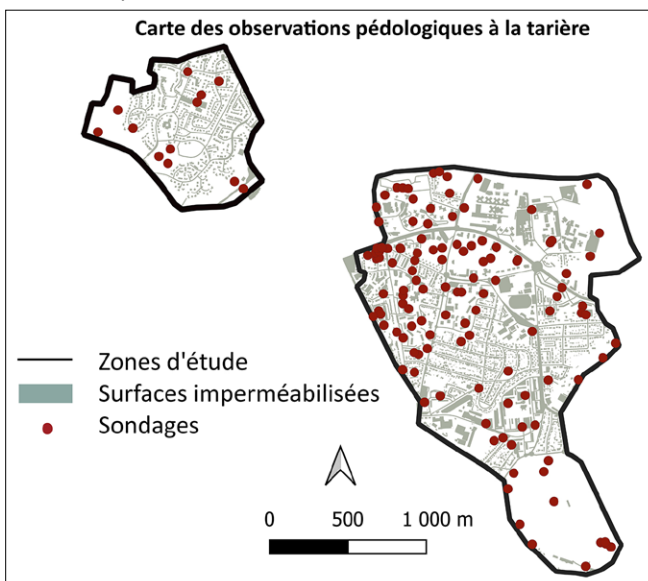
**Figure 5 :** Carte des 33 modes d'urbanisation des Sols sur le secteur d'étude.

**Figure 5:** Map of 33 land use patterns in the study area.



**Figure 6 :** Carte de localisation des 131 points d'observation des sols à la tarière.

**Figure 6:** Map of the location of the 131 augered soil observation points.



### Carte du mode d'urbanisation des sols

Dans la carte du MUS (Figure 5) transparaît d'une part, la compartimentation de l'espace urbain actuel à une échelle fine (1/5 000 à 1/10 000), en 11 types de vocations d'usage où l'on suppose l'anthroposolisation et la dénaturation pédologique comparables; d'autre part, l'analyse des couvertures non synchrones révèle quatre périodes d'artificialisation: avant 1965, puis successivement environ tous les 20 ans (de 1965 à 1985, de 1985 à 2000 et après 2000).

Finalement, le croisement de ces deux événements aboutit à 33 occurrences de MUS, où d'éventuelles anthroposolisations ou dénaturations pédologiques peuvent être comparables.

### Carte de l'échantillonnage des sols

La phase exploratoire des sols a confirmé que la pression anthropique limite les possibilités de sonder les sols. Sur les 363 sites sélectionnés, seuls 131 ont pu être réalisés (soit 36 %). Sans surprise, la contrainte majeure apparaît sur le parcellaire privé (lotissements et entreprises), qui demeure peu échantillonné par manque d'autorisations d'accès.

En excluant les surfaces scellées (26 % du secteur d'étude), les 364 ha sont rapportés à 271 ha prospectables. La densité d'observations est alors de 1 pour 2 à 3 ha, appropriée au 1/10 000.

### Constitution des UCS urbaines

#### Caractérisation des unités typologiques de sols

Le secteur d'étude est caractérisé par 35 UTS. Elles sont identifiées selon la nomenclature du RP 2008 (Baize et Girard, 2008), à laquelle est ajouté le degré de dénaturation pédologique constaté (Tableau 1).

**Tableau 1** : Liste des UTS du secteur d'étude.**Table 1:** List of UTS in the Study Area.

N°UTS	Nom (RP 2008)	et densité de sondages /ha
UTS 1	LUVISOL DEGRADE - REDOXISOL	0,3
UTS 2	ANTHROPOSOL RECONSTITUE - REDOXISOL urbain, nivelé et mélangé sur LUVISOL DEGRADE - REDOXISOL décapé, fortement dénaturé	0,4
UTS 3	ANTHROPOSOL RECONSTITUE urbain sur LUVISOL DEGRADE REDOXISOL décapé, fortement dénaturé	0,6
UTS 4	LUVISOL DEGRADE REDOXISOL urbain anthropisé, peu dénaturé	0,5
UTS 5	BRUNISOL - REDOXISOL	1,1
UTS 6	BRUNISOL	0,2
UTS 7	ANTHROPOSOL RECONSTITUE urbain sur BRUNISOL décapé, fortement dénaturé	1,2
UTS 8	REDOXISOL	1,5
UTS 9	REDOXISOL alluvio-colluvial	0,1
UTS 10	ANTHROPOSOL RECONSTITUE urbain sur BRUNISOL lithique décapé, fortement dénaturé	3,2
UTS 11	LUVISOL TYPIQUE - REDOXISOL	0,7
UTS 12	BRUNISOL luvique	0,6
UTS 13	ANTHROPOSOL RECONSTITUE urbain sur LUVISOL TYPIQUE REDOXISOL décapé, fortement dénaturé	0,9
UTS 14	LUVISOL TYPIQUE REDOXISOL urbain, anthropisé, peu dénaturé	0,3
UTS 15	LUVISOL TYPIQUE - REDOXISOL sablé pseudo-dénaturé	0,1
UTS 16	ANTHROPOSOL RECONSTITUE compacté sur REDOXISOL, fortement dénaturé	1,0
UTS 17	ANTHROPOSOL ARTIFICIEL recouvert d'un revêtement synthétique, extrêmement dénaturé	0,5
UTS 18	ANTHROPOSOL RECONSTITUE compacté, fortement dénaturé	0,1
UTS 19	COLLUVIOSOL - REDOXISOL	0,4
UTS 20	ANTHROPOSOL ARTIFICIEL urbain sur remblai de gravats, extrêmement dénaturé	0,5
UTS 21	BRUNISOL lithique	0,5
UTS 22	BRUNISOL lithique - REDOXISOL	0,3
UTS 23	BRUNISOL lithique urbain, anthropisé, tronqué, peu dénaturé	1,1
UTS 24	REDOXISOL à horizon réductique de profondeur alluvio-colluvial	2,1
UTS 25	COLLUVIOSOL	1,9
UTS 26	ANTHROPOSOL RECONSTITUE urbain sur COLLUVIOSOL, fortement dénaturé	1,4
UTS 27	ANTHROPOSOL ARTIFICIEL urbain sur remblai de matériaux pédologiques, extrêmement dénaturé	0,1
UTS 28	ANTHROPOSOL ARTIFICIEL stabilisé par damage de gravats, totalement dénaturé	1,8
UTS 29	ANTHROPOSOL RECONSTITUE urbain sur LUVISOL rédoxique décapé, fortement dénaturé	0,7
UTS 30	BRUNISOL leptique	2,6
UTS 31	ANTHROPOSOL RECONSTITUE urbain nivelé sur REDOXISOL décapé, fortement dénaturé	0,2
UTS 32	REDOXISOL anthropisé, nivelé et tronqué, peu dénaturé	0,6
UTS 33	BRUNISOL rédoxique urbain anthropisé et tronqué, peu dénaturé	0,7
UTS 34	BRUNISOL urbain anthropisé et tronqué, peu dénaturé	0,3
UTS 35	BRUNISOL - REDOXISOL urbain, anthropisé, nivelé et tronqué, peu dénaturé	0,3

### 3.4.2. La carte des sols urbains

La carte des sols urbains affiche 26 UCS (Figure 7). Elles sont nommées selon trois termes: (1) leur degré d'anthroposolisation et de dénaturation pédologique, (2) les variables pédologiques (texture, hydromorphie...), et (3) la situation litho-morphologique

D'une part, la géométrie anguleuse de certaines UCS révèle l'intensité de leur anthroposolisation et dénaturation (ex : UCS 12 et 10). D'autre part, il demeure des endroits où l'information n'est pas obtenue: l'UCS 27 correspond à une enceinte pénitentiaire.

La carte de représentativité associée illustre l'intérêt des valeurs proposées. Elle exprime la valeur de représentativité surfacique dominante de chaque UCS, et est obtenue en sommant le pourcentage de représentativité des UTS de dénaturation pédologique identique.

### 3.4.3. La carte de dénaturation des sols

Contre toute attente, la majorité des UCS n'apparaît pas si dénaturée qu'on l'imagine (Figure 8): 15 UCS sur 26, soit 71 % de la surface, ne le sont pas ou que de manière peu représentée. Elles correspondent surtout aux quartiers d'HLM et lotissements les plus distants du centre-ville. La figure 9 montre un Luvisol - Rédoxisol (UTS 11) resté jusqu'à présent originel en lotissement d'avant 1965.

On note également que les UCS à végétation restée naturelle sont peu affectées alors que celles relevant d'aménagements sportifs et d'infrastructures de grande ampleur le sont fortement. Des écarts importants existent aussi entre types de zones habitées et époques de construction; sur le terrain, ces limites sont parfois concrètes, matérialisées par des décrochés topographiques liés aux activités de terrassements.

## DISCUSSION

### Anticipation de la variabilité des sols urbains

Ce travail témoigne de la pertinence du RRP 44 pour entreprendre une cartographie des sols urbains à grande échelle ( $\leq 1/10\ 000$ ). D'une part, il détient les lois locales de l'organisation spatiale des sols, qui demeurent indépendantes de l'échelle d'intérêt. D'autre part, il constitue un inventaire de sols locaux, qui permet d'apprécier d'éventuelles dénaturations pédologiques ou anthroposolisations. Ces perturbations étant par ailleurs assez bien corrélées aux entités d'usages affichées par la carte du MUS, leur anticipation est donc envisageable par la conceptualisation suivante :

$$\begin{aligned} \text{Sols urbains} &= f\left(\frac{\text{Pédogenèse originelle}}{\text{Dénaturation pédologique}}\right) \\ &= f\left(\frac{\text{Climat} \times \text{Lithologie} \times \text{Morphologie} \times \text{Organismes} \times \text{Durée}}{\text{Mode d'urbanisation des sols}}\right) \end{aligned}$$

Alors la proposition de l'anticipation des sols avant observation de terrain est la suivante :

$$\text{Sols urbains prévisionnels} = f\left(\frac{\text{Transposition du RRP au milieu urbain}}{\text{Vocation d'usage} \times \text{Epoque d'urbanisation}}\right)$$

Finalement le recours à des UCS complexes à grandes échelles apparaît nécessaire pour appréhender l'éventuelle variabilité anthropique des sols urbains.

### Représentativité des UTS au sein des UCS

Le tableau 1 montre que 29 des 35 UTS sont caractérisées par une densité d'au moins 0,3 sondage par ha; minimum habituellement requis au 1/10 000 (Legros, 1996). Elles occupent 76 % de la surface totale et correspondent à 49 % des UTS dominantes. Pour 11 d'entre elles, la densité atteint 1 sondage par ha sur 17 % de la surface et 40 % des UTS dominantes. Les 6 UTS de densité de sondages moins représentative occupent 24 % du secteur d'étude.

Il semble qu'en contexte urbain la forte variabilité anthropique des UTS serait mieux représentée par une densité d'au moins 1 sondage par ha. Si la marge de progression est limitée en contexte très imperméabilisé, elle s'avère possible ailleurs après obtention des autorisations nécessaires (cela n'a pas été possible dans le temps imparti à ce travail).

Le nombre d'UTS est très élevé par rapport à un contexte rural en même situation litho-morphologique (RRP 44 pris comme référence). On obtient en effet 30 à 50 % d'UTS supplémentaires. Cela est indépendant de l'échelle puisque le RRP de Loire Atlantique se veut exhaustif; ce sont bien l'anthroposolisation et la dénaturation pédologique qui favorisent la démultiplication des UTS urbaines. Ce phénomène est constaté sur 51 % des UTS.

Notons qu'en terrain urbain, le pédologue doit adapter son approche du milieu: par exemple un accident topographique brutal peut expliquer de manière robuste une limite entre une UTS peu anthropisée et sa variante tronquée. Un autre constat de terrain est que si les constructions masquent par endroits le relief habituellement mis en évidence par la surface des sols, celui-ci peut néanmoins être révélé en prenant les bâtiments comme repères (ex: toitures en escaliers de maisons de même hauteur le long d'un versant, ou courbes des rues suivant une courbe de niveau ou un talweg). Cette adaptation aux caractéristiques morphologiques particulières du milieu urbain est essentielle pour le pédologue cartographe.

Figure 7 : Carte des sols urbains du quartier nord de Nantes et du sud d'Orvault.

Figure 7: Urban soil map of the northern district of Nantes and southern of Orvault.

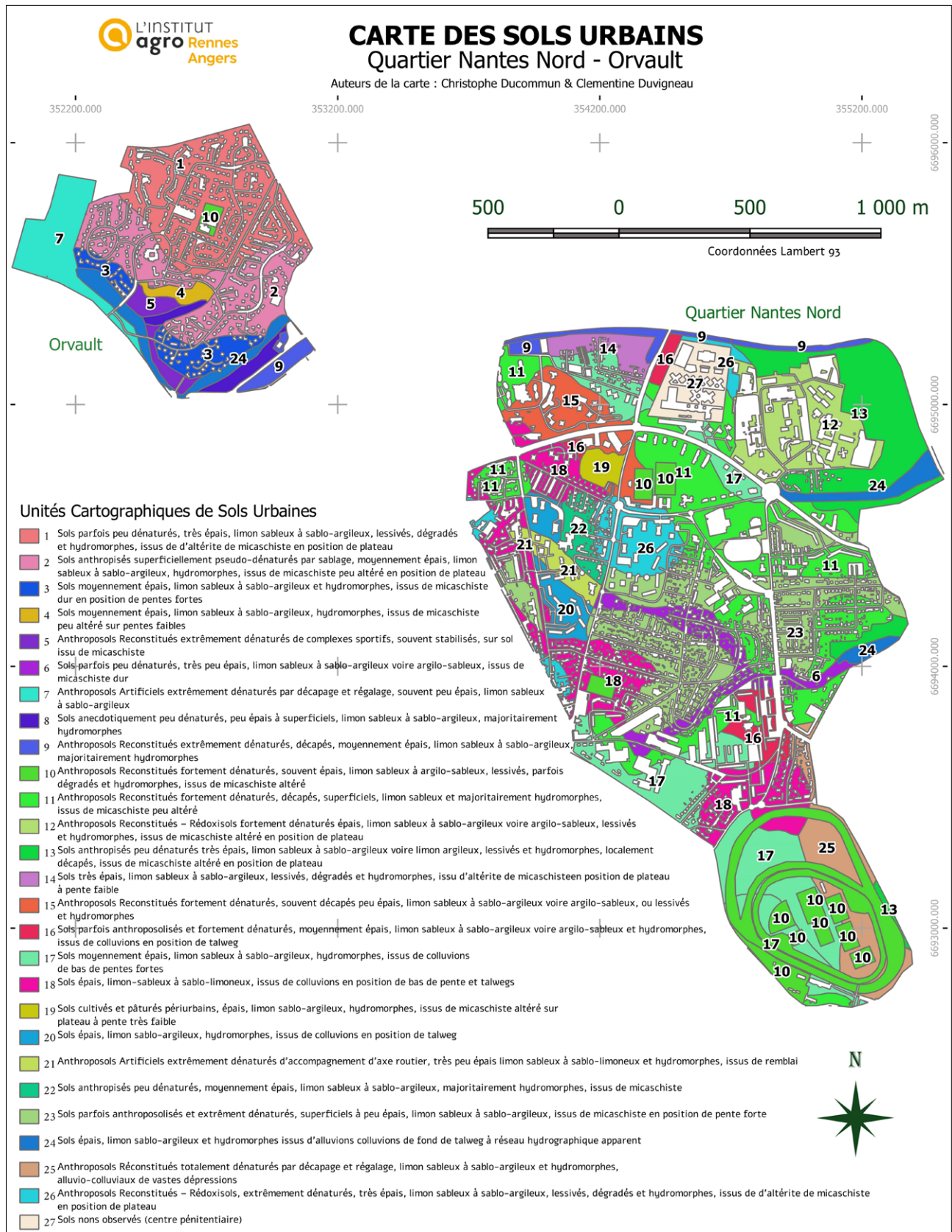
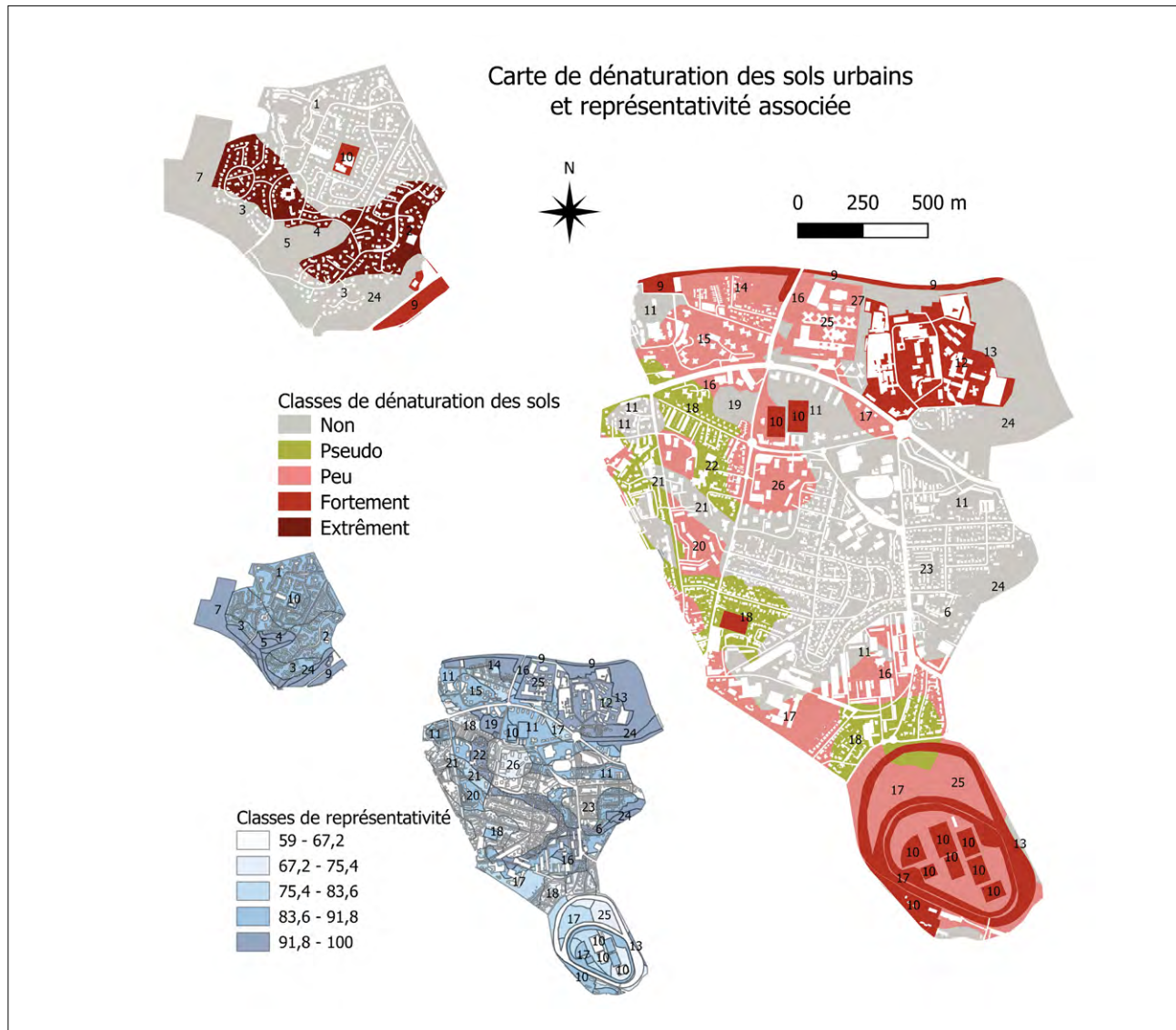


Figure 8 : Carte du degré de dénaturation pédologique.

Figure 8: Map of the degree of denaturation of soils.



### Représentativité des UCS

Comme en milieu rural ou naturel, raisonner la constitution d'UCS complexes est important pour garantir l'opérationnalité des cartes thématiques dérivées. Il est donc nécessaire d'afficher la représentativité de l'information délivrée par chaque carte thématique. Dans le cadre de ce travail, les UCS possèdent souvent une bonne représentativité puisque d'une part sur 26 UCS, 10 sont « simples ». D'autre part, parmi les 16 UCS complexes, la moitié ne contient que 2 UTS et l'autre moitié en contient 3 à 7. Précisons qu'une zone tampon très remaniée d'environ 1 à 3 mètres autour des bâtiments, n'est pas incluse dans les UCS.

Les UCS affichent 19 UTS dominantes sur 35, dont 4 deux fois (UTS 1, 2, 6 et 8), et 1 trois fois (UTS 21). Parmi elles, 6 dominent la surface de leur UCS à plus de 90 %, 11 UTS entre 65 et 80 %, et 1 seule UTS à 50 %. Dans ce dernier cas, l'UTS secondaire représente à peine 9 %. D'une manière générale, les UTS secondaires ne dépassent jamais 20 % de représentativité.

Ainsi, les UTS renseignent les UCS de manière satisfaisante, ce qui apporte du crédit et une relative « pureté » aux cartes thématiques dérivées. Cette information est importante, car la nécessité d'afficher une information perceptible consiste souvent à illustrer les UCS au moyen de leur UTS dominante.

**Figure 9 :** Luvisol Typique - Rédoxisol (RP) issus de schiste altéré en position plane de lotissement construit avant 1965 (Christophe Ducommun).

**Figure 9:** Luvisol Typique - Rédoxisol (RP) from weathered shale in flat position of subdivision built before 1965 (Christophe Ducommun).



## Dénaturation et changement d'usage

La description de la dénaturation des sols dans ce secteur, en lien avec le changement d'usage, montre que 71 % de la surface a été peu impactée. Libessart *et al.* (2022) proposent de s'appuyer aussi sur la trajectoire historique d'un sol et le nombre de changements d'usages qu'il a subi au cours de son histoire, pour traduire l'évolution du profil de sol de la première couronne parisienne (Métropole du Grand Paris). Or, comme le montre notre étude, un changement d'usage du sol n'est pas forcément synonyme d'une anthroposolisation ou d'une dénaturation pédologique...

## Limites de la méthode

Une première limite méthodologique concerne les possibilités d'exploration en contexte de parcellaire privé et d'imperméabilisation soutenus. Cette pression implique souvent une densité d'observations moins robuste qu'en milieu rural. Résoudre en partie cette difficulté nécessiterait de consacrer un temps important pour obtenir les nombreuses autorisations d'accès. La seconde difficulté consiste à distinguer les éventuels degrés de modifications des solums originels. Un pédologue local et expérimenté disposera assurément de la meilleure expertise. Plus généralement, nous montrons ici une application

**Tableau 2 : Nomenclature des 26 UCS et classe de pourcentage des UTS dominantes dans chaque UCS****Table 2: Nomenclature of the 26 UCS and percentage class of the dominant UTS in each UCS.**

Numéro UCS	Nom UCS (Référentiel Pédologique 2008)	Surf (ha)	Représentativité des UTS en % dans chaque UCS							
			1	14						
UCS 1	Sols parfois peu dénaturés, très épais, limon sableux à sablo-argileux, lessivés, dégradés et hydromorphes, issus de d'altérite de micaschiste en position de plateau	25,6	1	14						
			90%	10%						
UCS 2	Sols anthropisés superficiellement pseudo-dénaturés par sablage, moyennement épais, limon sableux à sablo-argileux, hydromorphes, issus de micaschiste peu altéré en position de plateau	18,9	15	35						
			90%	10%						
UCS 3	Sols moyennement épais, limon sableux à sablo-argileux et hydromorphes, issus de micaschiste dur en position de pentes fortes	6,1	6	7						
			90%	10%						
UCS 4	Sols moyennement épais, limon sableux à sablo-argileux, hydromorphes, issus de micaschiste peu altéré sur pentes faibles	1,4	5							
			100%							
UCS 5	Sols moyennement épais, limon sableux à sablo-argileux, hydromorphes, issus de colluvions de bas de pentes fortes	2,7	6							
			100%							
UCS 6	Sols épais, limon-sableux à sablo-limoneux, issus de colluvions en position de bas de pente et talwegs	9,1	8							
			100%							
UCS 7	Sols cultivés et pâturés périurbains, épais, limon sablo-argileux, hydromorphes, issus de micaschiste altéré sur plateau à pente très faible	8,8	11	12						
			80%	20%						
UCS 8	Sols épais, limon sablo-argileux, hydromorphes, issus de colluvions en position de talweg	2,5	19							
			100%							
UCS 9	Anthrosols Artificiels extrêmement dénaturés d'accompagnement d'axe routier, très peu épais limon sableux à sablo-limoneux et hydromorphes, issus de remblai	7,3	20							
			100%							
UCS 10	Anthrosols Reconstitués extrêmement dénaturés de complexes sportifs, souvent stabilisés, sur sol issu de micaschiste	22,9	18	4	13	16	17	32	28	
			50%	9%	9%	9%	9%	9%	9%	5%
UCS 11	Sols parfois peu dénaturés, très peu épais, limon sableux à sablo-argileux voire argilo-sableux, issus de micaschiste dur	44,5	21	6	22	23				
			70%	10%	10%	10%				
UCS 12	Anthrosols Artificiels extrêmement dénaturés par décapage et régalaage, souvent peu épais, limon sableux à sablo-argileux	19	27							
			100%							
UCS 13	Sols anecdotiquement peu dénaturés, peu épais à superficiels, limon sableux à sablo-argileux, majoritairement hydromorphes	19,8	21	25	23					
			95%	3%	2%					
UCS 14	Anthrosols Reconstitués extrêmement dénaturés, décapés, moyennement épais, limon sableux à sablo-argileux, majoritairement hydromorphes	4	7							
			100%							
UCS 15	Anthrosols Reconstitués fortement dénaturés, souvent épais, limon sableux à argilo-sableux, lessivés, parfois dégradés et hydromorphes, issus de micaschiste altéré	10	3	29	4	5				
			65%	20%	10%	5%				
UCS 16	Anthrosols Reconstitués fortement dénaturés, décapés, superficiels, limon sableux et majoritairement hydromorphes, issus de micaschiste peu altéré	5,8	10							
			100%							
UCS 17	Anthrosols Reconstitués - Rédoxisols fortement dénaturés épais, limon sableux à sablo-argileux voire argilo-sableux, lessivés et hydromorphes, issus de micaschiste altéré en position de plateau	28,8	2	11	13	14	32	33		
			70%	6%	6%	6%	6%	6%		
UCS 18	Sols anthropisés peu dénaturés très épais, limon sableux à sablo-argileux voire limon argileux, lessivés et hydromorphes, localement décapés, issus de micaschiste altéré en position de plateau	26,3	14	11	13	15				
			70%	20%	7%	3%				
UCS 19	Sols très épais, limon sableux à sablo-argileux, lessivés, dégradés et hydromorphes, issu d'altérite de micaschiste en position de plateau à pente faible	1,9	1							
			100%							
UCS 20	Anthrosols Reconstitués fortement dénaturés, souvent décapés peu épais, limon sableux à sablo-argileux voire argilo-sableux, ou lessivés et hydromorphes	5,7	13	14						
			90%	10%						
UCS 21	Sols parfois anthroposolisés et fortement dénaturés, moyennement épais, limon sableux à sablo-argileux voire argilo-sableux et hydromorphes, issus de colluvions en position de talweg	3,4	8	31						
			80%	20%						
UCS 22	Sols anthropisés peu dénaturés, moyennement épais, limon sableux à sablo-argileux, majoritairement hydromorphes, issus de micaschiste	3,8	35	34						
			80%	20%						
UCS 23	Sols parfois anthroposolisés et extrêmement dénaturés, superficiels à peu épais, limon sableux à sablo-argileux, issus de micaschiste en position de pente forte	35,2	21	7	34	30	26	25		
			60%	20%	10%	5%	3%	2%		
UCS 24	Sols épais, limon sablo-argileux et hydromorphes issus d'alluvions colluvions de fond de talweg à réseau hydrographique apparent	8,4	9	24						
			95%	5%						
UCS 25	Anthrosols Réconstitués totalement dénaturés par décapage et régalaage, limon sableux à sablo-argileux et hydromorphes, alluvio-colluviaux de vastes dépressions	8,8	31							
			100%							
UCS 26	Anthrosols reconstitués - Rédoxisols, extrêmement dénaturés, très épais, limon sableux à sablo-argileux, lessivés, dégradés et hydromorphes, issus de d'altérite de micaschiste en position de plateau	10,4	2	4	1					
			70%	20%	10%					

qui est relative aux sols non totalement imperméabilisés par des constructions ou des infrastructures où le creusement de profils ou de sondages est impossible. En d'autres termes, nous excluons de fait de l'étude pédologique une grande partie des zones urbanisées où les sols ont cependant pu être totalement décapés et/ou avoir perdu une très grande partie de leurs services écosystémiques originels.

## CONCLUSION

La production d'une carte pédologique urbaine à grande échelle (1/10 000) offre aux acteurs locaux une information continue et en profondeur des propriétés des sols, superposable aux détails d'aménagements. Utilisée seule, ou croisée avec d'autres sources, cette information améliore l'approche des multiples problématiques agro-environnementales urbaines. Elle permet notamment d'anticiper d'éventuelles opérations de génie pédologique d'anthroposolisation ou de renaturation pédologique. Pour cartographier les sols urbains, il convient d'accéder à deux sources d'informations capitales aujourd'hui accessibles : (1) le RRP local, qui est sensé détenir les lois d'organisation des sols non scalaires et autorise une prédiction de la pédogenèse en milieu urbain, et (2) les photographies aériennes, associés ou non à d'autres documents traduisant le mode d'occupation des sols au cours du temps, qui permettent d'envisager des entités surfaciques homogènes concernant d'éventuelles anthroposolisations et dénaturations pédologiques.

Le recours à des UCS complexes à grande échelle apparaît également nécessaire pour relater la probable variabilité anthropique des sols urbains.

Enfin, d'autant plus que si l'on considère que pour une ville, environ 70 % du territoire hors centre historique a changé une seule fois d'usage (Libessart *et al.*, 2022) depuis 1950, alors la méthodologie semble reproductible sur la surface des métropoles urbaines où l'urbanisation des périphéries agricoles est récente et similaire. Cela reste à expérimenter sur d'autres quartiers ou villes en excluant les centres historiques très imperméabilisés.

## REMERCIEMENTS

Cette étude a été réalisée dans le cadre d'un projet collaboratif de recherche SUPRA-Sols urbains et projets d'aménagement (AAP GRAINE -SUPRA 1772C0021) financé par l'ADEME et les partenaires du projet.

L'IRSTV a financé le stage de master 2 de Clémentine Duvigneau et favorisé l'accès au territoire de la ville de Nantes, étudié dans le cadre du projet URBINAT (Horizon H2020).

## BIBLIOGRAPHIE

- Artificialisation des sols, Ministère de la Transition écologique. 2022. <https://www.ecologie.gouv.fr/artificialisation-des-sols>
- Baize D., Girard MC., 2008. Référentiel pédologique 2008. Editions Quae, 406 p.
- Burghardt W. 2007. Urban soil ecology - involvement of diverse land use types. Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International conference on managing urban land. Stuttgart, pp. 345-357.
- Burghardt, W., Morel, J.L., Zhang, G.L., 2015. Development of the soil research about urban, industrial, traffic, mining and military areas (SUITMA), Soil Science and Plant Nutrition, 61:sup1, 3-21, DOI: 10.1080/00380768.2015.1046136
- CGDD, SOeS 2009. CORINE Land Cover France : Guide d'utilisation. Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de l'Aménagement du territoire. 22 pages. [https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/sites/default/files/2018-12/clc-guide-d-utilisation-02\\_0.pdf](https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/sites/default/files/2018-12/clc-guide-d-utilisation-02_0.pdf)
- Corbeau D., 2015. Cartographie des sols en milieu urbain sur la ville d'Angers. Rapport de stage de pédologie IUT Angers.
- Cornu S., Keller C., Béchet B., Delolme C., Schwartz C., Vidal-Beaudet L., 2021. Pedological characteristics of artificialized soils: a snapshot. Geoderma 401: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115321>
- Ducommun C., 2017. Référentiel Pédologique des Pays de la Loire, département de Loire Atlantique, Carte notice et banque de données. <https://www.geoportail.gouv.fr/donnees/carte-des-sols>
- Effland W.R., Pouyat R.V., 1997. The genesis, classification and mapping of soils in urban areas. Urban Ecosystems, 1 : 217-228
- European Commission, 2020. Urban Atlas Mapping Guide v6.2, European Union, 47 p. [https://land.copernicus.eu/user-corner/technical-library/urban\\_atlas\\_2012\\_2018\\_mapping\\_guide](https://land.copernicus.eu/user-corner/technical-library/urban_atlas_2012_2018_mapping_guide)
- FAO, WRB, 2014. World reference base for soil resources 2014, international soil classification system for naming soils and creating legends, Soil world resources reports n°106, Rome, 2015.
- Galbraith J., Shaw R., 2018. SSM - Ch. 11. Human-Altered and Human-Transported Soils <https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/soils/ref/?cid=nrcseprd1343023>
- Jégou L., 2009. « Base de données d'occupation des sols Corine Land Cover : nouvelles données et nouveaux outils », Mappemonde 95. <http://mappemonde.mgm.fr/num23/intern/int09301.html>
- Legros, J.-P., 1996. Cartographies des sols, De l'analyse spatiale à la gestion des territoires, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 370 p.
- 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, Etude et Gestion des Sols, 27, pp. 361-376
- Makki, M., Thestorff, K., Hilbert, S. S. Thelemann., L. Makowsky., 2021. Guideline for the description of soils in the Berlin metropolitan area: an extension for surveying and mapping anthropogenic and natural soils in urban environments within the German soil classification system. J Soils Sediments 21, pp. 1998-2012.
- Makowsky L, Schneider J, 2017. Urban soil surveys - the case of Germany. In: Levin MJ, John Kim KH, Morel JL, Burghardt W, Charzynski P, Shaw RJ, IUSS Working Group SUITMA (eds) Soils within cities, global approaches to their sustainable management - composition, properties, and functions of soils of the urban environment. Schweizerbart, Stuttgart, pp. 113-123
- Morel, J.L., Chenu, C., Lorenz, K., 2015. Ecosystem services provided by soils of urban, industrial, traffic, mining, and military areas (SUITMAs). J. Soils Sediments 15, pp. 1659-1666.
- Libessart G., Franck-Néel C., Branchu P., Schwartz C., 2022. The human factor of pedogenesis described by historical trajectories of land use: The



- case of Paris. *Landscape and Urban Planning*, 222, 104393. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2022.104393>
- Robert S., Autran J., 2012. Décrire à grande échelle l'occupation des sols urbains par photo-interprétation. Réflexion méthodologique et expérimentation en Provence », *Sud-Ouest européen*. [En ligne], 33 | 2012, mis en ligne le 09 décembre 2013, consulté le 03 janvier 2022. URL: <http://journals.openedition.org/soe/193>; DOI : <https://doi.org/10.4000/soe.193>
- Ryan, K., 2015. Chicago Soil Survey: Human-altered/human transported soil criteria and classification. USDA-NRCS
- Shaw R., Isleib J, 2017. Urban soil surveys - the case of New York City soil survey program, United States. In: Levin MJ, John Kim KH, Morel JL, Burghardt W, Charzynski P, Shaw RJ, IUSS Working Group SUITMA (eds) *Soils within cities, global approaches to their sustainable management - composition, properties, and functions of soils of the urban environment*. Schweizerbart, Stuttgart, pp. 107-112
- Shaw R. K., Riddle, R. L., 2019. NYC & LA: A comparison of soil patterns using soil survey data, USDA-NCRS. (poster)
- Schwartz, C., 2013. Sols urbains : un champ d'exploration pour pédologues et agronomes. Webinaire consultable à l'adresse : <https://vimeo.com/channels/webinairesafes/63525439>
- Ters M., Marchand J., Weecksteen G., 1968. Carte géologique de Nantes au 1/50 000 et notice.
- Vargas O, 2018. The New York City Soil Survey. USDA-NRCS <https://nyfederation.org/wp-content/uploads/2018/pdf2018/71%20VargasO.pdf>
- Vidal-Beaudet L., Rossignol J-P, 2018. Les sols urbains : artificialisation et gestion. In C. Valentin coordination, *les sols au cœur de la zone critique 5 : Dégradation et réhabilitation*. Série de sols coordonnée par Christian Valentin, Collection système Terre-environnement, ISTE éditions, 260 p.
- Voltz, M., Arrouays, D., Bispo, A., Lagacherie, P., Laroche, B., Lemerrier, B., Richer de Forges, A., Sauter, J., Schnebelen, N. 2018. *La cartographie des sols en France Etat des lieux et perspectives*. INRA, France, 112 p.

