



HAL
open science

Entre fonctionnalité et usages : quelles possibilités de prise en compte des sols dans les documents de planification avec le ZAN comme levier ?

Alice Lapeyre

► To cite this version:

Alice Lapeyre. Entre fonctionnalité et usages : quelles possibilités de prise en compte des sols dans les documents de planification avec le ZAN comme levier ?. Sciences du Vivant [q-bio]. 2024. dumas-04737757

HAL Id: dumas-04737757

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-04737757v1>

Submitted on 15 Oct 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

L'Institut Agro Rennes-Angers
 Site d'Angers Site de Rennes

<p>Année universitaire : 2023 - 2024 Spécialité : Paysage Spécialisation (et option éventuelle) : Projet de Paysage, Site et Territoire (PPST)</p>	<p>Mémoire de fin d'études</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> d'ingénieur de l'Institut Agro Rennes-Angers (Institut national d'enseignement supérieur pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement)</p> <p><input type="checkbox"/> de master de l'Institut Agro Rennes-Angers (Institut national d'enseignement supérieur pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement)</p> <p><input type="checkbox"/> de l'Institut Agro Montpellier (étudiant arrivé en M2)</p> <p><input type="checkbox"/> d'un autre établissement (étudiant arrivé en M2)</p>
--	--

Entre fonctionnalité et usages : quelles possibilités de prise en compte des sols dans les documents de planification avec le ZAN comme levier ?

Par : Alice LAPEYRE



Soutenu à Angers le 5 septembre 2024

Devant le jury composé de :

Président : Thomas COISNON

Maître de stage : Yoann FIASCHI

Enseignant référent : Jean-Pierre DUCOS

Les analyses et les conclusions de ce travail d'étudiant n'engagent que la responsabilité de son auteur et non celle de l'Institut Agro Rennes-Angers

Ce document est soumis aux conditions d'utilisation «Paternité-Pas d'Utilisation Commerciale-Pas de Modification 4.0 France» disponible en ligne <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.fr>



REMERCIEMENTS

En premier lieu, je tiens à remercier toutes les personnes que j'ai croisées de près ou de loin pendant mon passage à l'école et qui ont fait de ces trois années un chapitre inoubliable de ma scolarité : mes camarades de promotion pour leur joie de vivre, leur solidarité et leur esprit de fête ; le corps enseignant pour sa bienveillance, ses transmissions de savoir et son implication. J'adresse des remerciements plus particuliers à Thomas COISNON et Nathalie CARCAUD pour leur sympathie et les opportunités uniques qu'ils nous ont offertes lors de cette dernière année de spécialisation.

Ensuite, un grand merci à l'équipe de l'agence angevine de Citadia, dirigée par Gwenaël BOIDIN, pour leur gentillesse, leur écoute et leurs précieuses connaissances : Perrine, Soline, Lucas, Alexis, Jeanne, Marie, Louise et Aymeric. Merci aussi à Julien et Lucas pour leurs nombreux conseils sur la partie SIG et à Landry et Savita, également stagiaires chez Citadia. J'adresse de sincères remerciements à Yoann FIASCHI, mon maître de stage, pour son accompagnement, sa gentillesse et sa disponibilité sans faille tout au long de mon stage.

Je remercie également Monsieur Jean-Pierre DUCOS, mon enseignant référent, pour son suivi régulier et qualitatif et pour les échanges toujours enrichissants que nous avons pu avoir lors de l'élaboration de ce mémoire.

Enfin, je ne dirais jamais assez merci à mes parents, ma sœur et le reste de mon entourage pour leur soutien tout au long de mon parcours scolaire. Un merci tout particulier à toi, Natacha.

AVANT-PROPOS

Mon stage de fin d'étude s'est déroulé à l'agence angevine de CITADIA et plus particulièrement chez Even Conseil, de mars à août 2024.

En 2017, CITADIA rejoint le groupe SCET, acteur d'intérêt général et filiale à 100% de la Caisse des Dépôts. Au sein de la société CITADIA, sont regroupées 5 marques ayant chacune une expertise particulière :

- **Citadia Conseil** : accompagne les villes et les territoires dans leurs démarches de planification urbaine, leurs réflexions stratégiques, leurs projets d'aménagement du territoire.
- **Even Conseil** : accompagne les territoires dans leurs transitions d'adaptation et d'atténuation face au dérèglement climatique à travers des projets au moindre impact environnemental.
- **Citadia Design** : dédiée à la programmation urbaine, au management de projets urbains complexes et à la maîtrise d'œuvre urbaine et paysagère.
- **Aire Publique** : accompagne tous les acteurs du territoire dans la conduite de démarches participatives, de participation citoyenne et de fabrique d'intelligence territoriale.
- **MERC/AT** : propose une expertise en matière de politique de l'habitat, de définition des besoins en logements et de programmation immobilière résidentielle et d'activité.

Au niveau hiérarchique, Romain LUCAZEAU est le directeur général du groupe SCET, Anne MATYSEN la directrice générale de CITADIA et Gwenaël BOIDIN le directeur de l'agence d'Angers. Les autres agences se trouvent à Paris, Toulon, Lyon et Montauban.

Les bureaux de l'agence Grand Ouest regroupent des collaborateurs de Citadia Conseil, Even Conseil et Aire Publique, abritant ainsi des urbanistes, des paysagistes, des géomaticiens et des consultants.

LISTE DES ABREVIATIONS

ALUR : Accès au Logement et Urbanisme Rénové

EE : Evaluation environnementale

EIE : Etat Initial de l'Environnement

ELAN : Evolution du Logement, de l'Aménagement et du Numérique

ENAF : Espaces Naturels Agricoles et Forestiers

ERC : Eviter / Réduire / Compenser

OAP : Orientation d'Aménagement et de Programmation

PADD : Projet d'Aménagement et de Développement Durables

PAT : Plan Alimentaire Territorial

PCAET : Plan Climat Air Energie Territorial

PLU(i) : Plan Local d'Urbanisme (intercommunal)

PLUm : Plan Local d'Urbanisme métropolitain

PRPGD : Plan Régional de Prévention et de Gestion des Déchets

SCoT : Schéma de Cohérence Territoriale

SIG : Système d'Information Géographique

SRADDET : Schéma Régional d'Aménagement, de Développement Durable et d'Egalité des Territoires

SRCAE : Schéma Régional Climat Air Energie

SRCE : Schéma Régional de Cohérence Ecologique

SRI : Schéma Régional d'Intermodalité

SRIT : Schéma Régional des Infrastructures et des Transports

SRU : Solidarité et Renouvellement Urbain

TBr : Trame Brune

TVB : Trame Verte et Bleue

ZAN : Zéro Artificialisation Nette

ZNIEFF : Zone Naturelle d'Intérêt Ecologique, Faunistique et Floristique

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION	1
PARTIE 1 – LE SOL : FONDEMENTS ET CONCEPTS.....	3
1. Qu'est-ce qu'un sol ?	3
1.1. La composition du sol	4
1.2. La structure du sol	6
1.3. Les horizons	6
2. Particularités des sols urbains	9
3. Des fonctions aux services écosystémiques	11
3.1. Fonctions du sol	11
3.2. Services écosystémiques rendus par les sols urbains	12
3.3. Quels enjeux à la préservation des fonctions du sol ?	13
4. Perception du sol.....	14
PARTIE 2 – PRISE EN COMPTE DES SOLS DANS LES DOCUMENTS DE PLANIFICATION : ETAT DES LIEUX ET TRAVAUX RECENTS	16
1. Qu'est-ce qu'un document de planification ?.....	16
2. Prise en compte actuelle des sols dans les documents de planification.....	19
3. La trame : le bon outil pour la prise en compte des sols ?	19
3.1. Concept de trames	20
3.2. Projets territoriaux et de recherche : premières pistes de trames brunes ?...24	
3.3. Obstacles et freins	27
PARTIE 3 – PISTES DE REFLEXION.....	28
1. Enjeux croisés : préservation des sols et ZAN.....	28
2. Pistes pour une meilleure intégration des sols dans les documents produits en bureau d'étude	29
2.1. Question d'échelle.....	30
2.2. Prise en compte du compartiment sol dans un PLU(i) : approche pratique...30	
CONCLUSION.....	36
SITOGRAPHIE.....	37
BIBLIOGRAPHIE	40
ANNEXES.....	42

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE I : Carte de trame brune du SCoT de Lille Métropole

ANNEXE II : Plusieurs des éléments cartographiés pour la définition d'une méthodologie de trame brune à Limoges Métropole

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Interactions entre la pédosphère et les autres compartiments

Figure 2 : Triangle des textures

Figure 3 : Schéma de la structure du sol

Figure 4 : Horizons d'un sol lessivé sur lœss en Sibérie

Figure 5 : Anthropisation des sols

Figure 6 : Identification des fonctions du sol et leur rôle dans les services rendus par les écosystèmes

Figure 7 : Articulation des principaux documents de planification

Figure 8 : Structure de la Trame verte et bleue

Figure 9 : Une biodiversité du sol multi-échelle

Figure 10 : Conséquences de l'artificialisation sur les fonctionnalités des sols

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Description des horizons du sol

Tableau 2 : Caractéristiques générales des trois principaux documents de planification

Tableau 3 : Synthèse des prospectives d'intégration du sol dans les pièces du PLU(i)

INTRODUCTION

Dans un contexte de perte de la biodiversité à l'échelle planétaire et de changement climatique global, les sols apparaissent comme les grands oubliés en termes de protection, alors qu'ils abritent plus d'un quart de la biodiversité totale de la Terre (Jeffery et al., 2010). L'érosion de la biodiversité des sols, bien que peu visible, engendre de nombreuses conséquences. En effet, les sols et leur biodiversité sont essentiels à la régulation des écosystèmes terrestres et par conséquent au soutien des sociétés humaines par les services écosystémiques qu'ils prodiguent. Ceux-ci incluent, par exemple, la régulation du climat à travers le stockage du carbone, la purification de l'eau, ou encore le support de la production agricole. Cette réalité est d'autant plus cruciale dans le contexte actuel de changement climatique, car nombre des services rendus par les sols permettent d'en atténuer les effets [1]. En milieu urbain, où les pressions anthropiques sont particulièrement fortes, les sols fonctionnels contribuent à des services essentiels tels que la réduction des îlots de chaleur, la régulation des eaux pluviales pour prévenir les inondations, et la réduction des niveaux de pollution de l'air.

Toutefois, en dépit de ces services cruciaux, la prise de conscience de l'importance des sols a évolué plus lentement en milieu urbain que dans le secteur agricole. L'agriculture, confrontée depuis longtemps à des défis tels que l'érosion des sols, la baisse de fertilité et la diminution des rendements, a amorcé une transition vers des pratiques plus durables dès les années 1990, avec des initiatives telles que l'agriculture de conservation. En revanche, la préoccupation vis-à-vis des sols en milieu urbain est beaucoup plus récente, ces derniers étant souvent perçus simplement comme des supports pour les infrastructures et non comme des éléments essentiels au fonctionnement des écosystèmes urbains. Les effets de la dégradation de leur qualité et de leur fonctionnalité étant souvent imperceptibles, la préservation des sols n'était jusqu'alors pas une priorité.

Cependant, en 2021, la loi Climat et Résilience vient mettre la question du sol au premier plan avec l'objectif de Zéro Artificialisation Nette (ZAN). Cet objectif vise à limiter l'artificialisation des sols en France, c'est-à-dire l'altération durable de tout ou partie des fonctions écologiques d'un sol, en particulier de ses fonctions biologiques, hydriques et climatiques, ainsi que de son potentiel agronomique par son occupation ou son usage [2], réduisant ainsi sa capacité à fournir des services écosystémiques. Cette décision s'inscrit dans une volonté plus large de repenser l'aménagement du territoire pour le rendre plus compatible avec les impératifs écologiques et climatiques. En effet, selon le sixième rapport du GIEC, limiter l'artificialisation des sols est un levier crucial pour atténuer le changement climatique et renforcer la résilience des territoires face aux impacts déjà observés.

Le sujet des sols, étant vaste et complexe, n'est réellement exploré que depuis peu d'années, surtout en comparaison avec d'autres thématiques comme l'eau, l'air ou encore la biodiversité. Ce déficit de connaissances scientifiques limite les possibilités de sensibilisation et de prise en compte concrète de cet enjeu. Ainsi, après le concept de Trame Verte et Bleue (TVB), émerge celui de la Trame Brune (TBr), qui vise une meilleure préservation du sol en tant qu'écosystème. A l'instar de la TVB, elle serait composée de réservoirs et de corridors pédologiques assurant la continuité des sols [3].

Sur cette base, de plus en plus de territoires expérimentent le sujet, qui trouve peu à peu sa place dans les documents de planification. Cependant, des freins techniques et économiques ne permettent pas encore d'avoir une méthodologie applicable à tous les territoires.

Nous tenterons donc de répondre à la question suivante :

Afin de concilier fonctionnalité et usages, quelles sont les possibilités de prise en compte des sols dans les documents de planification avec le ZAN comme levier ?

Pour cela, nous commencerons par rappeler les bases permettant de comprendre le sol et ses fonctions écologiques et socio-économiques. Ensuite, nous examinerons la manière dont le sol est actuellement intégré dans les documents de planification territoriale en France, en mettant en lumière des initiatives pionnières. Enfin, nous envisagerons les perspectives et les leviers opérationnels pour une meilleure prise en compte des sols dans l'aménagement du territoire, en particulier à travers le prisme du ZAN.

PARTIE 1 – LE SOL : FONDEMENTS ET CONCEPTS

1. Qu'est-ce qu'un sol ?

Pour reprendre la définition proposée par l'agronome Albert Demolon en 1931, le sol peut être défini comme « *la formation naturelle de surface à structure meuble et d'épaisseur variable résultant de la transformation de la roche mère sous-jacente sous l'influence de processus physico-chimiques et biologiques* ». Il constitue en effet la couche supérieure de l'écorce terrestre de terre meuble, lentement formée et déposée sur une roche plus ou moins dure dont l'épaisseur varie de quelques centimètres à plusieurs mètres. C'est une interface entre les roches de la lithosphère, l'atmosphère, la biosphère et l'hydrosphère (Figure 1).

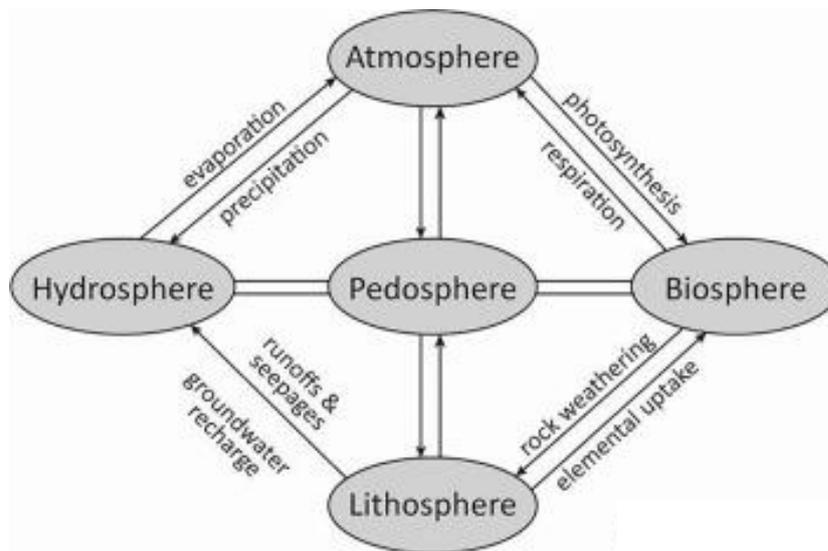


Figure 1 : Interactions entre la pédosphère et les autres compartiments (Dent et al., 2005)

L'origine du sol se trouve dans la combinaison particulière en un lieu et à un moment donné, du substratum minéral, du relief, de la végétation et du climat. Sous nos climats, on estime qu'un siècle est nécessaire pour former un centimètre de sol (Valentin, 2018). Le sol s'approfondit progressivement, des couches se différencient aboutissant à l'aspect actuel. Le sol actuel reflète ainsi cette longue histoire faite de la succession de plusieurs processus évolutifs. L'altération biogéochimique de la roche originelle débute avec la colonisation par des êtres vivants élémentaires, comme des algues et des lichens. Les transferts de matière et la formation des complexes organo-minéraux, du calcaire, fer, argile, composés organiques, aboutissent progressivement à la différenciation de niveaux superposés.

Pendant des périodes aussi longues, un site donné a subi une succession d'événements très différents et les processus de pédogenèse sont très dépendants des facteurs climatiques. Ainsi, la pédologie est une science de synthèse qui intègre des connaissances géologiques, climatologiques, paléontologiques, biologiques.

1.1. La composition du sol

Le sol se compose de plusieurs fractions : solide (matières organiques et minérales), liquide et gazeuse. Ces différents éléments ont des caractéristiques et des provenances bien spécifiques que nous allons détailler en suivant.

A. Constituants minéraux

L'analyse granulométrique du sol consiste à classer les éléments minéraux du sol d'après leur grosseur et à déterminer le pourcentage de chaque fraction. Ainsi, le sol peut être divisé en deux sous-parties : les éléments grossiers (cailloux et graviers) de plus de 2 mm et la terre fine qui est un ensemble formé par les argiles, les limons et les sables. En définissant leurs proportions respectives, cela permet de définir la texture d'un sol (Figure 2).

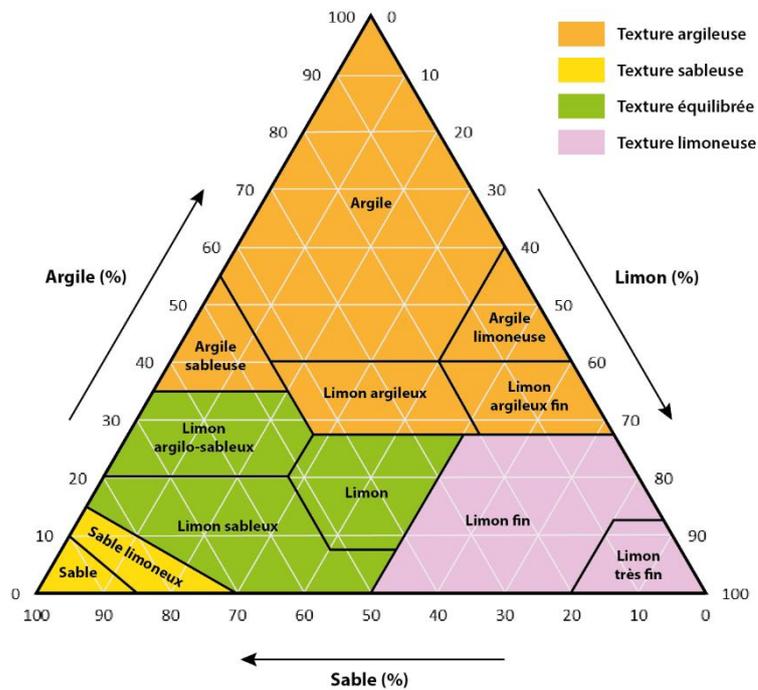


Figure 2 : Triangle des textures (Lapeyre, 2024 d'après Duchaufour, 1997)

Les éléments grossiers forment le squelette du sol. Ils forment la réserve minérale du sol, contribuent à la perméabilité du sol, peuvent avoir une action sur la chaleur du sol et peuvent participer à constituer une réserve d'eau en fonction du type de roche [4].

Les sables grossiers favorisent la pénétration de l'eau et de l'air dans le sol, retiennent peu l'eau et facilitent les échanges de température. Leur forte présence forme des sols légers car ils ne peuvent pas s'agglomérer en mottes. A l'inverse, les limons et sables fins rendent le sol battant, c'est-à-dire qu'il aura tendance à se tasser en surface et à retenir l'eau en s'opposant à son infiltration en profondeur.

B. Matières organiques

Le terme « matières organiques du sol » regroupe l'ensemble des constituants organiques morts ou vivants, d'origine végétale, animale ou microbienne, transformés ou non, présents dans le sol. Elles représentent en général 1 à 10 % de la masse des sols et se répartissent en 3 groupes [5] :

- Les **matières organiques vivantes**, animales, végétales, fongiques et microbiennes : elles englobent la totalité de la biomasse en activité (racines, vers de terre, microflore du sol...);
- Les **matières organiques fraîches** : débris d'origine végétale (résidus végétaux, exsudats), animale (déjections, cadavres), fongique et microbienne (cadavres, exsudats) ;
- Les **matières organiques stables** : ce sont des composés organiques stabilisés, matières humiques ou humus, provenant de l'évolution des matières précédentes. Elles représentent 70 à 90 % du total de la matière organique du sol.

En moyenne composées à 58 % de carbone organique, les matières organiques du sol libèrent du dioxyde de carbone (CO_2) et des composés organiques en se décomposant sous l'influence du climat et des conditions ambiantes du sol. L'évolution du stock de carbone organique dans les sols résulte ainsi de l'équilibre entre les apports de matières organiques végétales au sol et leur minéralisation.

Ces matières organiques assurent de nombreuses fonctions agronomiques et environnementales indispensables, notamment : le stockage et la mise à disposition des éléments nutritifs nécessaires pour les plantes, la stimulation de l'activité biologique ou encore la structuration et la stabilité du sol. Elles contribuent également à la perméabilité, à l'aération et à la capacité de rétention du sol.

C. Air et eau

Le sol joue un rôle crucial en tant que réservoir d'eau pour les plantes, leur fournissant la quasi-totalité de leurs besoins en eau. Cette eau dissout les éléments nutritifs, formant ainsi une solution du sol qui alimente les racines des plantes. La capacité de rétention d'eau d'un sol est proportionnelle à la finesse de sa texture : plus la texture est fine, plus le sol retient d'eau. En revanche, l'infiltration de l'eau est facilitée par une texture plus grossière, comme celle des sables, et par une structure plus poreuse, qui réduit le ruissellement. L'eau infiltrée se charge en oxygène, en dioxyde de carbone et en sels minéraux au fur et à mesure de son passage à travers le sol [6].

Par ailleurs, divers gaz circulent dans les interstices du sol, principalement le dioxyde de carbone (CO_2), l'oxygène (O_2), l'azote (N_2) et la vapeur d'eau (H_2O). La porosité et la distribution des pores du sol déterminent les échanges gazeux entre le sol et l'atmosphère. Une altération des échanges de gaz et de l'activité biologique modifie la composition du mélange gazeux dans le sol par rapport à celle de l'atmosphère.

L'air du sol, provenant de l'atmosphère, est essentiel pour le développement des plantes. Un déficit en oxygène, au même titre que l'eau, peut entraîner l'asphyxie des racines des plantes, perturbant leur croissance et leur santé. Il est également important de noter que la qualité de l'air dans le sol affecte non seulement les plantes, mais aussi une multitude de micro-organismes et de faune du sol, tels que les bactéries, les champignons, les insectes et les vers de terre. Une majorité de ceux-ci consomment de l'oxygène et rejettent du dioxyde de carbone (CO₂). Ces organismes jouent un rôle vital dans la décomposition de la matière organique, la formation de l'humus et l'amélioration de la structure du sol, contribuant ainsi à sa fertilité et à sa capacité à retenir l'eau et les nutriments.

1.2. La structure du sol

La structure d'un sol est le mode d'arrangement spatial des particules minérales et organiques entre elles. Elle résulte donc de la façon dont sont associés ces constituants élémentaires [7]. Cette association aboutit à des éléments structuraux agencés différemment les uns par rapport aux autres, selon les cas. Elle est caractérisée par :

- La **forme** des agencements et leur **taille** ;
- L'importance respective des vides et des pleins c'est-à-dire la **porosité** ;
- La **résistance des liaisons** qui unissent les constituants élémentaires entre eux ainsi que les éléments structuraux (limons, argiles, sables).

Cette structure dépend de la texture et du pourcentage de matières organiques et peut donc varier dans le temps. La structuration permet l'apparition de vides qu'on appelle la porosité structurale ou macroporosité.

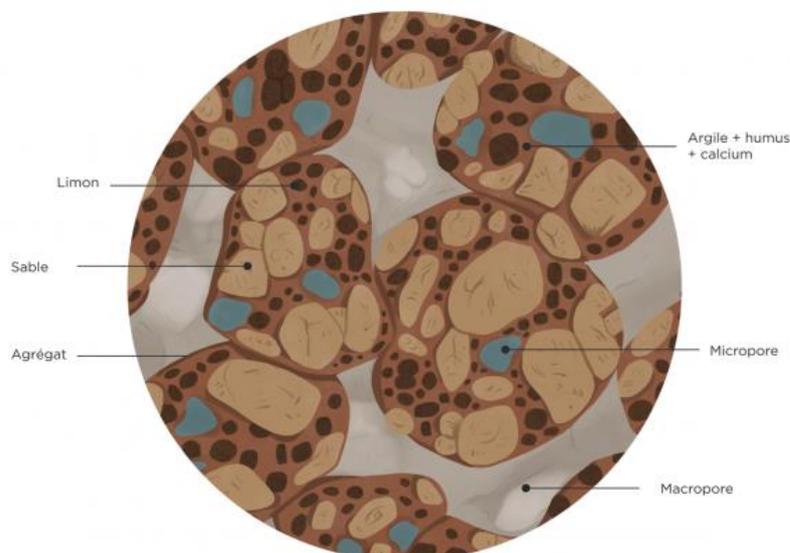


Figure 3 : Schéma de la structure du sol [8]

1.3. Les horizons

La couverture pédologique est en constante évolution, se développant à la fois à partir de la roche mère profonde et de la matière organique de surface. Ces transformations créent des volumes de matière minérale et organique superposés, appelés horizons, qui sont plus ou moins parallèles à la surface du sol.

Les horizons se reconnaissent par leur teinte, leur texture, la proportion de particules grossières qu'ils contiennent, ainsi que par la manière dont ces éléments et les espaces vides s'agencent entre eux. Verticalement, leur épaisseur peut varier de quelques centimètres à plusieurs mètres, avec des limites plus ou moins marquées en haut et en bas. Horizontalement, un horizon peut progressivement se fondre dans un autre sur une distance qui peut aller de quelques mètres à plusieurs kilomètres [9].

L'enchaînement des horizons forme ce qu'on appelle un profil pédologique, et l'ensemble des horizons dans une région donnée constitue la couverture pédologique. Ces horizons se forment par le biais de plusieurs processus :

- La désagrégation et l'altération de la roche mère sous-jacente sous l'effet conjugué de l'eau, de l'air et des conditions climatiques ;
- La transformation et le mélange des matériaux issus de cette altération (sables, limons, argiles) avec la matière organique récente (fragments végétaux et animaux) accumulée en surface, puis décomposée en humus ;
- La migration verticale, le déplacement et la fixation progressive de certains composants (minéraux, argile, fer, matière organique, etc.) au fil du temps.

D'après Alletto, de manière simplifiée, on distingue les principaux horizons suivants :

Tableau 1 : Description des horizons du sol [9b]

Lettre	Signification	Particularités
O	Organique (humus)	Horizon qui se forme suite à l'accumulation, la décomposition et surtout le maintien en surface de matières organiques. Très marqué dans les forêts et prairies, il l'est moins dans les sols travaillés car mélangés avec l'horizon sous-jacent, les matières organiques du sol étant alors « diluées » sur l'épaisseur travaillée.
A	Anthropique (surface ou arable)	Horizon sous influence de l'homme et de ses activités, notamment le travail du sol. C'est un horizon contenant des matières organiques en quantité significative grâce aux pratiques de travail du sol, mais aussi à l'abondance des racines de plantes s'y développant et s'y décomposant. Les activités biologiques y sont les plus intenses.
E	Eluvial	Horizon ayant « perdu » par éluviation certains de ses composants, notamment les argiles qui migrent en profondeur, laissant souvent une concentration de sable et de limon. Cet horizon n'est pas présent dans tous les sols et apparaît plutôt sous climat humide.
B	Subsurface	Horizons intermédiaires : variables dans leur composition, globalement pauvres en matières organiques et souvent plus compacts et denses que les horizons supérieurs. C'est une zone d'illuviation où les matériaux lessivés de l'horizon E s'accumulent.
C	Substratum	Roche mère meuble qui se décompose pour former le sol (matériaux parentaux altérés ou désagrégés).
R	Roche mère	Roche mère non altérée.

Chaque sol ne présente pas nécessairement tous ces horizons distincts (Figure 4). L'ordre et la vitesse d'apparition des superpositions des différents types d'horizons dépendent du climat, de la végétation, de la topographie, du matériau parental, et du temps pendant lequel ces facteurs ont influencé le sol (Figure 5). Ainsi, on observe des variations de profondeur de sol (profondeur jusqu'à l'apparition de la roche non altérée) selon les endroits du globe. Les sols européens font tout au plus quelques mètres alors qu'en zone tropicale ils peuvent atteindre plusieurs dizaines de mètres en raison de leur ancienneté.

Connaître la profondeur du sol est important pour de nombreuses problématiques agricoles ou environnementales, car plus le sol est profond, plus il peut stocker d'eau et d'éléments [10]. Cette caractéristique sera donc particulièrement importante à prendre en compte pour évaluer la capacité d'un sol à remplir un plus ou moins grand nombre de fonctions, les sols urbains ne faisant pas exception.

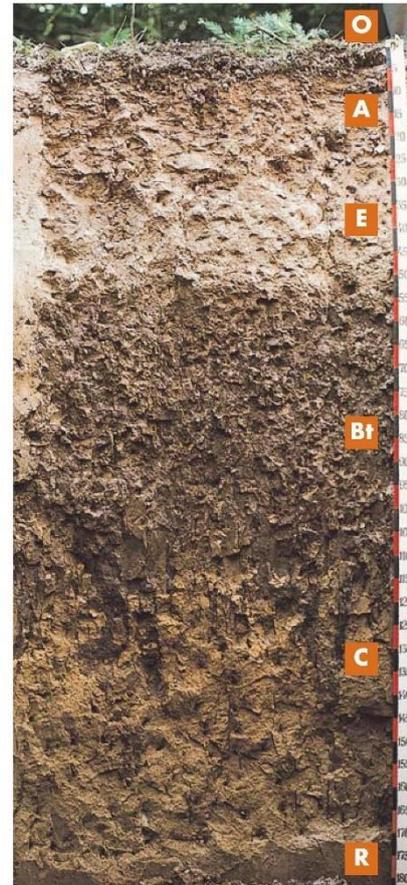


Figure 4 : Horizons d'un sol lessivé sur loess en Sibérie [10b]

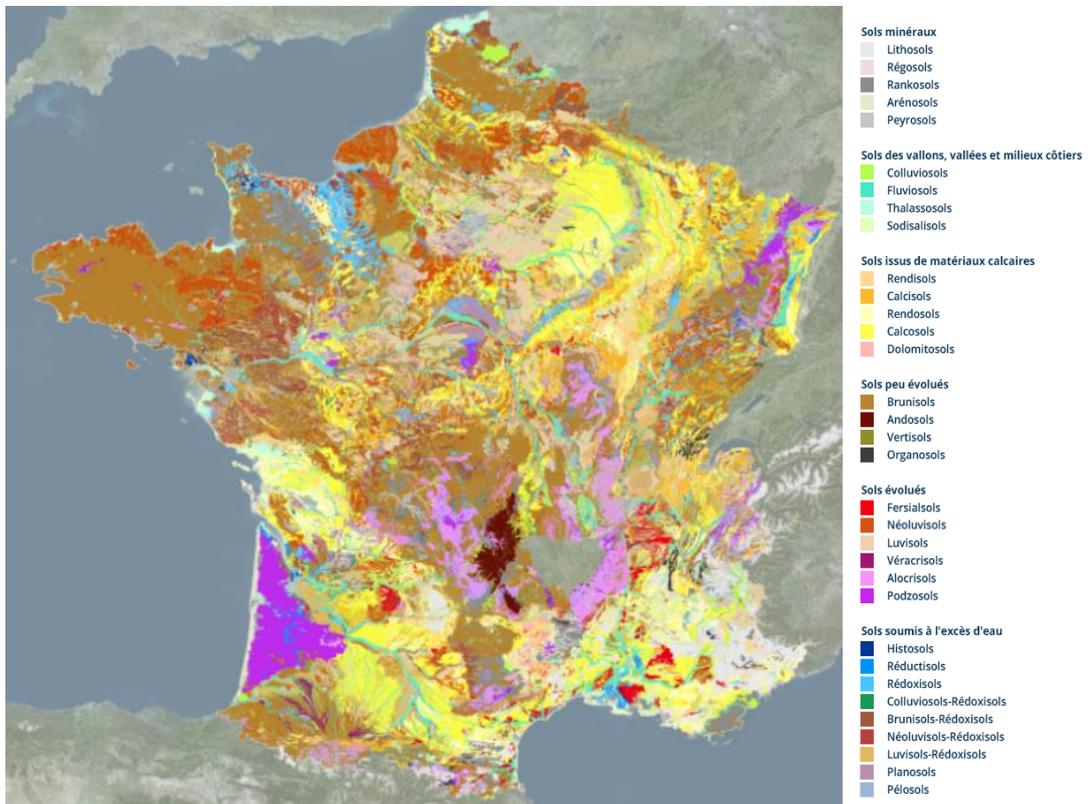


Figure 5 : Carte des sols en France (Géoportail, 2024)

2. Particularités des sols urbains

Les sols urbains, généralement qualifiés « d'anthropisés », sont des milieux complexes et diversifiés, fortement influencés par les activités humaines (Bullok et Gregory, 1991 ; Damas et Coulon, 2016). Ces sols se distinguent par une grande diversité, liée à l'historique de leurs usages et aux nombreuses pressions qu'ils subissent, telles que l'imperméabilisation, l'accumulation de polluants, et les modifications mécaniques et chimiques résultant des constructions et autres activités humaines. La formation et l'évolution des sols sont des processus dynamiques déterminés par des facteurs physiques, chimiques, biologiques et humains (Guilland et al., 2018). En milieu urbain, les sols sont façonnés principalement par l'urbanisation, ce qui les différencie fondamentalement des sols dits « naturels » que l'on trouve en milieu rural ou forestier.

Les sols urbains peuvent être classés selon différents référentiels pédologiques. Par exemple, dans le cadre de la World Reference Base for Soil Resources (WRB), ils sont souvent classés comme technosols (Lehman, 2006 ; Rossiter, 2007). Cette catégorie regroupe des sols contenant un grand nombre d'artefacts anthropiques (matériaux fabriqués par l'homme), des scellements imperméables d'origine humaine, et des matériaux rocheux techniques comme les pavés. En revanche, le référentiel pédologique français propose une classification plus détaillée, distinguant cinq types d'anthroposols (Baize et Girard, 2008) : les anthroposols transformés, artificiels, reconstitués, construits et archéologiques (Figure 6). Ces classifications montrent la complexité et la diversité des sols urbains, qui résultent de l'interaction de multiples facteurs et interventions humaines.

- Les anthroposols transformés résultent de modifications volontaires et anciennes, souvent pour améliorer la fertilité des sols et assurer une meilleure production alimentaire, comme les rizières et les zones maraîchères.
- Les anthroposols archéologiques ont subi des modifications anthropiques anciennes, avec la présence de plus de 20 % de débris issus d'activités humaines.
- Les anthroposols reconstitués sont créés à partir de matériaux pédologiques transportés ou remaniés pour y installer une végétation pérenne ou non.
- Les anthroposols construits sont le résultat d'une action volontaire de construction d'un « sol » en utilisant des matériaux technologiques, souvent considérés comme des déchets, pour l'installation d'une végétation.
- Enfin, les anthroposols artificiels résultent entièrement d'apports par l'Homme de matériaux d'origine non pédologique, tels que des déblais de carrières et des gravats, à partir desquels se développent les sols.

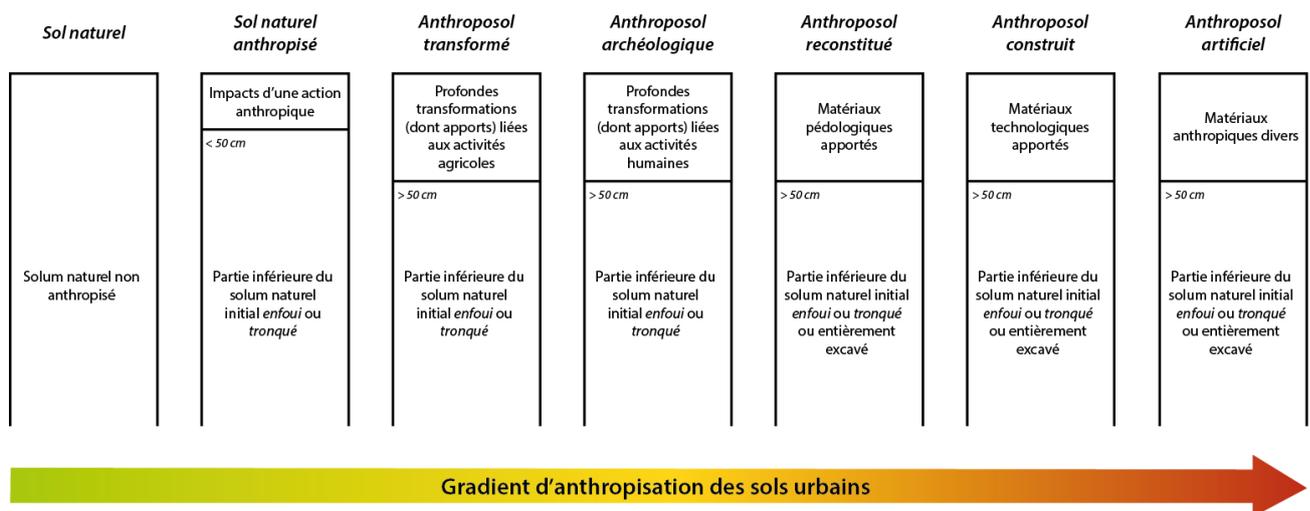


Figure 6 : Anthropisation des sols (Lapeyre, 2024 adapté de Baize et Girard, 2008)

Les sols urbains se caractérisent par des propriétés physiques, chimiques et biologiques fortement influencées par les activités humaines. Ils présentent souvent des déficits en éléments nutritifs majeurs comme l'azote, le phosphore et le potassium (Schwartz et al., 2015), sont compactés et anoxiques, et sont donc peu propices à la croissance des végétaux (Guilland et al., 2018). Pour pallier cette faible valeur agronomique, des apports de terre végétale sont souvent nécessaires lorsque l'on souhaite implanter des végétaux. Cette terre végétale est fréquemment importée d'espaces ruraux, illustrant le lien étroit entre les milieux urbains et ruraux. Ces anthroposols reconstitués soutiennent ainsi les "espaces verts" et "infrastructures vertes" dans les paysages urbains.

La diversité des usages des sols urbains crée une grande hétérogénéité spatiale, à la fois horizontale et verticale de leurs propriétés physiques, chimiques et biologiques (Béchet et al., 2009). Les sols urbains peuvent être divisés en plusieurs types d'occupations végétalisées, chacun ayant ses propres caractéristiques et exigences de gestion. Parmi eux, on trouve les surfaces enherbées, les arbres urbains, les friches, les terrains de sport, les jardins urbains et les toitures végétalisées. Cette classification a été proposée par l'Association des Ingénieurs des Villes de France (l'AIVF) en 1995 ou encore par l'écologue urbain Clergeau en 2007 :

- Les surfaces enherbées, par exemple, correspondent à une végétation herbacée sur un sol perméable, souvent entretenue intensivement ou extensivement selon leur usage. Elles peuvent inclure des pelouses classiques, présentes dans les parcs situés en centre-ville, ou des couverts fleuris, en plein essor en milieu urbain, qui s'inscrivent dans une démarche de gestion extensive.
- Les arbres en ville, qu'ils soient d'alignement ou formant des forêts urbaines, apportent divers bénéfices écologiques, sociaux et esthétiques, tels que le confort thermique, la dépollution, et l'augmentation de la biodiversité (FAO, 2016). Ils symbolisent également la diversité des enjeux sur la nature en ville, des aspects patrimoniaux aux fonctions écologiques et sociales.

- Les friches urbaines, bien que vacantes et souvent ignorées, peuvent évoluer naturellement et devenir des réservoirs de biodiversité importants (Small et al., 2002 ; Gardiner et al., 2013). Ces surfaces vacantes, développées sur des substrats souvent hétérogènes et de qualité variable (Morel et al., 2015), peuvent être colonisées spontanément par des espèces végétales sauvages, offrant un refuge à la faune et contribuant à la résilience urbaine.
- Les terrains de sport nécessitent des sols filtrants pour un drainage efficace, permettant une utilisation indépendante des intempéries. Ces surfaces se développent en même temps que la ville pour répondre aux besoins des citoyens en termes de pratiques d'activités sportives en plein air (Girard et al., 2005).
- Les jardins urbains, souvent localisés dans des environnements fortement modifiés, sont très fertiles mais peuvent être contaminés par des métaux lourds en raison des activités passées (Schwartz, 2013). Ils sont à l'interface d'usages agricoles, périurbains et urbains, et sont considérés soit comme des sols agricoles gérés intensivement, soit comme des sols urbains à vocation de production végétale, qu'elle soit ornementale ou alimentaire (Béchet et al., 2009).
- Les toitures végétalisées, de plus en plus courantes depuis le début des années 2000, augmentent la longévité des bâtiments et atténuent le ruissellement. Ces toitures, historiquement mises en place pour améliorer la durabilité des structures, jouent désormais un rôle important dans la gestion des eaux pluviales et contribuent à la biodiversité urbaine.

En somme, les sols urbains sont des milieux extrêmement diversifiés et hétérogènes, dont les propriétés et la gestion sont étroitement liées aux activités humaines et aux usages multiples qui se superposent dans le temps et l'espace. Cette diversité et complexité des sols urbains nécessitent une compréhension approfondie et une gestion adaptée pour répondre aux défis écologiques, économiques et sociaux des villes modernes.

3. Des fonctions aux services écosystémiques

3.1. Fonctions du sol

Les fonctions du sol, également connues sous le nom de fonctions écologiques, désignent les phénomènes intrinsèques aux écosystèmes qui résultent de la combinaison de l'état des écosystèmes, des structures et des processus écologiques. Ces fonctions se manifestent indépendamment de la présence humaine et sont essentielles au maintien de la santé des écosystèmes [11]. On peut distinguer trois grandes catégories de fonctions : les fonctions hydrogéomorphologiques, les fonctions biogéochimiques et les fonctions biologiques (Baptist et al., 2018).



Les fonctions hydrogéomorphologiques jouent un rôle crucial dans le cycle de l'eau. Le sol agit comme une éponge, absorbant et stockant l'eau de pluie, ce qui aide à réduire le ruissellement et à prévenir les aléas liés aux épisodes pluvieux (inondations, coulées de boue...). De plus, l'eau qui s'infiltre dans le sol contribue à la

recharge des nappes phréatiques, une source essentielle d'eau douce pour les écosystèmes et les usages humains. La stabilisation des sols est également une fonction hydrogéomorphologique importante, car elle prévient l'érosion grâce à la végétation et aux racines des plantes qui fixent le sol en place.



Les fonctions biogéochimiques impliquent le recyclage et la transformation des éléments chimiques dans le sol. Les organismes du sol décomposent la matière organique morte, libérant des nutriments essentiels à la croissance des plantes. En outre, les sols peuvent filtrer et décomposer les substances toxiques, contribuant ainsi à la purification de l'eau et de l'air. La séquestration du carbone est une autre fonction biogéochimique clé, car les sols stockent du carbone sous forme de matière organique, aidant à réguler le climat en réduisant la concentration de CO₂ dans l'atmosphère.



Les fonctions biologiques concernent les organismes vivants dans le sol et leur rôle dans les écosystèmes. Le sol fournit un habitat pour une vaste diversité d'organismes, allant des microbes aux grands invertébrés comme les vers de terre. Ces sols servent également de corridors permettant la dispersion et le mouvement des organismes, ce qui est crucial pour la biodiversité. La diversité des organismes vivants dans le sol joue un rôle central, avec une grande variété d'espèces de bactéries, champignons, protozoaires, nématodes et autres, chacun contribuant à différents aspects du fonctionnement du sol.

3.2. Services écosystémiques rendus par les sols urbains

Les services écosystémiques sont les bénéfices que les humains tirent des écosystèmes, et ils sont directement liés aux fonctions du sol, mais évalués en termes de leur utilité pour l'humanité (Costanza et al., 1997). Ces services peuvent être classés en quatre grandes catégories : les services de support, d'approvisionnement, de régulation et culturels et sociaux (MEA, 2005).

- Les services de support incluent le support pour la végétation, où le sol fournit les nutriments et l'ancrage nécessaire pour la croissance des plantes. De plus, le sol sert de base pour les infrastructures humaines, jouant un rôle essentiel dans le support de construction.
- Les services d'approvisionnement, quant à eux, englobent la production alimentaire, essentielle pour l'agriculture, fournissant la base pour la culture des plantes et l'élevage des animaux. Le sol est également crucial pour la fourniture de fibres, comme celles utilisées dans les textiles, telles que le coton et le lin.
- Les services de régulation incluent la régulation du climat, où la séquestration du carbone par les sols joue un rôle dans la réduction des gaz à effet de serre. La qualité de l'eau est également régulée par les sols, qui filtrent l'eau de pluie et contribuent à sa purification. La régulation de l'érosion est une autre fonction clé des sols, car en stabilisant les sols, ils réduisent l'érosion et la perte de terres fertiles.

- Enfin, les services culturels et sociaux comprennent les valeurs éducatives et récréatives offertes par les sols et les écosystèmes associés. Ces services fournissent des opportunités pour l'éducation environnementale et les activités de loisirs, et jouent un rôle dans l'identité culturelle et le patrimoine des communautés humaines.

3.3. Quels enjeux à la préservation des fonctions du sol ?

Les fonctions du sol constituent la base des services écosystémiques. Par exemple, la fonction de recyclage de la matière organique et des nutriments soutient directement le service de production alimentaire. De même, la séquestration du carbone par les sols contribue au service de régulation du climat. Les services écosystémiques sont donc une interprétation anthropocentrée des fonctions écologiques du sol, représentant les bénéfices que les sociétés humaines retirent de ces fonctions naturelles.

Il est crucial de comprendre que les fonctions du sol, indépendantes de tout intérêt humain, fournissent les processus essentiels sur lesquels reposent les services écosystémiques. Ainsi, la gestion durable des sols, intégrant une compréhension approfondie de leurs fonctions et des services qu'ils rendent, est essentielle pour maintenir et améliorer les services écosystémiques, assurant ainsi la viabilité des écosystèmes et le bien-être humain.

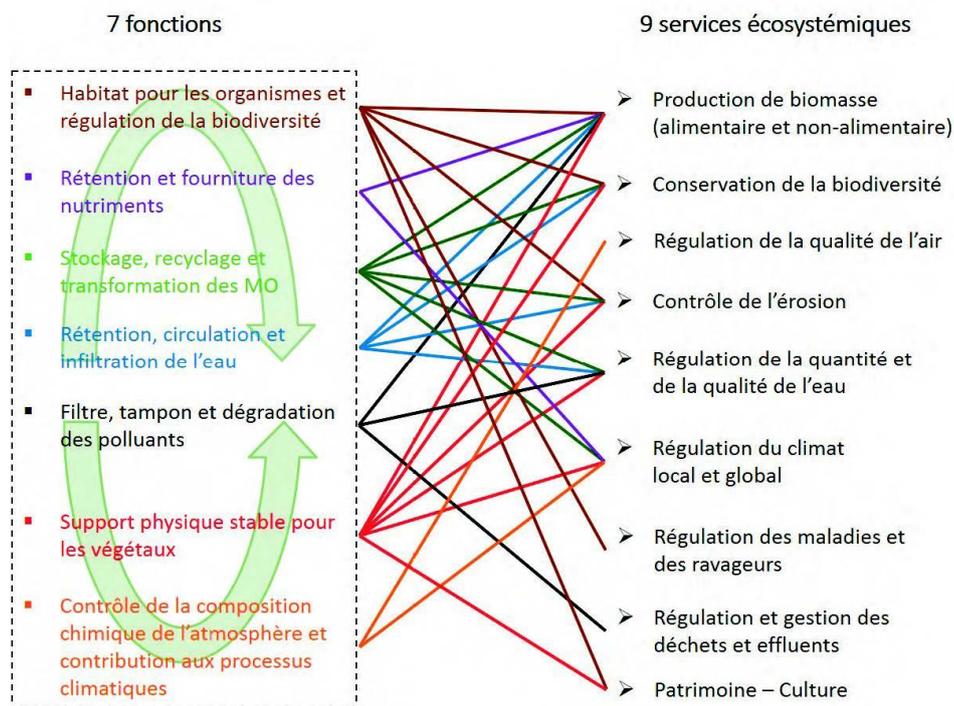


Figure 7 : Identification des fonctions du sol et leur rôle dans les services rendus par les écosystèmes (Calvaruso et al., 2019)

En conclusion, les sols et la diversité d'organismes vivants qu'ils abritent jouent un rôle central dans le fonctionnement des écosystèmes terrestres grâce à leurs multiples fonctions écologiques (Berthelin et al., 2018 ; Crowther et al., 2019). Ces fonctions sont à l'origine des nombreux services écosystémiques qui soutiennent les sociétés humaines. La

gestion durable des sols, qui comprend la préservation de leurs fonctions et l'optimisation des services qu'ils fournissent, est indispensable pour répondre aux défis environnementaux et sociaux contemporains et ce d'autant plus dans les milieux fortement anthropisés (Damas et Coulon, 2016).

4. Perception du sol

Malgré ces nombreux bénéfices apportés par les sols, une vision commune persiste et les réduit le plus souvent à une simple surface. Cette perception surfacique se retrouve dans les traductions réglementaires actuelles qui ne prennent pas en compte le sol comme un volume. Cette perception est très certainement confortée par la notion de propriété ainsi que par le fait que nombre des services rendus par le sol sont « invisibles ».

Le sol, contrairement à l'eau, l'air ou encore la biodiversité, est objet de propriété. Dans le Code civil, il n'y a pas d'injonctions spécifiques sur la qualité du sol puisqu'elle est implicitement considérée comme une conséquence ou un fruit de celui-ci. Ainsi, le sol n'y est considéré que comme le support du travail dans une société agraire ou comme le support de constructions (Bosc, 2017). Le sol n'est donc que le moyen d'être propriétaire, autrement dit c'est une appropriation de la surface. Par ce fait, sa protection ne concerne que son propriétaire à l'inverse de l'air, l'eau ou la biodiversité qui sont aujourd'hui mieux protégés car juridiquement à l'usage de tous.

Un deuxième élément qui influe sur la façon dont le sol est perçu est le fait que de nombreux services essentiels prodigués par celui-ci ne sont pas visibles (stockage du carbone, cycles des nutriments...). Ainsi il est plus difficile pour la population de se représenter le rôle vital que joue le sol dans nos vies. Par exemple, en milieu urbain, la majeure partie des services écosystémiques est assurée par les infrastructures vertes. Par conséquent, le sol est considéré comme un compartiment secondaire par rapport à la végétation, bien qu'il soit essentiel au développement de cette dernière. Il représente une surface (vision en deux dimensions) pouvant accueillir les activités humaines, et surtout une ressource qui peut être modifiée pour répondre aux besoins des citoyens (Morel et al., 2015).

Conclusion

Au regard des éléments présentés dans cette section, il semble crucial, dans le contexte du changement climatique, de préserver les sols actuellement capables de remplir de nombreuses fonctions : production de biomasse (agriculture, foresterie), stockage, filtration et infiltration de l'eau, transformation des nutriments et des substances polluantes, réservoir de biodiversité, stockage du carbone... Toutefois, la préservation des sols moins fonctionnels n'est pas à négliger. Ceux-ci peuvent avoir une valeur paysagère, patrimoniale ou répondre à des enjeux spécifiques du territoire. Une meilleure prise en compte de ces sols pourrait d'ailleurs permettre qu'ils retrouvent une plus grande multifonctionnalité.

En milieu urbain, les sols peuvent offrir plusieurs services, dont certains d'entre eux pouvant réduire les effets du changement climatique : régulation de l'eau pour prévenir le ruissellement et les inondations, apport de fraîcheur grâce à la végétation et aux sols désimperméabilisés pour combattre les îlots de chaleur, ainsi que la filtration et/ou la dégradation de certains polluants par les sols via l'action des micro-organismes. De plus, les sols agissent comme des puits de carbone et contribuent à l'amélioration de la qualité de l'air et du bien-être grâce aux espaces verts et à la végétation qu'ils supportent, sous réserve d'une gestion adaptée de ces espaces.

En France, le sol est intégré de différentes manières dans les politiques publiques, et ce en fonction de thématiques distinctes : agriculture, urbanisme, environnement... Cela conduit alors à une prise en compte des sols non harmonisée et souvent sectorisée. Les documents de planification tels que les Plan Locaux d'Urbanisme (intercommunaux) (PLU(i)), les Schémas de Cohérence Territoriale (SCoT) ou encore les Schéma Régionaux d'Aménagement, de Développement Durable et d'Égalité des Territoires (SRADDET) pourraient être des outils intéressants pour une prise en compte transversale des sols, étant donné leurs larges champs d'application. Nous allons donc voir comment les sols sont aujourd'hui intégrés dans ces documents ainsi que les travaux et réflexions en cours en vue d'améliorer cette intégration.

PARTIE 2 – PRISE EN COMPTE DES SOLS DANS LES DOCUMENTS DE PLANIFICATION : ETAT DES LIEUX ET TRAVAUX RECENTS

En 1997, l'aménagement du territoire était défini comme une « *politique gouvernementale tendant à mettre en place les instruments d'un développement économique et social équilibré de l'ensemble du territoire national et à assurer son intégration dans l'espace européen* » [12]. Plus précisément, la planification territoriale est aujourd'hui un processus de gestion et d'organisation de l'espace géographique, visant à harmoniser les différentes activités humaines avec les ressources disponibles, les besoins des populations et les politiques publiques. Elle a pour but de structurer et d'orienter le développement des territoires en tenant compte des spécificités locales, régionales et nationales, tout en respectant des objectifs de durabilité, de cohésion sociale et d'efficacité économique.

Ainsi, elle intègre des enjeux tels que les transports, l'habitat, l'environnement, l'énergie, la gestion des ressources, l'emploi, l'offre de services, la mixité sociale...

1. Qu'est-ce qu'un document de planification ?

La planification s'appuie sur un cadre réglementaire précis (lois SRU, ALUR, ELAN, Littoral, Montagne, Climat & Résilience) et les stratégies développées sont traduites spatialement dans des documents de planification tels que le SRADDET à l'échelle régionale, le SCoT à l'échelle territoriale intermédiaire (bassin de vie et d'emploi) ou encore le PLU/PLUi à l'échelle communale ou intercommunale [13]. En dehors de ces documents de planification « classiques » qui ont pour principale vocation de contrôler l'affectation et l'utilisation des sols, d'autres documents ont émergé depuis le milieu des années 2010 afin de renforcer la prise en compte des enjeux du développement durable (PCAET, PAT...).

Il existe également des « documents cadres » comme les SDAGE (Schémas Directeurs d'Aménagement et de Gestion des Eaux) et les SAGE (Schémas d'Aménagement et de Gestion des Eaux) qui sont des outils de planification et de gestion de l'eau en France, créés dans le cadre de la directive-cadre sur l'eau (DCE). Leur objectif principal est de gérer les ressources en eau de manière durable, tout en prenant en compte les besoins écologiques, économiques et sociaux. D'autres documents avec le même type de portée réglementaire permettent une intégration dans la planification territoriale de nombreux enjeux de gestion des ressources et des risques.

Comme dit précédemment, les principaux documents traitant de l'utilisation des sols à différentes échelles sont le SRADDET, le SCoT et le PLU(i) (Tableau 2). Ils semblent donc être les plus pertinents pour traiter de cette question. De plus, ce sont les documents sur lesquels les territoires s'appuient en priorité (notamment les PLU/PLUi), ce qui pourrait faciliter la mise en œuvre concrète des éventuels changements apportés quant à la prise en compte qualitative des sols.

Tableau 2 : Caractéristiques générales des trois principaux documents de planification

Caractéristiques	SRADDET	SCoT	PLU/PLUi
Echelle	Régionale	Généralement intercommunale, à l'échelle d'un bassin de vie et d'emploi	Communale (dans le cas d'un PLU) ou intercommunale (PLUi)
Fonctions	Inclut les orientations stratégiques en matière de développement durable, de gestion des ressources, de mobilité, de climat, de biodiversité, d'habitat...	Définit les grands axes d'aménagement d'un territoire, coordonne les PLU et autres documents locaux, assure la cohérence des politiques publiques.	Organise l'affectation et l'utilisation des sols : définit les règles d'urbanisme, détermine les zones constructibles, préserve les espaces naturels...
Contenu	<ul style="list-style-type: none"> - Rapport (état des lieux, enjeux, objectifs stratégiques) - Fascicule (règles générales) - Annexes (rapport environnemental ; prévention et gestion des déchets ; présentation de la TVB et de la stratégie liée ; tout autre document utilisé pour l'élaboration du schéma ou qui portent sur sa mise en œuvre) 	<ul style="list-style-type: none"> - Projet d'Aménagement Stratégique (PAS) - Document d'orientations et d'objectifs (DOO) - Annexes dont documents obligatoires : diagnostic, justification des choix et évaluation environnementale 	<ul style="list-style-type: none"> - Rapport de présentation (diagnostic, état initial de l'environnement, justification des choix et évaluation environnementale) - Projet d'Aménagement et de Développement Durables (PADD) - Règlement écrit et graphique (zonage) - Orientation d'Aménagement et de Programmation (OAP) sectorielles et thématiques
Durée de validité	Indéterminée, avec révision possible tous les 10 ans.	Indéterminée, avec révision possible tous les 10 à 15 ans.	Environ 10 ans, avec révision ou modification possible en fonction des besoins locaux.
Anciens documents remplacés	<ul style="list-style-type: none"> - Schéma Régional d'Aménagement et de Développement du Territoire (SRADT) <p>Intégration par le SRADDET (donc disparition) : SRCE, SRCAE, PRPGD, SRI, SRIT, tout autre document relevant de la compétence régionale</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Schéma Directeur d'Aménagement et d'Urbanisme (SDAU) - Directives Territoriales d'Aménagement (DTA) 	<ul style="list-style-type: none"> - Plan d'Occupation des Sols (POS) - Carte Communale

Les différents documents de planification entretiennent des relations de prise en compte, de compatibilité et de conformité. Cette hiérarchie permet une application descendante des objectifs nationaux pour qu'à l'échelle du projet un maximum d'enjeux soient pris en compte. De manière simplifiée, les principaux documents de planification suivent ce schéma d'articulation :

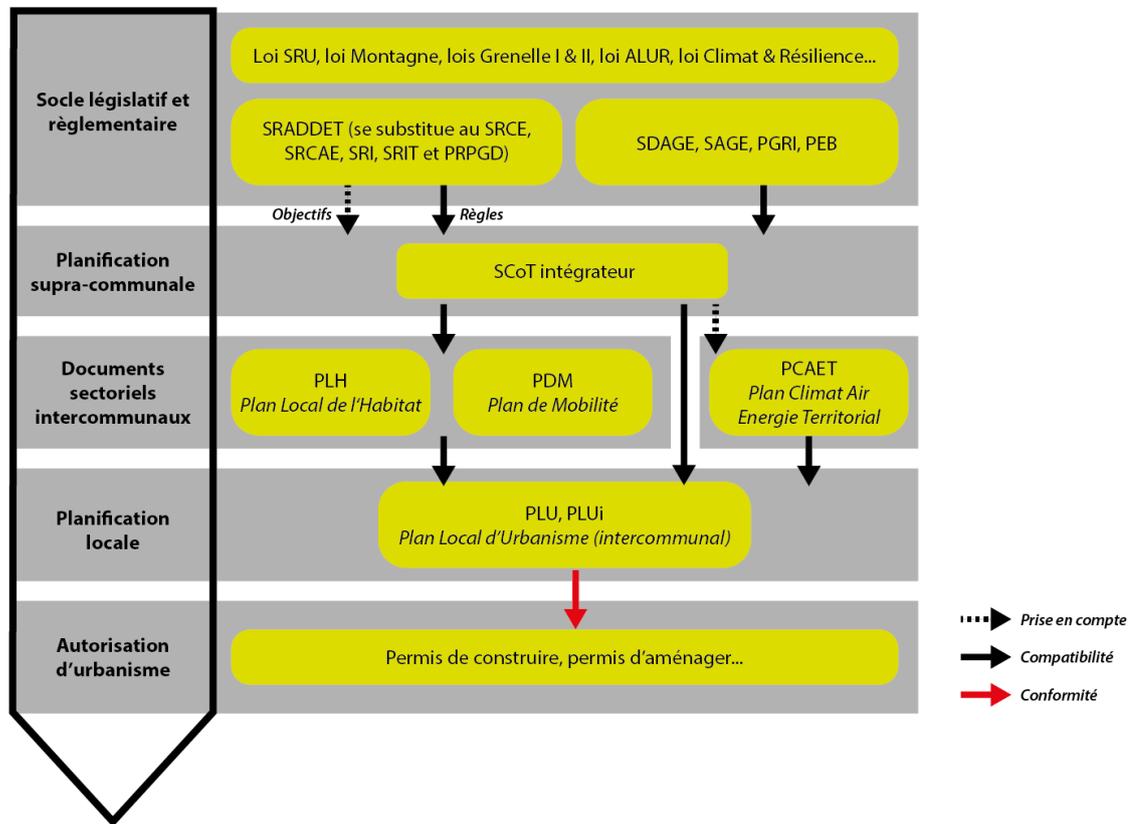


Figure 8 : Articulation des principaux documents de planification (Lapeyre, 2024)

L'ensemble de ces documents traduit une vision politique à des échelles différentes. On pourrait alors se dire qu'agir à la base, autrement dit au niveau des lois et du socle législatif de manière plus large, serait la manière la plus efficace d'imposer des changements vis-à-vis de la protection des sols. En revanche, cela semble également être l'échelle à laquelle il est le plus difficile d'intervenir car il faudrait presque un nouveau paradigme national à ce sujet. Aussi, plus on est à une large échelle, plus on s'éloigne des actions concrètes et adaptées aux enjeux de chaque territoire. Ainsi, l'action à des échelles inférieures paraît plus accessible et territorialisée.

Pour cela, le levier essentiel porte sur les élus qui soutiennent les visions politiques territoriales et construisent ces documents. Certains sont déjà acculturés au sujet du sol de par leur domaine d'activité ou tout simplement par sensibilité personnelle mais la majorité manque de connaissances sur les sols et ne porte donc pas beaucoup d'ambitions à ce sujet. Ainsi, des outils ont été créés à la fois pour sensibiliser mais aussi pour mieux identifier et prendre en compte les espaces naturels de manière globale : ce sont les différentes trames (verte, bleue, noire...). A titre d'exemple, la TVB, intégrée dans les SRCE (aujourd'hui dans les SRADDET), a prouvé sa pertinence aux différentes échelles et est maintenant bien déployée en France, c'est pourquoi on peut imaginer un tel outil pour le sol.

2. Prise en compte actuelle des sols dans les documents de planification

De manière générale, de nombreuses connaissances restent à acquérir sur les sols. Ce manque de données sur leur fonctionnement limite ainsi la sensibilisation du grand public. Les notions de qualité des sols et de services rendus sont alors mal comprises par les acteurs des territoires. *In fine*, leur multifonctionnalité est rarement abordée directement dans les documents d'urbanisme, se manifestant plutôt de façon indirecte à travers l'usage des espaces forestiers ou agricoles. La structure thématique des documents de planification explique en partie cette absence de prise en compte globale.

L'état initial de l'environnement et le diagnostic territorial sont les principaux documents intégrant des informations sur les sols. Les thématiques explicitement traitées concernent la définition des unités pédo-paysagères, la valeur agronomique des sols agricoles, les risques de retrait-gonflement des argiles, et l'identification des zones humides. Dans les évaluations environnementales, les sols sont abordés de manière spécifique en lien avec différentes thématiques telles que la consommation foncière, la gestion des espaces agricoles, la préservation des zones humides, la prise en compte des risques naturels et sanitaires, ou encore la protection des paysages (Cerema, 2019).

Ainsi, il y a peu d'éléments formels dans les documents d'urbanisme, sauf en ce qui concerne la réglementation sur les risques naturels et les zones humides dans le cadre du projet d'aménagement et de développement durables (PADD), des orientations d'aménagement et de programmation, et du règlement. De plus, l'absence d'indicateurs qualitatifs dans les évaluations environnementales empêche de mesurer précisément les incidences (positives ou négatives) des projets sur les sols.

3. La trame : le bon outil pour la prise en compte des sols ?

Comme dit plus haut, le droit français ne définit pas clairement les sols et ne les protège pas non plus de manière harmonisée. Il protège les terres et certains usages et parfois des éléments se trouvant dans le sol ou le traversant comme l'eau ou la biodiversité.

On retrouve tout de même quelques dispositions aux champs d'application très ponctuels, pour ne pas dire isolés comme ici dans l'article L.411-27 du Code rural et de la pêche maritime [14] :

*« Des clauses visant au respect par le preneur de pratiques ayant pour objet la préservation de la ressource en eau, de la biodiversité, des paysages, de **la qualité des produits, des sols** et de l'air, la prévention des risques naturels et la lutte contre l'érosion, y compris des obligations de maintien d'un taux minimal d'infrastructures écologiques, peuvent être incluses dans les baux [...] »*

Aussi, un outil s'assimilant à une trame pourrait permettre une meilleure prise en compte du sol comme habitat et non plus comme une surface ou un élément distinct de tout le reste. Il est nécessaire d'avoir une vision interconnectée des sols et des habitats en général afin de mieux les protéger et surtout de conserver leur fonctionnalité.

3.1. Concept de trames

En France, la notion de trame est initiée lors du Grenelle de l'environnement en 2007 et entre dans le Code de l'environnement en 2009. Les trames constituent sur le plan de l'aménagement du territoire un ensemble de mesures à prendre en compte pour la préservation des espèces animales, végétales et de leurs habitats. Elles deviennent alors des éléments de réglementation obligatoires pour chaque territoire.

A. Définition de la Trame Verte et Bleue

Depuis de nombreuses années maintenant, le constat qui a été dressé laisse transparaître une accélération de la disparition des espèces et milieux naturels, faisant redouter une crise sans précédent de la biodiversité (Ceballos et al., 2017).

En dehors de la destruction même des milieux naturels, l'un des facteurs majeurs à l'origine de ce phénomène repose sur la fragmentation des habitats (Chase et al., 2020). En effet, le territoire est morcelé par des infrastructures linéaires de transport (voies ferrées, routes, canaux), des zones urbaines, des barrages et écluses... Bien qu'utiles à l'homme, la prolifération de ces aménagements induit un processus de fragmentation qui va transformer le vaste habitat d'une espèce en une multitude d'îlots ou taches de plus en plus petites et isolées les unes des autres.

Or, de nombreux travaux ont montré que le maintien de la biodiversité dépend non seulement de la préservation des habitats mais aussi des espaces interstitiels qui permettent les échanges biologiques entre ces derniers (maintien du flux d'individus, brassage génétique). Dans un contexte de changement climatique, où les évolutions du climat pourraient imposer aux espèces naturelles une modification de leurs aires de répartition et donc une nécessité de déplacement, ce processus de fragmentation apparaît d'autant plus inquiétant.

Afin d'enrayer ce phénomène, la France a opté pour la mise en place d'un réseau écologique sur l'ensemble du territoire français : la Trame Verte et Bleue. Selon France Nature Environnement, le terme de trame émerge dans les années 2000 lors de la mise en place du Grenelle de l'environnement en 2007 et entre dans le Code de l'environnement en 2009. Les trames constituent sur le plan de l'aménagement du territoire un ensemble de mesures à prendre en compte pour la préservation des espèces animales, végétales et de leurs habitats. Elles deviennent alors des éléments de réglementation obligatoires pour chaque territoire.

La notion de TVB est précisée dans le décret n°2019-1400 du 17 décembre 2019 [15] relatif aux orientations nationales pour la préservation et la remise en bon état des continuités écologiques :

« La Trame verte et bleue, réseau écologique formé de continuités écologiques terrestres et aquatiques, [...] est un outil d'aménagement durable du territoire qui contribue à enrayer la perte de biodiversité, à maintenir et à restaurer ses capacités d'évolution et à préserver les services rendus, en prenant en compte les activités humaines.

La Trame verte et bleue contribue à l'état de conservation favorable des habitats naturels et des espèces et au bon état écologique des masses d'eau. Elle doit permettre d'assurer la fonctionnalité des habitats ainsi que le cycle de vie, les déplacements et la capacité d'adaptation des espèces animales et végétales. »

Les continuités écologiques constitutives de la TVB comprennent deux types d'éléments : les réservoirs de biodiversité et les corridors écologiques.

- Les réservoirs sont des territoires dotés d'une biodiversité particulièrement riche, dans lesquels les espèces trouvent des conditions favorables pour se développer, se disperser et coloniser d'autres territoires [16].
- Les corridors écologiques assurent des connexions entre des réservoirs de biodiversité, offrant aux espèces des conditions favorables à leur déplacement et à l'accomplissement de leur cycle de vie [17]. On distingue trois types de corridors écologiques : linéaires (haies, bords de chemins, ripisylves...), discontinus (mares permanentes ou temporaires, bosquets...) et paysagers (mosaïque de structures paysagères variées).

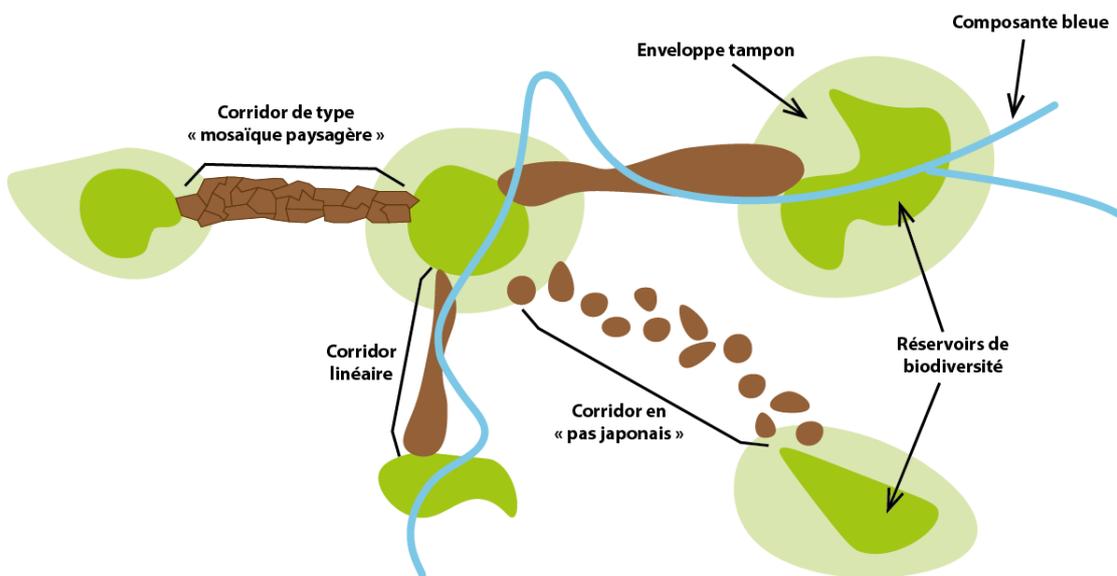


Figure 9 : Structure de la Trame verte et bleue (Lapeyre, 2024 d'après Allag-Dhuisme et al., 2010)

Plus précisément, la trame verte vise à préserver, restaurer et créer des corridors écologiques terrestres pour favoriser la circulation des espèces animales et végétales. La trame bleue qui concerne les milieux aquatiques (rivières, cours d'eau, plans d'eau), vise à restaurer leur continuité écologique, notamment pour les poissons migrateurs et autres espèces aquatiques.

B. Rôle de la TVB dans l'aménagement du territoire et la planification urbaine

La TVB est désormais un dispositif central de la planification écologique en France. Son intégration dans les documents de planification est encadrée par la loi et se décline aux différentes échelles territoriales.

- Au niveau régional, le SRADDET est le document principal qui reprend les éléments de la TVB définis par les anciens Schémas Régionaux de Cohérence Ecologique (SRCE) qu'il intègre depuis 2016. Cela rend obligatoire la prise en compte de la TVB dans la planification régionale. Les SRCE identifient les continuités écologiques, les zones de réservoirs de biodiversité et proposent des orientations pour la préservation et la restauration de ces continuités. Ces objectifs doivent être pris en compte dans les documents de planification infra-régionaux.
- L'échelle intercommunale est marquée par les SCoT qui doivent impérativement intégrer la TVB conformément aux prescriptions du Code de l'urbanisme. Le SCoT traduit les orientations du SRADDET en les adaptant au territoire concerné et identifie les corridors écologiques à préserver ou à restaurer. Il formule également des recommandations qui guideront l'élaboration des documents d'urbanisme locaux.
- Enfin, les PLU et PLUi jouent un rôle crucial dans la mise en œuvre de la TVB. Ces documents de planification doivent intégrer les continuités écologiques en cohérence avec les SCoT et les SRADDET. Dans un PLU(i), la TVB apparaît à plusieurs endroits. Tout d'abord, dans l'Etat Initial de l'Environnement qui est un document dressant l'état des lieux sur un territoire en matière de paysage, milieux naturels, risques ou encore ressources, une TVB territoriale est établie. Elle doit être compatible avec celle qui est établie dans le SCoT et a pour but ici d'être affinée et donc mieux adaptée au territoire. Selon la méthodologie adoptée, elle peut se baser sur les habitats (sous-trames) ou sur des espèces représentatives. On peut également retrouver la TVB au travers du zonage (règlement graphique) qui peut venir conforter ou créer des continuités écologiques sur la base de ce qui a été établi dans l'EIE. Enfin, une OAP thématique – désormais obligatoire – traite de la TVB en formulant des orientations et/ou des recommandations afin d'approfondir le sujet et de permettre une meilleure prise en compte de cet enjeu sur le territoire.

La TVB est ainsi intégrée de manière systématique dans les différents niveaux de documents de planification en France. De l'échelle nationale à l'échelle communale, chaque niveau de planification est doté d'obligations spécifiques pour garantir la préservation et la restauration des continuités écologiques, assurant ainsi une mise en œuvre cohérente et efficace sur l'ensemble du territoire.

Cette prise en compte qui semble en apparence plutôt efficace comporte tout de même des limites. Celles-ci pourraient provenir de la définition même de la TVB. En effet, les espaces propices au développement des espèces sont pris en compte dès lors qu'ils sont « visibles » (haies pour la nidification, cours d'eau pour les espèces aquatiques...) et adaptés aux déplacements des vertébrés et des invertébrés volants et/ou marcheurs. Mais parmi ces espaces, un manque à l'appel : le sol, support de tous ces autres éléments. Indirectement, on pourrait penser que celui-ci est intégré lorsqu'un habitat rentre dans les critères de la TVB – ce qui n'est pas totalement faux – mais en réalité, jamais aucune mesure explicite de protection du sol en tant qu'habitat n'est retrouvée.

C'est certainement à partir de ce constat qu'est venue l'idée d'une trame dédiée au sol qui n'était pas suffisamment pris en compte au travers de la TVB : la trame brune (TBr). De plus, l'habitat sol ne se limitant pas aux seuls espaces de TVB et celle-ci étant difficile à mettre en œuvre en milieu urbain, cette nouvelle trame pourrait être un outil complémentaire intéressant pour une meilleure considération du sol.

C. Emergence d'une trame brune

Le sol est le plus important réservoir de biodiversité à l'échelle planétaire (env. 25/30 % de la biodiversité totale). Ainsi, 0.25% de la masse des sols correspond à la composante biologique dont 2/3 de microorganismes et 1/3 de faune du sol. Cette dernière se compose d'espèces de taille variable et ayant des capacités de déplacement différentes (Figure 10).

Habitat	Agrégat (μm - mm)	Motte (cm - dm)	Profil (m - dam)
Taille des individus	Microorganismes et micro-faune	Méso-faune	Macro-faune
Mode de déplacement	Déplacements passifs avec les variations de niveau de l'eau capillaire dans les sols	Soies ou petites pattes	Soies ou grandes pattes + ailes possibles

Figure 10 : Une biodiversité du sol multi-échelle (Lapeyre, 2024 d'après Cluzeau, 2024)

Parmi ces taxons, certains passent une partie de leur vie dans le sol (géophiles actifs) alors que d'autres y passent l'entièreté de leur existence (géobiontes) et sont donc des utilisateurs contraints de la trame brune. Ainsi, sur le même modèle que la TVB, la trame brune a été conçue et se composerait de réservoirs et de corridors pédologiques assurant la continuité écologique dans les sols au service d'espèces vivant continuellement dans ceux-ci avec de très faibles moyens propres de déplacement [3].

La reprise de ce concept de trame pour le sol a plusieurs avantages. Premièrement, l'outil est déjà utilisé dans la planification territoriale et les élus déjà majoritairement sensibilisés à celui-ci, ce qui devrait permettre une prise en main plus aisée de la trame brune. De plus, le principe des corridors et de réservoirs semble, en théorie, pouvoir s'appliquer aux sols. Cependant, des inconvénients existent, liés notamment au manque de connaissances que l'on peut avoir sur le sol. Tout d'abord, la sensibilisation du public est plus difficile lorsque tous les éléments d'un domaine ne sont pas connus. Aussi, les spécialistes du sujet sont rares et pas encore fixés sur une méthodologie, ce qui pourrait freiner le développement de cette trame. Enfin, l'échelle de réalisation de la TBr, en fonction des paramètres pris en compte, pourrait ne pas être adaptée à tous les niveaux de planification territoriale notamment au-delà de l'échelle communale.

Aujourd'hui, le sol est quelques fois évoqué dans la planification, mais avant de pouvoir mettre en œuvre une TBr efficace au même titre que la TVB, il faudra un approfondissement des connaissances sur le sol et le développement d'une méthodologie adaptable au territoire et « facilement » réalisable.

3.2. Projets territoriaux et de recherche : premières pistes de trames brunes ?

Le concept étant novateur, très peu de projets de trame brune ont vu le jour jusqu'à présent en termes de planification urbaine. Néanmoins, des études expérimentales se développent. Par exemple à Limoges avec la création de cartographies de TBr grâce à des méthodes géomatiques et de télédétection ou encore à Lille avec la réalisation d'une cartographie de trame brune pour son SCoT qui consiste à différencier les espaces perméables des espaces non perméables. Cependant, celles-ci n'ont pas encore été prises en compte dans les documents d'urbanisme. Les exemples d'initiatives territoriales et de projets de recherche que nous allons présenter ici pourront nous permettre d'apprécier différentes manières d'aborder la trame brune et ainsi voir quelles approches seraient les plus pertinentes pour une intégration prochaine dans les documents de planification.

A. Lille Métropole (SCoT, 133 communes)

Lors du bilan de son SCoT en 2022 (ADULM, 2022), Lille Métropole a défini la trame brune comme « la continuité des sols perméables » et en a réalisé une cartographie (ANNEXE I) issue d'un traitement expérimental recoupant des données d'occupation du sol, de couverture végétale et du modèle numérique d'élévation (MNE).

Cette notion de trame brune n'est pas évoquée dans leur SCoT de 2017, mais ils l'introduisent dans leur bilan en la croisant avec les enjeux de consommation foncière liés à la loi Climat & Résilience de 2021. En effet, la métropole lilloise axe notamment ses efforts sur la réduction de la consommation d'espaces naturels et agricoles et lie cela à la conservation de la ressource en sol. Des démarches concrètes de protection des espaces naturels et agricoles périurbains sont d'ailleurs mises en place sur le territoire. Des travaux sont également menés sur les sols perméables à l'échelle du SCoT, dans la logique d'une réflexion autour d'une trame brune qui permettrait d'intégrer l'objectif de préservation de cette ressource, tant d'un point de vue quantitatif que qualitatif. Les objectifs visés sont le maintien et le rétablissement de la continuité écologique des sols.

Cette première approche de la trame brune dans le bilan à 6 ans du SCoT pourrait leur permettre une meilleure prise en compte de la ressource en sol lors d'une révision prochaine du document. Il est à noter que dans le bilan, la trame brune est quasiment systématiquement reliée à l'enjeu de l'eau et au bon fonctionnement de son cycle :

« Les réflexions sur la « trame brune » et sa cartographie font d'ailleurs le lien avec le sujet de l'eau et de l'imperméabilisation des sols. [...] Enfin, par essence, ces dispositions très fortes en faveur de la préservation des sols (ZAN) devraient être favorables et apporter beaucoup en matière de préservation de la biodiversité [...], ainsi qu'à la préservation de la trame brune « urbaine » permettant au cycle de l'eau de s'accomplir. »

B. Limoges Métropole (PLUi, 20 communes)

Déjà pionnière sur la mise en place de la TVB il y a de nombreuses années et d'une trame noire plus récemment, Limoges Métropole innove aujourd'hui par ses recherches sur la trame brune. Le modèle de la trame brune proposé est une expérimentation menée par des

étudiants de l'université de Rennes et de Lorraine avec l'aide de la métropole de Limoges et portée par l'Office Français de la Biodiversité (Cluzeau et al., 2022). C'est donc le cas d'une trame brune réalisée sur un territoire intercommunal.

L'étude s'interroge dans un premier temps sur la définition de trame brune et propose dans un second temps une méthodologie pour la cartographier à l'échelle intercommunale. Cette méthode est découpée en plusieurs cartographies d'éléments (ANNEXE II) qui permettront à la fin, d'établir une étude de trame brune sur le territoire : définition des gradients d'artificialisation et d'occupation des sols pour déterminer les espaces de pleine terre ; caractérisation des obstacles franchissables et infranchissables afin d'identifier un gradient d'isolement, et donc de fragmentation des espaces ; identification des espaces perméables et imperméables ; qualification des réservoirs de biodiversité et des corridors écologiques de la trame brune.

Des cartographies de trame brune à l'échelle du quartier sont également proposées dans l'étude. La méthodologie employée est sensiblement la même que précédemment avec toutefois quelques adaptations sur les degrés d'isolement et de connectivité des espaces végétalisés. Ces adaptations étaient nécessaires car en milieu urbain les espaces végétalisés sont difficiles à identifier par leur forme et leur petite taille. La méthode ne permet cependant pas d'inclure les trop petits espaces végétalisés (< 200 m²) par souci de simplification, ce qui crée un biais puisque malgré une surface réduite, ces espaces sont utiles à la faune et la flore. Il semblerait donc que la méthode développée se prête plutôt à des territoires intercommunaux majoritairement ruraux.

C. Tours Métropole Val de Loire (PLUm, 22 communes)

La métropole de Tours, pour l'élaboration de son nouveau PLUm, a décidé de mener une politique forte en ce qui concerne la préservation des sols, notamment en favorisant l'émergence de solutions règlementaires et techniques [18]. Le programme POPSU Transitions permettra un travail en collaboratif entre la métropole de Tours et une équipe scientifique pluridisciplinaire (juristes, pédologues, géographes...).

Pour ce projet, les grands axes de travail sont les suivants : (1) Identifier les indicateurs de la santé des sols en fonction de l'objectif poursuivi ; (2) Analyser les indicateurs pour définir des objectifs de protection de la multifonctionnalité des sols ; (3) Réaliser un inventaire des initiatives et expérimentations sur la restauration des fonctions écologiques des sols et déterminer les solutions possibles à mettre en œuvre sur le territoire tourangeau ; (4) Trouver des solutions à différentes échelles permettant d'assurer la continuité des fonctions du sol.

Le PLUm étant toujours en cours d'élaboration, nous ne pouvons pas connaître à l'heure actuelle tous les engagements qui seront pris par Tours Métropole Val de Loire, mais une première étape significative montre leur volonté de protection des sols : le PADD. En effet, dans le premier grand axe du PADD « Un territoire en transition, qui répond à l'urgence climatique et environnementale », une des premières orientations est « **Renforcer la vitalité des sols (réhabiliter les sols dégradés, accroître la vitalité et la surface des puits de carbone)** ». Aussi, au sein du troisième axe « Un territoire attentionné, qui cultive ses richesses environnementales et patrimoniales et paysagères », l'orientation

« **Reconnaître les sols comme une ressource vivante, limitée et non renouvelable** » appuie cette ambition de prise en compte du sol en tant qu'écosystème. L'inscription de cette volonté dans le PADD (qui transcrit la vision politique territoriale) montre l'engagement de la métropole puisque les étapes suivantes de l'élaboration du PLUM (règlement, OAP) devront être en accord avec les principes énoncés.

D. Projet MUSE (échelle intercommunale)

Le projet MUSE (Multifonctionnalité des Sols dans les Documents d'Urbanisme) s'inscrit dans une démarche de prise en compte des fonctions écologiques des sols dans l'aménagement du territoire. Il a été financé par l'ADEME et s'est déroulé de 2017 à 2021. L'objectif principal était de développer une méthode permettant de cartographier et d'évaluer la multifonctionnalité des sols, en particulier dans le cadre de documents d'urbanisme tels que les PLUi et les SCoT (Branchu et al., 2022). Cette méthode a été testée dans plusieurs métropoles, notamment Nantes, Châteauroux, et Aix-Marseille-Provence, et vise à aider les collectivités à intégrer la qualité des sols dans leurs plans d'aménagement pour soutenir des objectifs comme le "Zéro Artificialisation Nette" (ZAN). A noter tout de même que malgré une approche très complète et intéressante, la technicité de ce projet le rend pour l'instant difficilement applicable à l'échelle nationale.

E. Projet TrameBioSol (échelle intercommunale)

Le projet TrameBioSol, de son côté, se concentre sur la préservation et la restauration des sols dans le cadre d'une Trame Verte, Bleue et Brune (TVBB) sur le territoire de la Métropole du Grand Nancy. Ce projet, porté par l'association FLORE 54 et soutenu par diverses institutions régionales, vise à reconnecter écologiquement des sols fonctionnels en traversant plusieurs communes. L'accent est mis sur la biodiversité des sols, incluant la faune et la flore souterraine, souvent négligée dans les projets d'aménagement. TrameBioSol combine des diagnostics de qualité des sols avec des actions de restauration pour favoriser la circulation des espèces et la création d'habitats le long de la TVBB, impliquant également une participation citoyenne pour sensibiliser et impliquer les habitants locaux [19].

F. Projet BAUM (échelle communale, à la parcelle)

Le programme de recherche BAUM (Biodiversité, Aménagement Urbain, Morphologie) a été initié par le PUCA (Plan Urbanisme Construction Architecture) en 2019. Il est soutenu par la Direction Générale de l'Aménagement, du Logement et de la Nature (DGALN) et l'Office Français de la Biodiversité (OFB). Six équipes de recherche le composent et se rassemblent autour d'un même thème de travail : « *Comment concilier densification du bâti, et déploiement, dans la matrice construite de la ville, d'un réseau d'espaces naturels propices à l'accueil de la biodiversité la plus riche possible* ».

L'équipe de recherche Tram'biosol (à ne pas confondre avec le précédent projet), est principalement composée de chercheurs, d'architectes-urbanistes et de spécialistes du sol en milieu urbain. Leur but est de mieux localiser, caractériser et partager le concept de

trame brune avec tous les acteurs de l'aménagement urbain pour décider ensemble des formes de la ville de demain. Les outils qu'ils développent sont basés sur la distribution des communautés lombriciennes selon l'histoire des quartiers et de leurs infrastructures, ainsi que sur l'évolution des fonctions biologiques des sols.

Ils ont cherché à savoir comment certains facteurs urbanistiques ou pédologiques modifiés par l'Homme conditionnaient les communautés lombriciennes en milieu urbain. Sur le site étudié (ville de Palaiseau), ils n'ont pas pu dégager de paramètre significatif qui influencerait les communautés lombriciennes car l'habitabilité initiale du sol semble en grande partie définir la présence ou non de ces communautés.

3.3. Obstacles et freins

Aujourd'hui, notamment face à l'urgence environnementale et aux nouvelles injonctions sur la consommation des sols, de plus en plus de territoires essaient de prendre en compte les sols dans leurs documents de planification. Nous avons pu l'observer dans les parties précédentes. Cela montre une appropriation du sujet et une conscientisation de l'importance des sols.

Cependant, ce nouvel outil « trame brune » sera certainement différent des trames déjà existantes en termes de méthodologie et d'application. D'une part, l'échelle. Etant donné les paramètres pris en compte pour l'établissement de la trame brune, celle-ci sera réalisée à une échelle beaucoup plus fine que la trame verte et bleue. D'autre part, les moyens requis en termes d'ingénierie (temps et main d'œuvre) et de ressources financières ne permettront pas la réalisation d'une trame brune précise à l'échelle d'un territoire composé de plusieurs communes (Cluzeau et al., 2022). Enfin, la pertinence de cette trame réside en partie dans la prise en compte de la vie biologique du sol, qui se mesure tout au plus à l'échelle du quartier au vu des déplacements réduits des espèces concernées.

Le manque de connaissances général sur les sols, les espèces s'y trouvant et la manière dont elles s'assemblent en milieu urbain face à l'anthropisation et à l'isolement spatial s'ajoute comme difficulté pour la réalisation de trames brunes scientifiquement exactes. En résulte un nombre réduit d'experts sur le domaine des sols et un nombre de bureaux d'études capables de traiter correctement la thématique d'autant plus faible.

En s'appuyant à la fois sur les projets scientifiques récents mais aussi sur les premières tentatives de production de trame brune par certains territoires, il serait intéressant de mettre en place une méthodologie plus largement applicable ou au moins de dégager les points clés pour une meilleure prise en compte des sols dans les documents de planification. Nous verrons donc dans la dernière partie quelles pistes seraient intéressantes à explorer pour une caractérisation des sols plus démocratisée et une meilleure traduction réglementaire au sujet des sols dans les documents de planification.

PARTIE 3 – PISTES DE REFLEXION

Depuis les années 2000, les politiques publiques en France visent à contrôler l'étalement urbain et à limiter l'artificialisation des sols. Des lois comme la SRU et la loi ELAN ont renforcé la nécessité de consommer moins d'espace, en exigeant des justifications précises pour tout nouveau développement urbain. Ces législations encouragent également l'intégration de l'agriculture dans les projets territoriaux ainsi que la protection des espaces naturels.

Aujourd'hui, c'est la loi Climat et Résilience de 2021 qui impose une réduction de la consommation d'espaces naturels, agricoles et forestiers au travers de l'objectif ZAN.

1. Enjeux croisés : préservation des sols et ZAN

En 2021, la loi Climat et Résilience définit un objectif de Zéro Artificialisation Nette (ZAN) à l'horizon 2050. En d'autres termes, à cette date, plus aucun espace ne pourra être artificialisé à moins d'une compensation. Un objectif intermédiaire de réduction de 50% de la consommation foncière par rapport à la période 2011-2021 est fixé pour 2030. Au-delà du changement de paradigme à opérer sur l'aménagement du territoire en général, il faut bien se rendre compte qu'une telle loi ne peut pas s'appliquer de la même manière sur tous les territoires, notamment en raison de spécificités locales ou de dynamiques régionales différentes. Ainsi, la loi a connu des modifications en juillet 2023 afin de faciliter sa mise en œuvre, notamment auprès des élus des territoires.

Il est alors nécessaire de définir l'artificialisation qui peut être qualifiée comme l'altération durable de tout ou partie des fonctions écologiques d'un sol, en particulier de ses fonctions biologiques, hydriques et climatiques, ainsi que de son potentiel agronomique par son occupation ou son usage. Ce changement d'usage des sols, le plus souvent irréversible, a des conséquences qui peuvent être préjudiciables à l'environnement et à la production agricole [2].

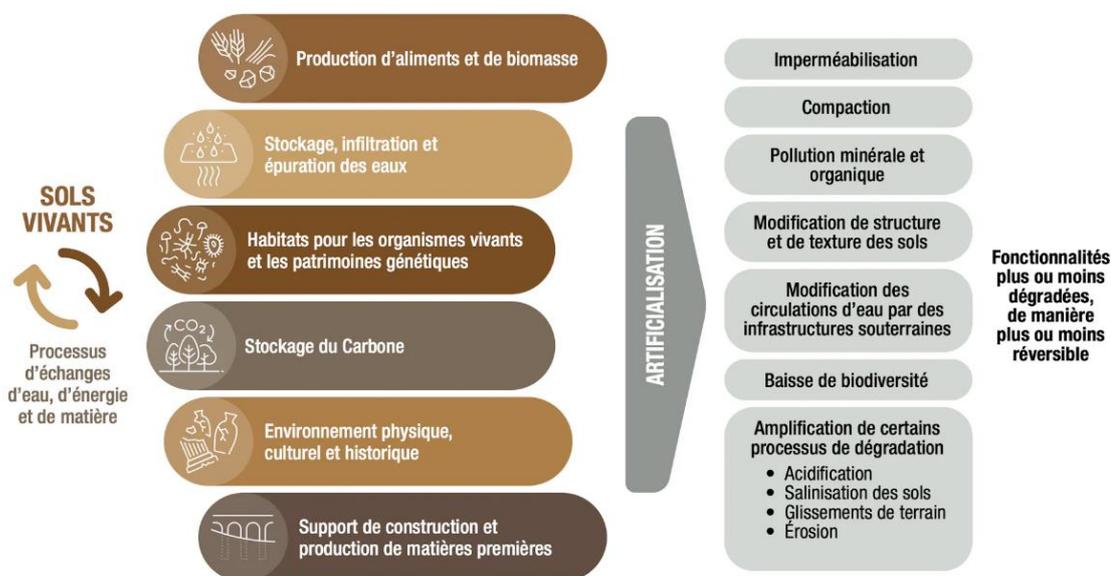


Figure 11 : Conséquences de l'artificialisation sur les fonctionnalités des sols [20]

Cette définition introduit la notion d'imperméabilisation, qu'il ne faut pas confondre avec l'artificialisation. Un sol imperméable est un sol dans lequel l'eau ne s'infiltrer pas. Ainsi, un sol non artificiel peut être imperméable (roche nue) tout comme un sol dit « artificiel » peut ne pas l'être (espaces verts, jardins). Dès lors, cela pose la question du but recherché : veut-on arrêter la consommation d'ENAF, veut-on conserver la capacité d'un sol à infiltrer l'eau, ou bien les deux ?

Là-dessus, le ZAN est clair : il vise à lutter contre l'artificialisation. Cela se traduit d'une part au travers des objectifs fixés qui sont quantitatifs et non qualitatifs : on compte les hectares à consommer et on ajuste pour rentrer dans les limites imposées mais on ne se préoccupe qu'à la marge de la qualité du sol des nouveaux aménagements. Cela mène même à ce que l'on pourrait considérer comme des contradictions. En effet les jardins (privés, familiaux), les espaces verts et tous les autres espaces couverts par une végétation herbacée mais utilisés à des fins résidentielles ou de production sont considérés comme artificialisés alors qu'ils constituent en milieu urbain de très grands réservoirs de sol (souvent fonctionnels). A noter tout de même, le décret n° 2023-1096 du 27 novembre 2023 modifie la nomenclature de l'artificialisation des sols et permettra, à partir de 2031, d'intégrer comme non artificialisées les surfaces dont les sols sont végétalisés et à usage de parc ou de jardin public [21].

Ainsi, malgré la prégnance de l'enjeu de la préservation de la multifonctionnalité des sols, ce qui préoccupe davantage les élus c'est la manière dont ils vont pouvoir organiser leur consommation foncière au regard de ce que leur impose le ZAN. Dès lors, il apparaît presque évident que cet objectif pourrait constituer un levier pour une prise en compte non seulement quantitative mais également qualitative des sols. Pour tous les documents de planification en cours d'élaboration ou de modification, le ZAN dictant la marche à suivre en termes de consommation foncière, il serait donc intéressant de le coupler à la considération de la multifonctionnalité des sols.

2. Pistes pour une meilleure intégration des sols dans les documents produits en bureau d'étude

Pour une meilleure considération des sols et de leurs fonctionnalités dans la planification territoriale, deux choses semblent indispensables : un portage politique de la part des élus et des territoires ainsi qu'une capacité des bureaux d'études à intégrer le sol en tant que compartiment multifonctionnel dans les documents de planification.

Actuellement, le sujet commence à se démocratiser mais est encore trop peu approprié par les décideurs et seulement quelques bureaux d'études à l'échelle nationale sont spécialisés à la fois en sciences du sol et en aménagement du territoire. Les bureaux d'études en planification et aménagement (comme Citadia) ont la compétence « urbanisme » souvent accompagnée de la compétence « environnement » qui leur permet de pouvoir rédiger toutes les pièces constitutives d'un SCoT ou d'un PLU(i).

Généralement, dans ces documents, la question du sol est quasiment exclusivement abordée sous l'angle de l'usage qui en est fait et un règlement qui dépend de la vocation attribuée (agricole, naturelle ou urbaine/à urbaniser) y est appliqué. Cette prise en compte du sol se base donc quasi uniquement sur un critère surfacique qui est l'occupation du sol. Il serait alors intéressant d'explorer des pistes d'intégration de la multifonctionnalité des

sols dans ces documents. Nous nous poserons tout d'abord la question de l'échelle à laquelle aborder ce sujet puis nous développerons les possibilités d'intégration au sein des documents de planification.

2.1. Question d'échelle

Lors de la présentation des principaux documents de planification existants, nous avons vu qu'ils s'appliquaient à des échelles différentes. Naturellement, il est donc nécessaire de se questionner sur l'échelle la plus propice pour une prise en considération de la multifonctionnalité des sols lors de la réalisation des documents en bureau d'études.

Premièrement, regardons quels avantages seraient apportés par une prise en compte dans les SCoT. Les données sur le sol aujourd'hui disponibles le sont le plus souvent à une échelle nationale (1/250 000^{ème}). Les cartes qui en découlent ont alors une résolution plus adaptée au territoire d'un SCoT (voire d'un SRADDET) plutôt qu'à celui d'un PLU(i) (de manière générale) qui requiert une analyse plus fine. Comme évoqué précédemment, les coûts liés à une telle étude sont très élevés. S'ils étaient portés par les SCoT ou même à des échelles supérieures, cela permettrait d'assurer une forme d'équité des territoires en permettant même aux collectivités les plus petites d'accéder aux connaissances sur leurs sols. Enfin, les PLU(i) devant être compatibles avec les documents d'échelle supérieure, une prise en compte des sols dans les SCoT imposerait un respect de ce principe dans les PLU(i).

Deuxièmement, nous allons observer ce qu'apporterait une prise en compte dans les PLU(i). L'objectif ZAN est intégré à la fois dans les SCoT et dans les PLU(i) mais il est beaucoup plus territorialisé dans ces derniers de par l'échelle d'application. En liant les enjeux de multifonctionnalité des sols et de consommation foncière, ce point serait alors intéressant pour une intégration plus fine et sectorisée des enjeux de fonctionnalité du sol. Aussi, les PLU(i) imposant des règles d'urbanisme et d'aménagement très concrètes, cela permettrait de rendre la prise en compte des sols plus opérationnelle que dans un SCoT.

Sur la base des arguments ici énoncés et en raison de la connaissance personnelle des documents de planification, nous étudierons ci-après les possibilités de prise en compte de la multifonctionnalité des sols dans un PLU(i).

2.2. Prise en compte du compartiment sol dans un PLU(i) : approche pratique

Tous les territoires peuvent être découpés de manière schématique selon quatre types d'usage du sol. C'est d'ailleurs cette nomenclature qui est reprise dans les PLU(i) avec des espaces agricoles, naturels, urbains et à urbaniser. De façon générale, les espaces agricoles (qui représentent 50% du territoire métropolitain) doivent de plus en plus tendre vers des pratiques respectueuses des sols. Par exemple, une réduction de l'utilisation des produits phytosanitaires diminuerait les impacts sur la biodiversité des sols et un travail de la terre plus en surface atténuerait les perturbations sur les horizons et la faune du sol. En ce qui concerne les espaces naturels, les sols y sont déjà en grande partie fonctionnels, mais il est nécessaire de sensibiliser les utilisateurs aux bonnes pratiques et de localiser les secteurs de pollution potentielle ou de non fonctionnalité (carrières, sites ponctuellement pollués...).

Ces principes généraux sont à appliquer le plus possible pour ces deux types d'espaces afin de conserver ou de rétablir la multifonctionnalité des sols. Dans l'approche que nous allons développer, ce sont les espaces urbains et à urbaniser pour lesquels des pistes de réflexion seront le plus souvent données. En effet, ce sont dans ces espaces que les sols fonctionnels sont les plus rares et il est nécessaire de préserver ceux qui le sont.

A. Rapport de présentation

Le rapport de présentation est une pièce essentielle du PLU(i). Il rassemble le diagnostic territorial, l'état initial de l'environnement (EIE), la justification des choix et l'évaluation environnementale (EE) ou les incidences des projets sur l'environnement si le PLU n'est pas soumis à EE. C'est la base analytique du PLU(i), fournissant une vision globale des enjeux territoriaux, notamment environnementaux. Il permet de dresser un portrait du territoire afin de définir la planification la plus adéquate au regard des enjeux présents localement.

DIAGNOSTIC

Tout d'abord, le diagnostic. Il va permettre d'évaluer les besoins fonciers (résidentiels et activités économiques) en accord avec la tendance démographique et les projets de développement du territoire. Ces besoins seront ajustés dans la limite fixée par le ZAN. On comprend alors qu'il faut estimer au plus juste les besoins afin de limiter au maximum les surfaces qui subiront une artificialisation. D'ailleurs, il est intéressant de spécifier ici ce qui se cache derrière le zéro artificialisation **nette**. A l'horizon 2050, toute artificialisation de nouvelle terre ne sera pas interdite, mais il sera obligatoire de renaturer d'autres espaces en surface équivalente s'il y a de l'artificialisation. Cela pose alors une question dès aujourd'hui : doit-on artificialiser rapidement sans trop de réflexion autour des sols parce qu'un territoire en a besoin quitte à refaire mieux ailleurs plus tard ? ou bien est-ce qu'un développement raisonné et des aménagements pensés en prenant en compte tous les enjeux environnementaux (dont le sol) seraient une solution plus durable ?

ETAT INITIAL DE L'ENVIRONNEMENT

L'EIE est également une étape importante. C'est dans cette partie que l'on va décrire et cartographier tous les éléments nous donnant des informations sur la qualité potentielle des sols. Il faudrait tout d'abord mieux y définir le socle géophysique qui est souvent une partie assez légère dans les EIE.

Ensuite, le but serait d'utiliser les données cartographiques en lien avec le sol et disponibles à l'échelle nationale pour cartographier un maximum d'indicateurs sans avoir à recréer de la donnée. Certaines de ces cartes sont déjà communément réalisées comme la localisation des zones humides et des sites de pollution potentielle (sites BASOL, BASIAS, ICPE...). Il serait alors intéressant de produire des cartes thématiques complémentaires telles que les espaces perméables et imperméables (cf. SCoT de Lille), la réserve en eau des sols, les stocks de carbone organique, etc. Le but final étant de croiser toutes ces cartes pour cibler les secteurs potentiellement sensibles. Cela permettrait de localiser à la fois les zones de sols fonctionnels à ne pas impacter (zones humides par exemple) mais aussi des sols dont la fonctionnalité est certainement dégradée et qu'il faudrait éventuellement reconstruire.

EVALUATION ENVIRONNEMENTALE

L'évaluation environnementale est une pièce visant à intégrer l'environnement dans l'élaboration d'un document de planification. Elle doit rendre compte des effets potentiels ou avérés sur l'environnement du projet de PLU(i) et permet d'analyser et de justifier les choix retenus au regard des enjeux identifiés sur le territoire concerné. Sur cette base, l'EE présente les mesures envisagées pour éviter, réduire ou compenser (séquence ERC) les impacts et prévoit des indicateurs pour en suivre les effets.

Cette démarche itérative qui permet de faire des allers-retours à chaque étape de l'élaboration d'un PLU(i) serait alors un outil pertinent pour prendre en compte les sols à tous les niveaux du document de planification en proposant notamment des mesures ERC qui permettent la préservation des sols.

B. PADD

Le PADD définit les grandes orientations politiques du PLU(i), articulant les ambitions de développement durable, de qualité de vie et de protection environnementale. Il donne le ton des priorités et fixe les objectifs à atteindre. Ainsi, pour une bonne prise en compte du sol dans un PLU(i), l'inscription d'une ou plusieurs orientations à ce sujet est inévitable. Cela marque de fortes ambitions politiques en la matière et permet que les autres pièces du document respectent les orientations annoncées.

Une orientation ambitieuse pourrait être la mise en place d'une politique de "sols vivants", visant à maintenir ou restaurer la biodiversité des sols urbains. Cela inclurait des actions telles que la promotion des pratiques de jardinage sans pesticides, l'incitation à l'installation de toitures végétalisées avec substrats favorisant la vie du sol, ou encore le développement de parcs urbains avec une gestion différenciée favorisant les sols naturels. Le PADD pourrait également intégrer des orientations pour promouvoir l'économie circulaire appliquée aux sols, comme le recyclage des terres excavées pour des projets de construction ou de réhabilitation, réduisant ainsi le besoin d'extraire de nouveaux matériaux et limitant l'impact sur les sols naturels.

De plus, sans viser le sol en particulier, des orientations sur d'autres thématiques permettent une prise en compte indirecte du sol comme par exemple : Préserver et développer la trame verte et bleue ; Préserver ou créer des forêts urbaines et masses boisées ; Maintenir les prairies ; Contenir le développement dans l'enveloppe urbaine.

Exemples de rédaction :

PLUm de Tours Métropole Val de Loire – réunion publique pour la présentation des grandes orientations du PADD

1.1.3 Renforcer la vitalité des sols : réhabiliter les sols dégradés, accroître la vitalité et la surface des puits de carbone

3.3.2 Reconnaître les sols comme une ressource vivante, limitée et non renouvelable

PLUi de Plaine Commune – pièce écrite – PADD p 16 – 2.1.2 préserver la pleine terre et végétaliser les cœurs d’îlot

« Plaine Commune se donne également pour objectif, partout où cela est possible et compatible avec les objectifs de développement urbain et économique de préserver le maximum de surface de pleine terre. Limitant l’imperméabilisation des sols, l’aménagement de ces surfaces doit permettre : un meilleur écoulement et une gestion des eaux pluviales plus respectueuses du cycle naturel de l’eau ; le rafraîchissement de la ville pour limiter l’impact des fortes chaleurs ; le maintien ou la restauration des sols vivants comme support de la trame verte et bleue »

C. OAP

Les OAP détaillent les projets d’aménagement spécifiques en lien avec les objectifs du PADD, en précisant les conditions de réalisation et les critères à respecter. Elles jouent un rôle stratégique dans la mise en œuvre concrète du PLU(i).

En lien avec le ZAN, de nombreuses questions se posent sur les zones à urbaniser et les secteurs de projet. Actuellement, la décision est prise en fonction de la disponibilité des parcelles et de leur constructibilité (zone humide, zone inondable, mouvements de terrain...). On pourrait imaginer d’autres paramètres en lien avec les sols à vérifier et prendre en compte (profondeur, présence d’horizons...) pour choisir au mieux les secteurs d’OAP. Un outil type « scoring » pourrait être une idée à développer pour les OAP sectorielles. Il inclurait des paramètres pour lesquels les données sont disponibles et d’autres qu’il faudrait mesurer. Afin d’obtenir certaines données permettant de caractériser la fonctionnalité d’un sol, la réalisation obligatoire d’un diagnostic agro-pédologique sur les secteurs de projet pourrait être une première étape. L’idée serait d’utiliser les secteurs potentiels avec les moins bons « scores » pour maintenir la fonctionnalité présente dans les secteurs avec un meilleur « score ». Sur les secteurs retenus pour les projets, des mesures spécifiques de protection ou de restauration des sols accompagnant les projets seraient nécessaires.

Pour une mise en place optimale de ces mesures spécifiques, différentes stratégies foncières peuvent être opérées pour matérialiser l’OAP et intégrer la protection de la trame brune. Voici quelques-uns des outils juridiques existants sur lesquels il serait possible de s’appuyer : la convention de mise à disposition de terrain d’assiette, la convention de gestion, les servitudes d’utilité publique ou encore tout simplement l’acquisition puis la division foncière. Un dernier outil particulièrement intéressant serait l’obligation réelle environnementale qui vise à conserver, gérer et restaurer des éléments de la biodiversité ou des fonctions écologiques. C’est une protection volontaire qui passe par un contrat librement établi entre le propriétaire du bien immobilier et son cocontractant, qui peut être une collectivité publique, un établissement public ou une personne morale de droit privé agissant pour la protection de l’environnement [22].

En ce qui concerne les OAP thématiques, on retrouve déjà dans certaines OAP TVB des recommandations pour une meilleure prise en compte des sols mais on pourrait tout à fait imaginer une OAP « Sols fonctionnels » uniquement axée sur cette thématique.

PLUi de Vallée Sud Grand Paris – OAP Environnement p 14 – Trames et biodiversité

La trame brune vise le maintien ou le rétablissement de la continuité écologique des sols. Les sols sont en effet essentiels au fonctionnement des écosystèmes, ce qui justifie la limitation de leur artificialisation en milieu urbain.

- *Prévoir au maximum les espaces de pleine terre en continuité les uns des autres ;*
- *Si nécessaire, compenser en désartificialisant et en renaturant dans les secteurs de renaturation privilégiés les plus proches (espaces publics à renaturer) ;*
- *Lors des chantiers, mettre en œuvre les mesures des protections adaptées pour ne pas retirer la terre végétale des espaces verts de pleine terre végétale et préserver son intégrité (pas de compactage, pas de déchets de chantier...);*
- *Lorsqu'il est nécessaire d'excaver la terre végétale pour les besoins de la construction, conserver la terre végétale, dans la mesure du possible, pour réaliser les aménagements paysagers ;*
- *Utiliser des revêtements perméables en fonction de leur usage.*

D. Règlement

Le règlement est la pièce normative du PLU(i), déclinée en un règlement graphique (cartographie des zonages et des servitudes) et un règlement écrit (règles d'usage des sols par zone). Il détaille les obligations et les interdictions en matière d'aménagement et d'occupation des sols.

Sur les cartes de zonage, une possibilité serait d'intégrer des zones spécifiques de protection des sols, identifiées lors du diagnostic et de l'EIE. Cela pourrait inclure des « zones de sols sensibles », où toute intervention serait strictement encadrée (limitation de l'imperméabilisation, obligation de maintenir un couvert végétal, etc.) ou encore des « corridors écologiques souterrains », zones où la préservation de la faune du sol serait essentielle, par exemple en limitant les activités de compactage du sol.

Au sein du règlement écrit, des règles précises concernant les pratiques d'aménagement pourraient être introduites. Voici quelques exemples en faveur de la préservation des sols : obliger lors de toute construction à préserver la couche supérieure du sol puis à s'en resservir pour créer des anthroposols reconstitués ; imposer un coefficient d'occupation des sols (COS) maximal très strict dans les zones où la qualité des sols est jugée excellente ou fragile, limitant ainsi l'étalement urbain ; rendre obligatoire la gestion des eaux pluviales par infiltration dans les zones où les sols sont naturellement perméables, pour éviter leur saturation et soutenir la recharge des nappes phréatiques ; interdire l'utilisation de produits chimiques nocifs dans certaines zones ; promouvoir des techniques de construction à faible impact sur le sol, comme les fondations légères.

En poursuivant la réflexion sur toutes les suggestions faites, le PLU(i) pourrait devenir un outil puissant pour gérer et protéger les sols de manière durable, assurant ainsi un développement urbain qui respecte les écosystèmes et les ressources naturelles à long terme.

Tableau 3 : Synthèse des perspectives d'intégration du sol dans les pièces du PLU(i)

Pièce	Opérationnalité	Facilité production	Commentaire
Diagnostic	-	+	Nécessaire pour évaluer les besoins fonciers en lien avec le ZAN. Complexité accrue par la nécessité d'estimer les besoins de manière précise pour limiter l'artificialisation.
EIE	-	+	Fondamental pour cartographier les sols et autres éléments environnementaux. L'utilisation des données cartographiques nationales est un point fort, mais la création de cartes thématiques complémentaires peut être difficile.
EE	+	+	Cruciale pour intégrer l'environnement dans la planification et justifier les choix. La démarche itérative est utile mais peut être complexe à mettre en œuvre.
PADD	-	++	Détermine les grandes orientations politiques du PLUi, avec une importance particulière pour la prise en compte des sols. Facilité de mise en œuvre grâce à la possibilité de définir des orientations claires et ambitieuses.
OAP thématique	+	++	Peut inclure des recommandations spécifiques pour des thèmes comme les sols fonctionnels. Relativement plus simple à produire que les OAP sectorielles en raison de son focus thématique.
OAP sectorielle	++	+	Stratégique pour les projets d'aménagement spécifiques. La complexité réside dans l'intégration de critères pour la protection des sols et la mise en œuvre de stratégies foncières.
Règlement	++	+	Détermine les règles d'usage des sols. La possibilité d'intégrer des zones spécifiques de protection des sols dans le règlement graphique et des règles précises dans le règlement écrit rend cette pièce très opérationnelle et relativement facile à mettre en œuvre.

++ : Très favorable, + : Favorable, - : Peu favorable

Ce tableau met en avant, pour chaque pièce du PLU(i), le niveau d'opérationnalité, la facilité de mise en œuvre/production, et des commentaires expliquant ces évaluations. Les pièces du rapport de présentation et le PADD sont peu opérationnels mais présentent un fort intérêt pour assurer une base solide à la suite du projet. Les difficultés de mise en œuvre sont principalement liées au cadre législatif rigide et à l'exigence d'une approche détaillée.

CONCLUSION

Le présent mémoire s'est attelé à étudier de manière exhaustive l'intégration des sols dans les documents de planification territoriale, en mettant en lumière le rôle du ZAN. En partant d'une analyse critique des politiques actuelles, nous avons montré que, malgré l'importance cruciale des sols pour le fonctionnement des écosystèmes, ils demeurent sous-représentés dans les processus de planification territoriale. Cela est d'autant plus préoccupant que les sols jouent un rôle indispensable dans la régulation des cycles hydrologiques, la séquestration du carbone, la biodiversité, et la résilience des territoires face aux changements climatiques.

Notre recherche a révélé que bien que des initiatives commencent à apparaître pour intégrer les sols dans la planification, celles-ci restent marginales et sont souvent confrontées à des obstacles majeurs. La notion de trame brune a été explorée comme une innovation prometteuse, offrant une nouvelle perspective pour intégrer les sols de manière systématique dans les stratégies d'aménagement du territoire. Cependant, sa mise en œuvre se heurte à des défis techniques, économiques, et législatifs qui nécessitent des solutions concertées et innovantes.

Les résultats de cette étude mettent en exergue l'urgence d'adopter une approche plus intégrée et holistique pour la gestion des sols en milieu urbain. La transition vers une meilleure prise en compte des sols dans la planification ne peut se faire sans un changement de paradigme dans la manière dont les sols sont perçus et valorisés. Il est impératif que les décideurs, les urbanistes, les écologistes, et les citoyens collaborent étroitement pour développer des pratiques urbanistiques qui non seulement préservent, mais régénèrent les fonctions écologiques des sols. La généralisation de telles pratiques pourrait conduire à une transformation durable des paysages urbains, rendant les villes plus résilientes face aux défis écologiques de la fin du siècle.

En termes de perspectives futures, plusieurs pistes méritent d'être explorées pour approfondir la recherche et l'action dans ce domaine. Premièrement, il serait pertinent de développer des études comparatives à l'échelle internationale pour identifier les meilleures pratiques en matière d'intégration des sols dans la planification urbaine afin d'améliorer nos stratégies locales. Deuxièmement, l'évolution des outils de modélisation et des systèmes d'information géographique (SIG) offre des opportunités considérables pour cartographier et analyser les sols de manière plus précise et dynamique. Le développement de modèles prédictifs pourrait faciliter l'intégration des sols dans les processus de décision en offrant des scénarios prospectifs sur l'impact des aménagements sur les sols. Enfin, une autre voie de recherche pourrait consister à explorer les liens entre la santé des sols urbains et la santé publique. En effet, les sols influencent la qualité de l'air, la gestion des eaux pluviales, et la disponibilité des espaces verts, autant de facteurs ayant un impact direct sur le bien-être des populations urbaines. Comprendre ces interactions pourrait renforcer la reconnaissance des sols comme un bien commun nécessitant une protection accrue.

Ces ouvertures ne sont qu'un point de départ pour des travaux futurs qui devront mobiliser une diversité d'acteurs et de disciplines. La complexité des enjeux liés aux sols urbains appelle à une mobilisation collective et à une innovation continue pour construire des territoires plus durables, résilients et inclusifs.

SITOGRAPHIE

[1] CENTRE DE RESSOURCES POUR L'ADAPTATION AU CHANGEMENT CLIMATIQUE, 2023. Le sol, un trésor à protéger face au changement climatique. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.adaptation-changement-climatique.gouv.fr/dossiers-thematiques/milieux/sol#:~:text=Gr%C3%A2ce%20%C3%A0%20son%20pouvoir%20absorbant,CO2%2C%20responsables%20du%20r%C3%A9chauffement%20climatique.> (consulté le 23 août 2024)

[2] CEREMA, 2023. Portail de l'artificialisation des sols. Consommation d'espaces et artificialisation : quelles définitions ? [En ligne]. Disponible sur : <https://artificialisation.developpement-durable.gouv.fr/comprendre-et-sensibiliser/consommation-despaces-et-artificialisation-definitions#:~:text=L'artificialisation%20est%20d%C3%A9finie%20dans,son%20occupation%20ou%20son%20usage.%22> (consulté le 23 août 2024)

[3] BAUM - TRAM'BIOSOL, 2024. Intégration de la Trame Brune et de la biodiversité lombricienne des sols dans les programmes d'aménagement urbain. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.urbanisme-puca.gouv.fr/5-juin-baum-tram-biosol-integration-de-la-trame-a2847.html?lang=fr> (consulté le 17 août 2024)

[4] MASSENET J.-Y., 2010. Chapitre III : Les constituants solides du sol. [En ligne]. Disponible sur : <http://jymassenet-foret.fr/cours/pedologie/PEDO3.pdf> (consulté le 04 mai 2024)

[5] CHAMBRES D'AGRICULTURE DU LANGUEDOC-ROUSSILLON, 2011. Guide des produits organiques utilisables en Languedoc-Roussillon - Tome 1. Chapitre 2. [En ligne]. Disponible sur : https://agri82.chambre-agriculture.fr/fileadmin/user_upload/National/FAL_commun/publications/Occitanie/GuidePO_Tome1_chapitre_2.pdf (consulté le 15 mai 2024)

[6] UNIFA, (sans date). Parlons fertilisation. Qu'est-ce qu'un sol ? [En ligne]. Disponible sur : <https://fertilisation-edu.fr/9-le-sol.html?start=6> (consulté le 15 mai 2024)

[7] PEIGNE J., 2014. UVED. La structure du sol. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.supagro.fr/ress-pepites/processusecologiques/co/StructureduSol.html> (consulté le 15 mai 2024)

[8] DESAULNIERS A. Schéma de structure du sol. In Carnet horticole et botanique [En ligne]. Disponible sur : <https://espacepourelvie.ca/structure-du-sol> (consulté le 15 mai 2024)

[9] VINS VIGNES VIGNERONS, (sans date). Horizons – Dénomination des sols. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.vinsvignesvignerons.com/Geologie/Etude-des-sols-Pedologie/Horizons-Denomination-des-sols> (consulté le 16 mai 2024)

[9b] ALLETTO L., 2021. Belveder. Les sols, épiderme fragile aux multiples fonctions et services écosystémiques. [En ligne]. Disponible sur : <https://revue-belveder.org/index.php/les-sols-epiderme-fragile-aux-multiples-fonctions-et-services-ecosystemiques/> (consulté le 16 mai 2024)

[10] GIS SOL. Profondeur des sols. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.gissol.fr/thematiques/profondeur-des-sols->

[19] TRAMEBIOSOL, 2024. [En ligne]. Disponible sur : <https://tramebiosol.fr/presentation/> (consulté le 23 août 2024)

[20] MARZIN C., GUIDETTI G., 2023. Carbone4. Zéro Artificialisation Nette : décryptage des enjeux. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.carbone4.com/article-zan-decryptage> (consulté le 20 août 2024)

[21] GUITTARD L., 2023. Lefebvre Dalloz – Editions Législatives. ZAN : une nouvelle nomenclature pour le calcul de l'artificialisation des sols. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.editions-legislatives.fr/actualite/zan-une-nouvelle-nomenclature-pour-le-calcul-de-lartificialisation-des%C2%A0sols/> (consulté le 21 août 2024)

[22] CEREMA, 2023. Outils de l'aménagement – centre de ressources. Les obligations réelles environnementales (ORE). [En ligne]. Disponible sur : <https://outil2amenagement.cerema.fr/outils/les-obligations-reelles-environnementales-ore> (consulté le 24 août 2024)

BIBLIOGRAPHIE

ADULM, 2022. Bilan du SCoT de Lille Métropole. 166 p.

ALLAG-DHUISME F., AMSALLEM J., BARTHOD C., DESHAYES M., GRAFFIN V., LEFEUVRE C., et al., 2010. Choix stratégiques de nature à contribuer à la préservation et à la remise en bon état des continuités écologiques : premier document en appui à la mise en œuvre de la Trame verte et bleue en France. Proposition issue du comité opérationnel Trame verte et bleue, Rapport, MEEDDM.

BAIZE D. et GIRARD M.C., 2008. Référentiel pédologique 2008. Quae, pp. 6-26.

BAPTIST F., DISCA T., HELLAL J., LIMASSET E., HORTIO M. et BINET T., 2018. Mesure de la biodiversité et évaluation des services écosystémiques des milieux restaurés. Méthodes et retours d'expériences. RECORD 17-1021/1A.

BECHET B., CARRE F., FLORENTIN L., LEYVAL C., MONTANARELLA L., MOREL J.L., RAIMBAULT G., RODRIGUEZ F., ROSSIGNOL J.P. et SCHWARTZ C., 2009. Caractéristiques et fonctionnement des sols urbains, Sous les pavés la terre, Cheverry et Gascuel éd., Omniscience, Montreuil, pp. 45-74.

BERTHELIN J., BLANCHART E., TRAP J. et MUNCH J.C., 2018. Soils are Biosystems, Habitats and Reserves of Biodiversity. Soils as a Key Component of the Critical Zone 1: Functions and Services, 1, pp. 117-145.

BOSC L., 2017. Propriété et protection des sols. Réflexions civilistes sur la prise en compte de la qualité des sols, Droit et Ville, vol. 84, no. 2, pp. 65-80.

BRANCHU P., MARSEILLE, F., BECHET B., BESSIERE J.-P., BOITHIAS L., DUVIGNEAU C., GENESCO P., KELLER C., LAMBERT M.-L., LAROCHE B., LE GUERN C., LEMOT A., METOIS R., MOULIN J., NEEL C. et SHERIFF R., 2022. MUSE. Intégrer la multifonctionnalité dans les documents d'urbanisme. 184 p.

BULLOCK P. et GREGORY, P.J., 1991. Soils in the urban environment. Bullock P. et Gregory, P.J. Eds., In Soils : a neglected resource in urban areas, pp. 1-4.

CALVARUSO C., BLANCHART A. et BERTIN S., 2019 - Diagnostic de la qualité des sols agricoles et forestiers: indicateurs de suivi et stratégies de déploiement. 80 p. + annexes.

CEBALLOS G., EHRLICH P.R. et DIRZO R., 2017. Biological annihilation via the ongoing sixth mass extinction signaled by vertebrate population losses and declines. Proc. Natl. Acad. Sci. USA 2017, p 114.

CEREMA, 2019. Quelle prise en compte des sols dans les documents d'urbanisme ? Rapport d'étude. p 126.

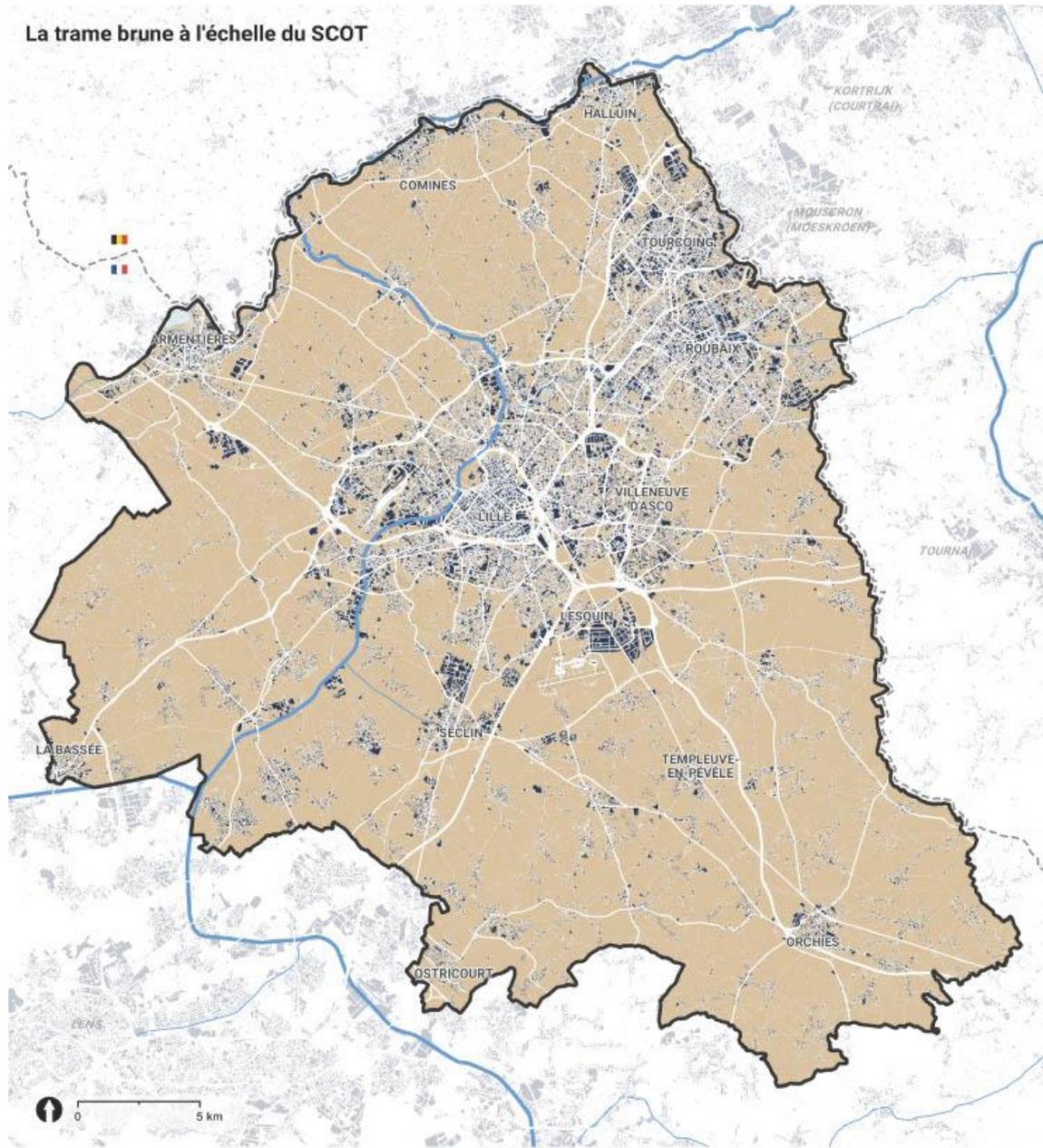
CHASE J., BLOWES S., KNIGHT T., GERSTNER K., et MAY F., 2020. Ecosystem decay exacerbates biodiversity loss with habitat loss. Nature, pp. 1-6. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2531-2>.

CLUZEAU D., LEPRISE A., MARECHAL J., AUCLERC A., JOUSSEIN E., SOUBRAND M., DOM O. et SOWA-DOYEN J., 2022. Trame brune de Limoges Métropole : Développement expérimental d'une trame brune sur le territoire d'un EPCI. Phase 1 : Approche méthodologique. 42 p.

- COSTANZA R., D'ARGE R., DE GROOT R., FARBER S., GRASSO M., HANNON B., LIMBURG K., NAEEM S., O'NEILL R., PARUELO J., RASKIN R., SUTTON P. et VAN DEN BELT, M., 1997. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 387, pp. 253-260.
- CROWTHER T.W., VAN DEN HOOGEN J., WAN J., MAYES M.A., KEISER A., MO L., AVERILL C. et MAYNARD D.S., 2019. The global soil community and its influence on biogeochemistry. *Science*, 365.
- DAMAS O. et COULON A., 2016. Créer des sols fertiles : du déchet à la végétalisation urbaine. Editions Le Moniteur, Antony, 336 p. (EAN : 9782281140965).
- FAO, 2016. Benefits of urban trees. Forest Assessment, Management and Conservation Division, FAO, 1 p.
- GARDINER M.M., BURKMAN C.E. et PRAJZNER S.P., 2013. The value of urban vacant land to support arthropod biodiversity and ecosystem services. *Environmental entomology*, 42, pp. 1123-1136.
- GIRARD M.C., WALTER C., REMY J.C., BERTHELIN J. et MOREL J.L., 2005. Sols et environnement. Dunod, 776 p.
- GUILLAND C., MARON P.-A., DAMAS O. et RANJARD L., 2018. La biodiversité des sols urbains au service des villes durables, 25, pp. 59-77
- JEFFERY S., GARDI C., JONES A., MONTANARELLA L., MARMO L., MIKO L., RITZ K., PERES G., RÖMBKE J., PUTTEN W.H. VAN DER, 2010. European Atlas of Soil Biodiversity, European Commission, Publications Office of the European Union.
- LEHMAN A., 2006 - "Technosols and other proposals on urban soils" for the WRB (World Reference Base for Soil Resources)." *International Agrophysics*, 20, pp. 129-134.
- MEA, 2005 - Ecosystems and Human Well-being: Current State and Trends, Volume 1, Island Press, Washington D.C.
- MOREL J.L., CHENU C. et LORENZ K., 2015. Ecosystem services provided by soils of urban, industrial, traffic, mining, and military areas (SUITMAs). *Journal of Soils and Sediments*, 15, pp. 1659-1666.
- ROSSITER D.G., 2007. Classification of urban and industrial soils in the world reference base for soils ressources. *Journal of Soils and Sediments*, 7, pp. 96-100.
- SCHWARTZ C., 2013. Les sols de jardins, supports d'une agriculture urbaine intensive. *VertigO-la revue électronique en sciences de l'environnement*. Hors-série 15.
- SCHWARTZ C., SERE G., STAS M., BLANCHART A., MOREL J.L. et CONSALES J.N., 2015. Quelle ressource sol dans les villes pour quels services et quels aménagements ? *Innovations Agronomiques*, 45, pp. 1-11.
- SMALL E.C., SADLER J.P. et TELFER M.G., 2002. Carabid beetle assemblages on urban derelict sites in Birmingham, UK. *Journal of Insect Conservation*, 6, pp. 233-246.
- VALENTIN C., 2018. Les sols au cœur de la zone critique de la Terre. *Annales des Mines - Responsabilité & environnement*, 91, pp. 6-9. <https://doi.org/10.3917/re1.091.0006>

ANNEXES

ANNEXE I : Carte de trame brune du SCoT de Lille Métropole



Sources : ADULM (2022), OCSOL 20-2015, couverture végétale 2018 extraite d'une image Spot 2018, CGET, BD TOPO® IGN (2021), CLC - UE-SOeS (2018), OSM (2021)

Type de sols

- Sol perméable
- Sol imperméable*

*Les réseaux de voiries et ferroviaires sont ici représentés en blanc pour une question de lisibilité et de repérage. Ils appartiennent néanmoins à la catégorie des éléments imperméables.

La carte de la trame brune est issue d'un traitement expérimental. Celui-ci est le fruit d'un croisement entre les données d'occupation du sol (2015), de la couverture végétale (image satellite SPOT 2018) et du modèle numérique d'élévation (MNE 2018). Étant donné son caractère expérimental, cette cartographie est amenée à évoluer.

l'Agence
de DÉVELOPPEMENT
ET D'URBANISME DE
Lille Métropole
Novembre 2022

ANNEXE II: Plusieurs des éléments cartographiés pour la définition d'une méthodologie de trame brune à Limoges Métropole

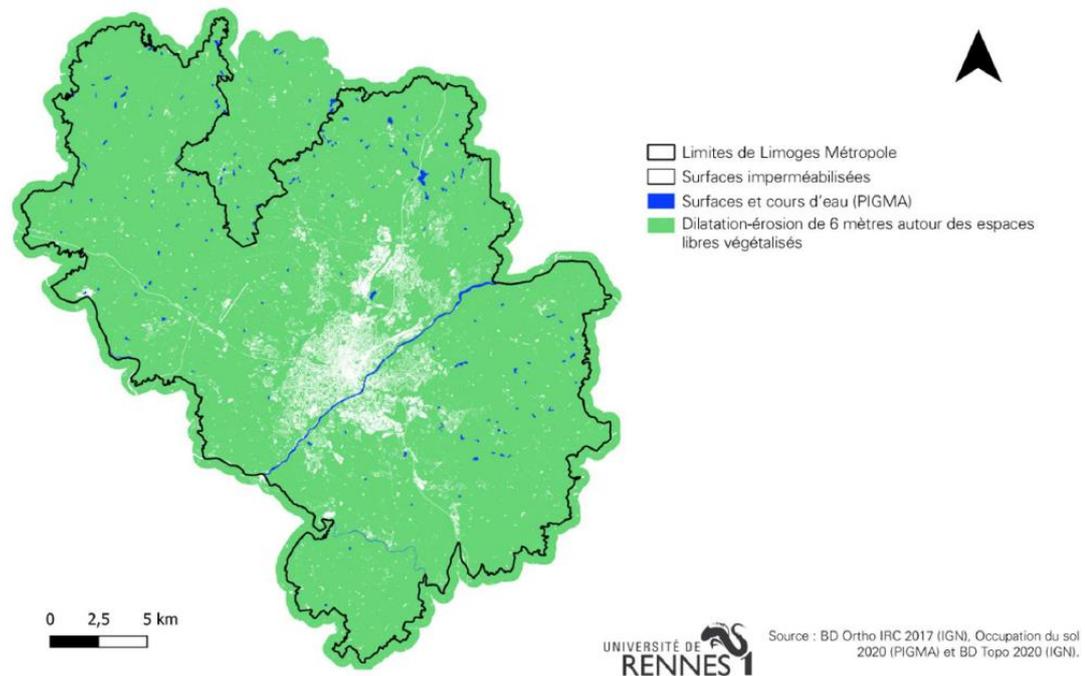


Illustration 14. Évolution des espaces libres végétalisés après dilatation-érosion de 6 mètres (soit une augmentation de 3% des espaces libres végétalisés, correspondant à la création de surfaces permettant la connexion entre espaces libres végétalisés (cf. Figure 11c)).

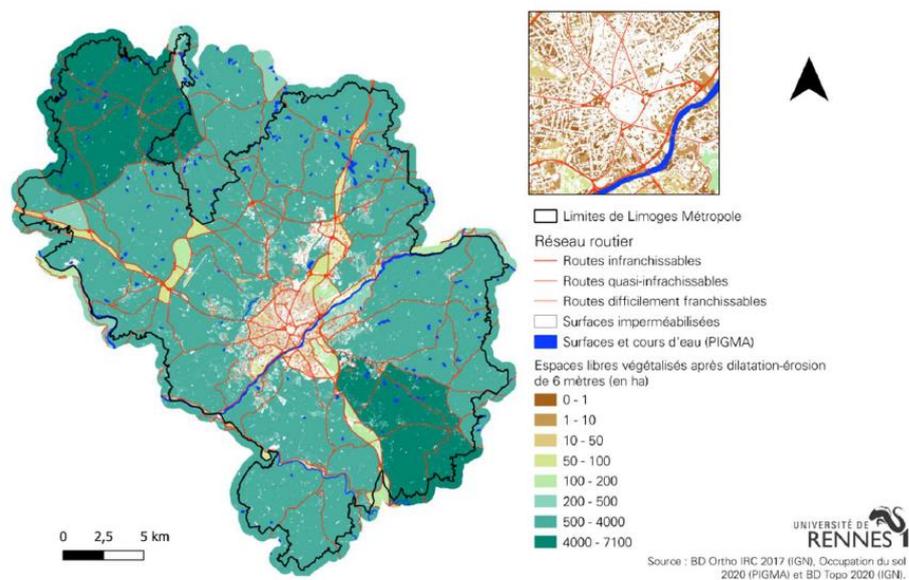


Illustration 15. Interconnexion et isolement au sein de Limoges Métropole, après la prise en compte les éléments fragmentants (routes, voies ferrées, bâti, murets).

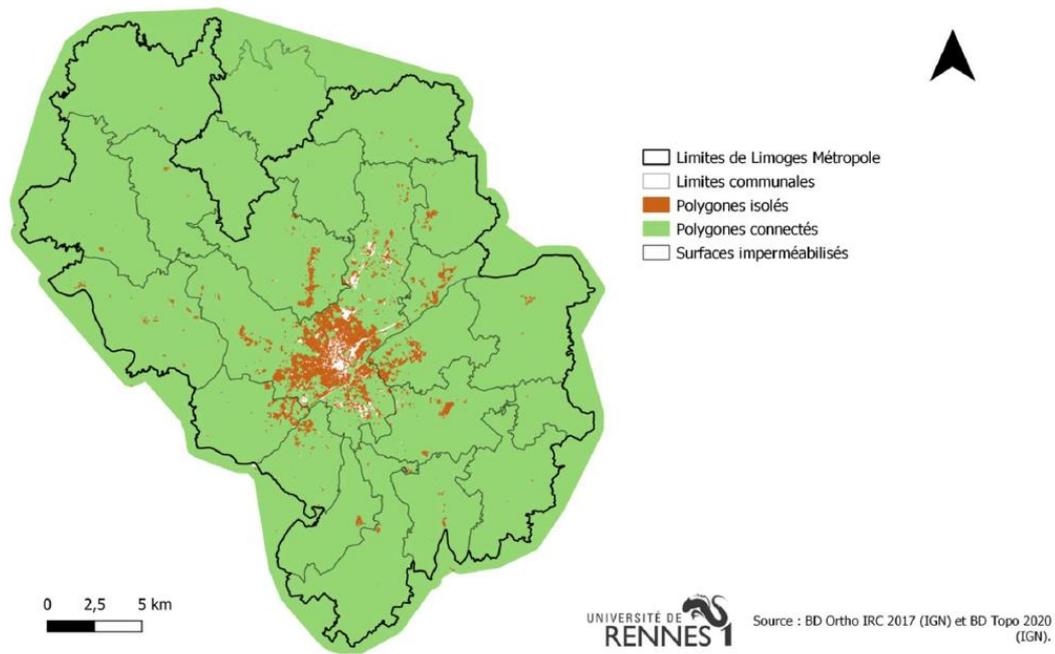


Illustration 17. Simplification des espaces connectés et isolés pour Limoges Métropole. (La surface totale des polygones isolés est de 658 ha, soit une augmentation de 117 ha par rapport aux espaces végétalisés de – de 1ha. Cela correspond à 1% de la surface de Limoges Métropole et sa zone tampon de 500m).

	Diplôme : Ingénieur en paysage Spécialité : Paysage Spécialisation / option : Projet de Paysage, Site et Territoire Enseignant référent : Jean-Pierre DUCOS
Auteur(s) : Alice LAPEYRE	Organisme d'accueil : Even Conseil
Date de naissance* : 09/08/2000	Adresse : 18 Rue de Rennes 49000 ANGERS
Nb pages : 41 Annexe(s) : 2	
Année de soutenance : 2024	Maître de stage : Yoann FIASCHI
Titre français : Entre fonctionnalité et usages : quelles possibilités de prise en compte des sols dans les documents de planification avec le ZAN comme levier ?	
Titre anglais : Between functionality and use: how can soil be taken into account in planning documents using ZAN as a lever?	
Résumé (1600 caractères maximum) : Ce mémoire explore l'intégration des sols dans les documents de planification territoriale, en se concentrant sur le concept de Zéro Artificialisation Nette (ZAN). Les sols, malgré leur rôle fondamental dans la régulation des écosystèmes, la séquestration du carbone, la gestion des eaux, et le maintien de la biodiversité, demeurent insuffisamment valorisés dans les processus de planification. À travers une analyse critique des politiques actuelles, ce travail met en lumière l'importance des sols comme ressources vitales pour le bon fonctionnement des territoires et leur résilience face aux défis climatiques. La trame brune, une approche novatrice inspirée des trames verte et bleue, est présentée comme un cadre stratégique pour intégrer ces enjeux dans l'aménagement du territoire. Toutefois, des obstacles techniques, économiques et législatifs persistent, rendant cette intégration difficile à large échelle. Le mémoire plaide ainsi pour une reconnaissance accrue des sols dans la planification urbaine, soulignant que cette prise en compte est essentielle pour concevoir des territoires durables, résilients, et respectueux des écosystèmes.	
Abstract (1600 caractères maximum) : This thesis explores the integration of soils into territorial planning documents, focusing on the concept of Net Zero Artificialisation (NZA). Despite their fundamental role in regulating ecosystems, sequestering carbon, managing water and maintaining biodiversity, soils remain insufficiently valued in planning processes. Through a critical analysis of current policies, this work highlights the importance of soil as a vital resource for the proper functioning of territories and their resilience in the face of climate challenges. The brown grid, an innovative approach inspired by the green and blue grids, is presented as a strategic framework for integrating these issues into regional planning. However, technical, economic and legislative obstacles persist, making this integration difficult on a large scale. The report argues for greater recognition of soil in urban planning, stressing that it is essential to take this into account if we are to design territories that are sustainable, resilient and respectful of ecosystems.	
Mots-clés : sol, document de planification, multifonctionnalité, trame brune, gestion durable, ZAN	
Key words : soil, planning document, multifunctionality, brown grid, sustainable management, ZAN	

* Élément qui permet d'enregistrer les notices auteurs dans le catalogue des bibliothèques universitaires