

JEANNE MARÉCHAL, XAVIER MARIÉ,  
DANIEL CLUZEAU, ETIENNE LÉNACK,  
MAYLIS DESROUSSEUX

# TRAM'BIOSOL



# **TRAM'BIOSOL**

---

**INTÉGRATION DE LA TRAME BRUNE  
DES SOLS DANS LES PROGRAMMES  
D'AMÉNAGEMENT URBAIN**

**JEANNE MARÉCHAL  
XAVIER MARIÉ  
DANIEL CLUZEAU  
ETIENNE LÉNACK  
MAYLIS DESROUSSEAUX**

Plan Urbanisme Construction Architecture  
Ministère de l'Aménagement du Territoire  
Ministère de la Transition écologique  
Arche Sud - 92055 La Défense cedex  
[www.urbanisme-puca.gouv.fr](http://www.urbanisme-puca.gouv.fr)

**Directeur de la publication**

François Ménard, secrétaire permanent par intérim du PUCA

**Responsable de l'action**

Sophie Carré, chargée de projets de recherche

**Coordination éditoriale et mise en page**

Bénédicte Bercovici, chargée de valorisation

ISBN : 978-2-11-139344-8

Photos : couverture : © Terra

p. 118 : © Bénédicte Bercovici, PUCA

Mars 2025

# SOMMAIRE

---

<b>AVANT-PROPOS</b>	<b>05</b>
<b>INTRODUCTION</b>	<b>10</b>
<b>CADRE CONCEPTUEL DE LA TRAME BRUNE URBAINE</b>	<b>14</b>
<b>DÉMARCHE MÉTHODOLOGIQUE DE CARACTÉRISATION DE LA TRAME BRUNE URBAINE : ÉTUDE DE CAS SUR LA COMMUNE DE PALAISEAU (91)</b>	<b>30</b>
<b>DÉMARCHE MÉTHODOLOGIQUE D'INTÉGRATION DE LA TRAME BRUNE DANS LES PROCESSUS D'AMÉNAGEMENT URBAIN</b>	<b>70</b>
<b>CONCLUSION ET PERSPECTIVES</b>	<b>92</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE</b>	<b>100</b>
<b>ANNEXES</b>	<b>105</b>
<b>CONSEIL SCIENTIFIQUE DU PROGRAMME BAUM</b>	<b>114</b>

# AVANT-PROPOS

---

## Plan Urbanisme Construction Architecture

Dans son programme partenarial pluri-annuel 2018-2022, le PUCA a ouvert un chapitre « résilience », et dessiné ainsi, pour les années à venir, les perspectives de partenariats avec les représentants des sciences du vivant, dans la recherche de réponses aux questions pressantes que posent à nos sociétés, l'adaptation au changement climatique, la préservation de la biodiversité, l'usage mesuré des ressources planétaires.

Le programme BAUM est né en 2018 dans le sillage du programme de recherche « Vers des politiques publiques de densification et d'intensification douces ? Intérêts, limites et opportunités », lancé en 2013 par le PUCA ; ce programme s'inscrivait lui-même dans la continuité de travaux de recherche précédents, autour des thèmes de la densification, la ville dense, ou encore la densité dans le périurbain.

BAUM est apparu alors qu'on ne pouvait plus ignorer le vivant, dans nos villes et dans nos politiques publiques de densification. La loi pour la reconquête de la biodiversité, de la nature et des paysages, adoptée en 2016, nous obligeait ; mais surtout, elle se faisait le reflet d'une prise de conscience collective des voies alternatives à rechercher, dans les projets de densification urbaine, avec l'aide des écologues, si mal connus des acteurs de l'aménagement.

Que soit ici remerciée en particulier Hélène Peskine, secrétaire permanente du PUCA de mai 2017 à septembre 2024, à l'initiative du programme BAUM, pour sa clairvoyance et son soutien dans la réalisation et la valorisation de celui-ci.

Des partenaires enthousiastes très vite rejoignent le PUCA. Le Muséum national d'histoire naturelle, (MNHN), avec en particulier Philippe Clergeau, écologue, professeur émérite, directeur scientifique du programme BAUM, et l'un des premiers en France à avoir interrogé la place de la biodiversité en milieu urbain ; le MNHN accueillera chaque année jusqu'en 2023 une rencontre BAUM acteurs-chercheurs, dans le Grand amphithéâtre du Muséum, qui nous permettra de partager les avancées des recherches avec un public élargi. La Fondation pour la recherche sur la biodiversité (FRB), accueille spontanément, dès 2019, dans le cadre d'un

post-doctorat de 10 mois, Morgane Flégeau, docteure en géographie et aménagement, pour la réalisation d'une revue de la littérature scientifique consacrée aux liens entre formes urbaines et biodiversité, à l'échelle du quartier, dans les villes occidentales. Des résultats de celle-ci, objet d'une publication du PUCA<sup>1</sup>, nous tirerons des enseignements indispensables à la poursuite du programme, et le premier d'entre eux : les chercheurs, écologues et urbanistes, géographes, architectes ou sociologues, sont très peu nombreux à collaborer, et se comprennent mal car ils utilisent des outils de recherche différents. Ainsi, les acteurs de l'aménagement parviennent-ils difficilement à s'emparer des résultats de la recherche en écologie. La Direction générale de l'aménagement du logement et de la nature (DGALN), en charge de la conception des politiques publiques d'aménagement, notre partenaire de tous les instants au Ministère de la transition écologique (MTE), et l'Office français de la biodiversité, agence sous tutelle du MTE, qui voient une opportunité d'encourager la coopération entre les champs disciplinaires de l'écologie et de l'aménagement du territoire, soutiendront le programme BAUM, initié par le PUCA. Enfin, un comité scientifique du programme réunit 18 représentants de la recherche, ou d'institutions en charge de l'animation des politiques publiques, dans les champs disciplinaires de l'écologie et de l'aménagement du territoire, sous la présidence de Philippe Clergeau.

À l'appel à projets de recherche lancé en février 2020 par le PUCA, répondent quarante-cinq équipes, associant chercheurs et acteurs de l'aménagement, dans les champs disciplinaires de l'écologie et de l'aménagement du territoire. Le territoire national entier est représenté.

Six recherches sont sélectionnées pour être soutenues par le PUCA et ses partenaires, l'OFB et la DGALN, et débutent à l'automne 2020 :

- **MORPHBIOT** (Formes urbaines et MORPHologie végétales en ville pour la BIOdiversité : le cas de la ville de Toulouse) : pilotée par l'École nationale supérieure d'architecture de Toulouse
- **BIOREV'AIX** (Biodiversité et réseau viaire à Aix-en-Provence) : pilotée par l'Université d'Aix-Marseille
- **REAUMUR** (Réponses Ecologiques Aux Morphologies Urbaines) : pilotée par l'Université de Franche-Comté
- **EVOLVILLE** (L'évolution s'invite en ville) : pilotée par le Centre national de la recherche scientifique et l'Université de Strasbourg

---

1 *Formes urbaines et biodiversité - Un état des connaissances*, Réflexions en partage, PUCA, 2020 <https://www.urbanisme-puca.gouv.fr/formes-urbaines-et-biodiversite-un-etat-des-a2156.html>

- **FRUGACITÉ** (FoRmes Urbaines des quartiers de GARE ou à fortes contraintes et biodiversITÉ) : pilotée par la société AREP, filiale de SNCF Gares & Connexions
- **TRAM'BIOSOL** (Intégration de la Trame brune et de la biodiversité lombricienne des sols dans les programmes d'aménagement urbain) : pilotée par le bureau d'études Sol Paysage (SA).

A l'automne 2023, après que les équipes ont pu confronter leurs premiers résultats, et soumettre ceux-ci à l'appréciation de leurs pairs et du public dans le cadre des rencontres BAUM acteurs-chercheurs, à l'issue d'un appel à candidatures, François-Marie Martin, géographe, docteur en écologie, est missionné par le PUCA pour réaliser, au sein du laboratoire THEMA de l'Université de Franche-Comté, une synthèse des outils descripteurs de la forme urbaine déployés dans les six recherches du programme et proposer un référentiel à destination des acteurs de l'aménagement.

Aujourd'hui, les sept recherches du programme BAUM sont achevées ou en voie de l'être. Les rapports de recherche font l'objet d'une publication par le PUCA dans une collection destinée à favoriser la diffusion des enseignements de ce programme auprès d'un public averti. Nous avons le plaisir de vous présenter ici le troisième cahier.

Le PUCA remercie chaleureusement tous les partenaires du programme, institutionnels, chercheurs, partenaires du conseil scientifique et du comité de pilotage, intervenants invités des rencontres acteurs-chercheurs, et aussi le public fidèle du programme BAUM, tous compagnons de route durant les six ans de cette aventure.

Sophie Carré,  
Chargée de programmes de recherche,  
responsable du programme BAUM

## Équipe projet :

- Sol Paysage (porteur du projet)

Jeanne Maréchal - Ingénieure-docteure, cheffe de projets R&D

Xavier Marié -Ingénieur paysagiste-urbaniste, gérant de Sol Paysage

- Université de Rennes 1- UMR CNRS ECOBIO (partenaire)

Daniel Cluzeau - Enseignant-chercheur

- Agence Lambert-Lénack (partenaire)

Etienne Lénack - Architecte

- École d'urbanisme de Paris – Lab'urba (partenaire)

Maylis Desrousseaux - Maîtresse de conférences

## Contributeurs :

- Stagiaires Sol Paysage/Université de Rennes 1.

Suzanne Nourry - Stage M2 AETPF AgroParisTech Parcours Gestion des Sols et Services Ecosystémiques. « Caractérisation de sols urbains et définition d'un gradient d'artificialisation pour l'étude de la Trame Brune ». Février-Août 2021.

Adam Derder - Stage M2 BEE Université Paris-Saclay Parcours Ecologie de la Conservation. « Evaluation de la capacité des espaces verts urbains en Ile-de-France à assurer un rôle de réservoir de biodiversité pour les communautés lombriciennes ». Février-Août 2021.

Mathilde Huet - Stage M1 BEE Université de Rennes 1 Parcours Stratégie de Développement. « Isolement et naturalité selon les formes urbaines des quartiers de la commune de Palaiseau ». Mai-Juillet 2021.

- Stagiaire Agence Lambert-Lénack

Kevin Lledo - Stage de formation pratique de Master de l'Ecole Nationale d'Architecture Paris-Val de Seine. « TRAM'BIOSOL. Intégration de la Trame Brune et de la biodiversité lombricienne dans les programmes d'aménagement urbain ». Février-Mai 2021.

- Etudiants du CNAM

Pierre Caffiaux, Clément Nirlo, Léa Picard - Projet pré-professionnel - Ecole Supérieure d'Ingénieurs Géomètres et Topographes. « Préservation d'une Trame Brune à l'échelle d'un projet d'aménagement : quelle stratégie foncière opérer ? ». Octobre 2022-Janvier 2023.

- Groupe de travail « planification » du séminaire n°2 (21-22 juin 2023)

Equipe projet

Gil Melin - Maire adjoint, Ris-Orangis

Léa Assouline - Urbaniste, Saint-Quentin-en-Yvelines

Frédéric Ségur - Ingénieur paysagiste, Arbre, Ville & Paysage

Philippe Branchu - Ingénieur de recherche Sol-Eau, Cerema

# INTRODUCTION

---

Les sols sont, à l'échelle planétaire, l'un des plus importants réservoirs de biodiversité, représentant 25 à 30% de la biodiversité totale de la Terre [1]. Cette biodiversité des sols en zone tempérée qui ne représente que 0.25% de la masse des sols, est composée de millions d'espèces et de milliards d'individus ; les microorganismes représentant le groupe le plus important (66%) en diversité, abondance et biomasse alors que les espèces invertébrées de la microfaune, mésofaune et macrofaune n'en représentent que 33% [2].

Pourtant considérés comme le fragile épiderme des terres émergées, les sols sont dégradés par les activités humaines et les nombreuses fonctions associées aux sols sont menacées. Ces menaces qui pèsent sur la multifonctionnalité des sols sont de nature variée : érosion, tassement, contamination, perte de matière organique ou salinisation. Elles sont d'autant plus fortes en milieu urbain car les pressions exercées par l'homme y sont considérables, allant jusqu'à la disparition des sols et/ou leur imperméabilisation. En particulier, du fait du développement de notre urbanisation et de nos infrastructures, 25 000 ha de sols sont artificialisés en France chaque année pour répondre à une population aujourd'hui à 80% urbaine [3]. L'artificialisation consiste, par des opérations d'aménagement, à transformer un sol naturel, agricole ou forestier, afin de les affecter notamment à des fonctions d'habitat ou de transport. L'artificialisation engendre ainsi l'altération durable de tout ou partie des fonctions écologiques des sols naturels, le niveau de dégradation des fonctions pouvant varier selon la nature des modifications anthropiques subies par les sols. Ils peuvent être faiblement anthropisés et ne présenter que des impacts superficiels, jusqu'à être totalement détruits, suite à leur excavation.

A l'échelle européenne, l'artificialisation des sols a été reconnue comme une cause majeure de l'érosion de la biodiversité édaphique [1]. Cette dernière subit les conséquences de l'étalement urbain qui engendre la perte de leur habitat et la fragmentation des communautés de par l'isolement des réservoirs de cette biodiversité du sol. L'identification dans les documents de planification territoriale d'une trame écologique dédiée aux sols, la Trame Brune, permettrait de préserver des réservoirs et des corridors pour les espèces vivant continuellement dans le sol et disposant de très faibles capacités de déplacement, tels que les vers de terre. Elle serait complémentaire de la Trame Verte qui concerne principalement des espèces vivant à la surface du sol (invertébrés, oiseaux, grands mammifères, ...). La Trame Brune pourrait constituer un nouvel outil de diagnostic et d'aide à la décision à l'échelle du territoire, et ainsi être un pivot décisif pour une application opérationnelle cohérente des politiques publiques convergeant vers le « Zéro Artificialisation Nette » des

sols en 2050 [4]. Cependant, cette nouvelle trame n'est à l'heure actuelle identifiée dans aucun document de planification, et la manière de l'appréhender reste encore à définir. Ainsi, les objectifs principaux de notre programme TRAM'BIOSOL, lauréat de l'appel à projets BAUM du PUCA, sont (1) d'établir un cadre conceptuel de la Trame Brune, (2) de proposer et de tester une méthode permettant de localiser et de caractériser la Trame Brune afin d'envisager sa protection et sa mise en valeur.



# **CADRE CONCEPTUEL DE LA TRAME BRUNE URBAINE**

---

Le concept de Trame Brune étant encore émergent, l'élaboration d'une définition et l'explicitation des taxons concernés est un préalable nécessaire à l'élaboration d'une méthode d'étude.

## LES DIFFÉRENTS MODÈLES DE LA FAUNE DU SOL POUR L'ÉTUDE DE LA TRAME BRUNE URBAINE

Suite à la Loi Climat et résilience du 22 août 2021, l'artificialisation des sols est désormais définie dans l'article L.101-2-1 du Code de l'urbanisme 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 ». La réalisation des fonctions du sol est en grande partie assurée par la biodiversité du sol, grâce à des interactions complexes, trophiques et non trophiques, entre les composantes biotiques et abiotiques du sol (Figure 1).

Figure 1 - Contribution des organismes du sol aux fonctions et services écosystémiques

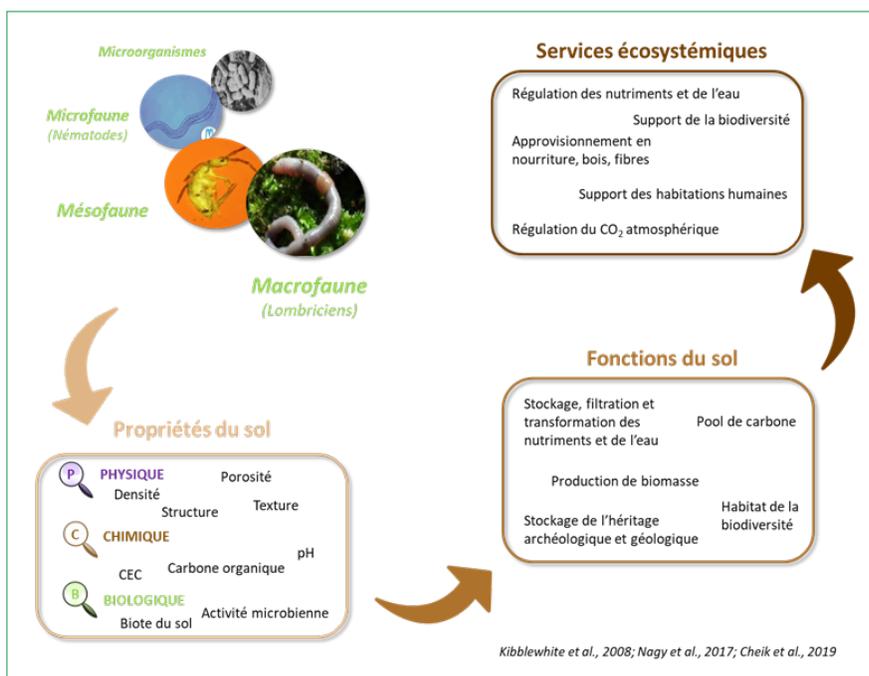
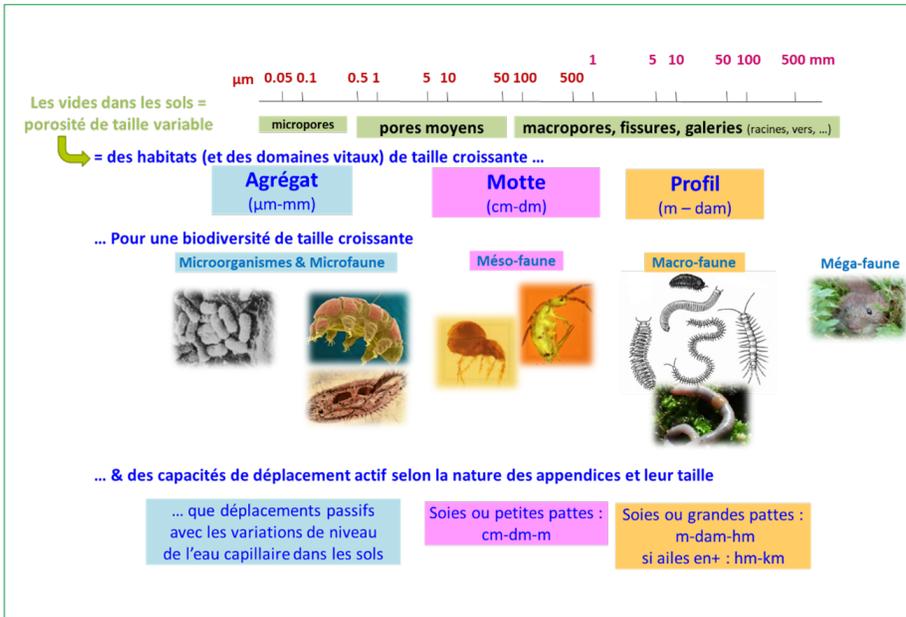


Figure 2 - Classes d'organismes du sol selon leur taille (modifié d'après Swift et al., 1979)



Toute cette faune invertébrée des sols de taille croissante, colonise tous les espaces poreux de taille croissante (Figure 2), présents dans les sols et le volume de leurs domaines vitaux est conditionné par la taille de ces organismes édaphiques et leurs capacités de déplacements passifs ou/et actifs :

- La **microfaune** (protozoaires et nématodes) se déplace à l'échelle du micromètre-millimètre, dans l'eau hygroscopique entourant les agrégats des sols et en utilisant l'eau capillaire ou de gravitation pour se disperser/migrer entre les différents horizons du profil de sol : la dispersion des nouvelles cohortes de la microfaune se fait par hydrochorie.
- La **mésifaune** (tels que les acariens et les collemboles, les larves d'insectes, ...) se déplace activement à l'échelle du centimètre-décimètre, dans la porosité existante associée aux mésopores du sol et aussi passivement, en utilisant l'eau capillaire ou de gravitation pour se déplacer entre les différents horizons du profil de sol (là aussi, ce sont des taxons hydrochores) ; pour les espèces épigées vivant dans l'horizon organique

de surface, elles peuvent utiliser le vent pour se disperser (anémochorie). Les espèces vertébrées peuvent passivement contribuer à la dispersion de la faune du sol (zoochorie) en transportant des œufs ou des individus sur des distances +/- grandes.

- La **macrofaune** des sols se déplace activement dans les sols, à des échelles du mètre au décamètre, en créant leur propre macroporosité : on distingue (i) les mineurs qui creusent leur chemin avec leurs mandibules ou leurs dents transportant la terre à l'extérieur (fourmis, termites) ou la repoussant derrière eux (larves de coléoptères), et (ii) les tunneliers qui forent des galeries, soit en forçant le passage en profitant d'une porosité déjà existante (diplopode, lombriciens anéciques), soit en consommant la terre (géophages) et en la rejetant sous forme de déjection (lombriciens endogés).

Cependant, certains macro-organismes du sol possèdent des appendices arthropodiques bien développés et à l'état/stade adulte, des ailes, leurs permettant des déplacements actifs dans les sols et à la surface de ceux-ci, sur des distances allant jusqu'à plusieurs centaines de mètres à des kilomètres en utilisant les trames écologiques vertes et bleues présentes dans le paysage concerné.

A l'inverse, les **espèces géobiontes**, qui vivent continuellement dans le sol sans jamais pouvoir le quitter, ont de très faibles moyens propres de déplacement (appendices arthropodiques absents ou très réduits et absence d'ailes lors du stade adulte) comme pour la macrofaune, les lombriciens et les gastéropodes principalement ; d'autres macro-arthropodes géobiontes comme plusieurs espèces de myriapodes et d'isopodes, sont capables de déplacements plus conséquents, tout en ayant besoin d'une continuité des sols pour assurer leur dispersion.

**Ainsi est apparue la notion de Trame Brune qui désigne principalement les trames écologiques au sein de la pédosphère, et qui, au même titre que la Trame Verte et Bleue, se compose de réservoirs et de corridors pédologiques qui permettent d'assurer la continuité écologique pour cette biodiversité des sols.**

En synthèse, parmi les taxons de la faune invertébrée du sol utilisateurs potentiels de la Trame Brune, nous proposons une liste des taxons, qui, aux vues de leurs capacités de déplacement actif, sont (1-en rouge) contraints d'utiliser que la Trame Brune ou peu (2-en marron) ou pas (3-en vert) contraints par la Trame Brune car capables d'utiliser la Trame Verte (Figure 3).

Figure 3 - Liste des taxons contraints ou peu contraints d'utiliser la Trame Brune

Classification fonctionnelle		Capacités de déplacement actif	Taxons concernés
Mésofaune	Géobionte Taxons utilisateurs contraints de la TBr	Soies	Enchytréides
		Petites pattes	Collemboles, Acariens
Macrofaune	Géophiles actifs Taxons peu contraints par la TBr (capacité d'utiliser la TVB)	Soies	Lombriciens
		Sole de reptation (pied)	Escargot & limace
		Pattes moyennes	Cloportes
		Pattes moyennes à longues	Myriapodes
		Pattes (& ailes)	Fourmis
		Pattes (& ailes)	Blattidae
		Pattes (& ailes) (peu fonctionnelles)	Carabidae
		Pattes (& ailes)	Staphylins
Pattes (& ailes)	Coccinellidae, Dermaptère		
Pattes (& ailes)	Elatерidae, Curculionidae		
Pattes (& ailes)	Scarabaeidae		

Parmi les géobiontes de la macrofaune, **les lombriciens sont le seul taxon incapable de franchir un obstacle vertical tel un muret** ; les autres taxons de la macrofaune possèdent soit une sole de reptation (le pied des escargots), soit des pattes articulées seules (Cloportes, Myriapodes, ...), soit des pattes et des ailes (au moins lors du stade adulte des autres taxons Arthropodes) leur permettant de franchir des obstacles verticaux.

**Ainsi, cette Trame Brune concerne surtout les espèces vivant continuellement dans le sol (géobiontes) et qui ont de très faibles moyens propres de déplacement (appendices arthropodiques absents ou très réduits & absence d'ailes lors du stade adulte) comme les lombriciens.**

## LE VER DE TERRE COMME TAXON CIBLE DE LA TRAME BRUNE URBAINE

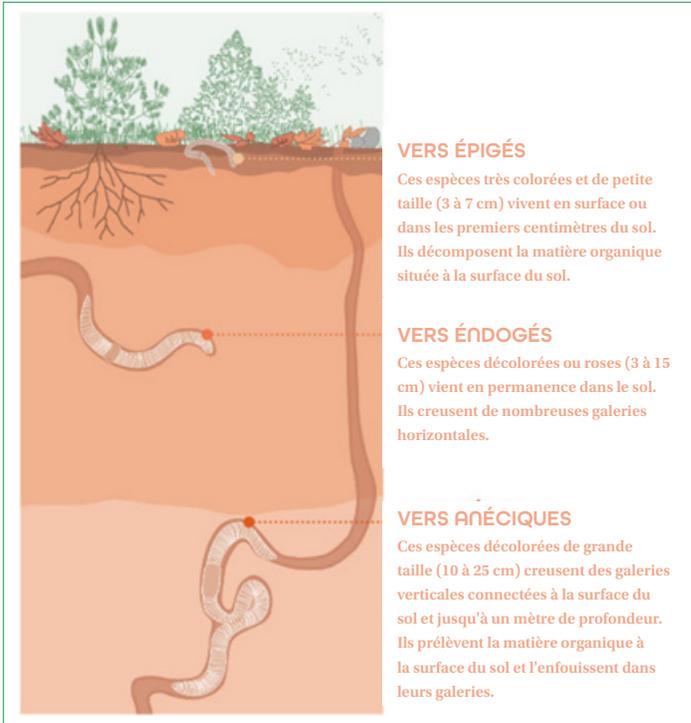
Les lombriciens sont classés parmi les **ingénieurs de l'écosystème sol** qui participent aux fonctions clés du sol (régulation hydrique, dynamique des nutriments, production végétale primaire...) et aux services écosystémiques associés (1) de supports (formation des sols, recyclage), (2) d'approvisionnement en nourriture et en fibres et (3) de régulation (détoxification et épuration des eaux et des sols, ...) ; ils sont de facto un des principaux piliers dans la transition (agro-)écologique appliquée à la gestion de tous les sols agricoles et urbains de par leurs impacts sur les sols (Figure 4) :

- Ils conditionnent les activités et la distribution :
  - des microorganismes (en les alimentant, les dispersant et les régulant en les consommant ; et en les stimulant en créant les conditions favorables dans des micro-habitats de la drilosphère)
  - des protozoaires bactériophages (en stimulant les microorganismes)
- Ils contribuent à conditionner la structure du sol :
  - par la création de porosités (en favorisant l'aération et la circulation de l'eau dans les sols et permettant les déplacements de la méso-faune et la progression des systèmes racinaires, ...)
  - par la création d'agrégats organo-minéraux (en interaction avec les microorganismes)

Les lombriciens représentent la **1<sup>ère</sup> biomasse animale terrestre en milieu tempéré** et contribuent fortement à la chaîne alimentaire des habitats prairiaux et d'espaces verts urbains : ils sont l'une des ressources trophiques essentielles pour plusieurs espèces d'intérêt, soit économique (bécasse, faisan, sanglier, ...), soit patrimonial avec une haute valeur de conservation (hérisson européen, musaraigne aquatique, chouette chevêche, ...), soit social avec des animaux appréciés de tous les enfants comme les blaireaux . Ainsi, dans le contexte actuel de diminution de la biodiversité, la conservation de fortes diversité et abondance de vers de terre présente un intérêt majeur pour maintenir des réseaux trophiques fonctionnels, répondant aux stratégies de protection pour la biodiversité, aussi bien nationale qu'européenne.

Ils ont été reconnus comme de bons **bioindicateurs d'état/réponse** par différents programmes nationaux et européens car ils répondent aux 4 règles qui définissent un bon indicateur, à savoir, pertinence, fiabilité,

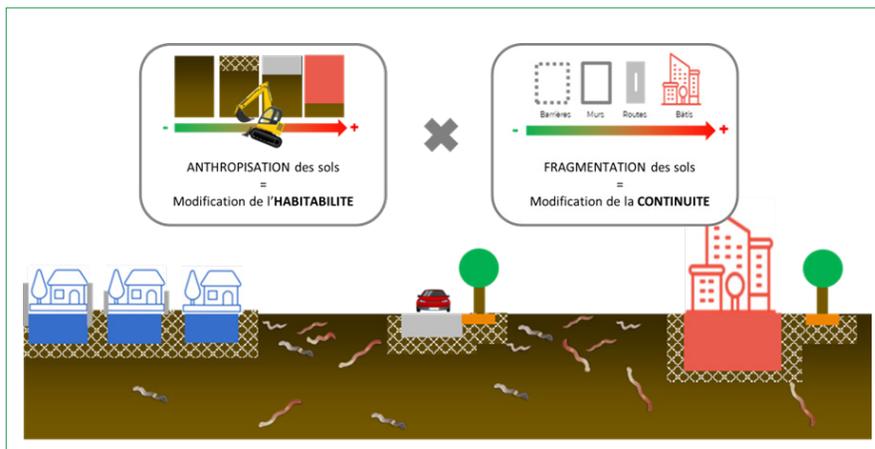
Figure 4 - Description des groupes fonctionnels lombriciens



sensibilité et reproductibilité. En tant qu'indicateur de réponse, ils sont révélateurs des pressions (pollution, pratiques agricoles, qualité de l'eau, espèces envahissantes, ...), des réponses en termes de mesures de gestion (restauration, protection, ...) et les services écologiques qu'ils rendent peuvent être évalués.

Enfin, étant familiers à un large public, les lombriciens pourraient constituer des **espèces emblématiques des sols**, susceptibles de mobiliser un large public autour de leur préservation. En effet, ils constituent aussi un bon **outil pédagogique** (simple, accessible/visible, connu dans la culture générale comme repoussant car gluant et serpentiforme mais aussi comme attirant par ses « bienfaits sur les sols », suscitant ainsi la curiosité), pour sensibiliser à la biodiversité des sols (« sol vivant ») tous les publics en même temps que les réseaux-métiers non liés à la biodiversité (enjeux sociétaux liés à l'agriculture, gestion de l'eau en ville, aires récréatives et jardins, habitats naturels, génie civil, ...).

Figure 5 - Illustration des concepts d'habitabilité (impactée par l'anthropisation) et de continuité (impactée par la fragmentation)



## LES FACTEURS CONDITIONNANT LA TRAME BRUNE URBAINE

Certaines caractéristiques de la Trame Brune vont conditionner les communautés lombriciennes, en particulier l'habitabilité et la continuité des sols, susceptibles d'être respectivement impactées par l'anthropisation et la fragmentation des sols (Figure 5).

### Habitabilité des sols

Les conditions d'*habitabilité* des sols des espaces non-bâties qualifient les capacités intrinsèques des réservoirs à assurer le cycle de vie complet des différentes espèces lombriciennes. Ces conditions sont dépendantes des *propriétés physico-chimiques des sols*, ces dernières pouvant être modifiées par l'urbanisation impliquant entre autres des changements d'occupation de sol, de formes urbaines, ou encore de couverture de sol.

L'**habitabilité réelle** des sols peut être évaluée de manière directe par la caractérisation des communautés lombriciennes qui constituent des bioindicateurs reconnus (cf. Le ver de terre comme taxon cible de la trame brune urbaine). Une évaluation de l'**habitabilité potentielle** des sols serait pertinente en phase de pré-diagnostic pour localiser des réservoirs potentiels (en vue de la caractérisation d'une zone d'étude ou de l'élaboration d'un plan d'échantillonnage lombricien, ...), ou à défaut de données

lombriciennes disponibles (contraintes de saisonnalité, de coût, de main d'œuvre...) : Cette évaluation se fait à partir de la connaissance des **principales caractéristiques pédologiques influençant les communautés lombriciennes** [5,6] : (i) **l'épaisseur**, (ii) **le pH**, (iii) **la texture**, et (iiii) **la teneur en matière organique**. Ces caractéristiques peuvent être estimées sur le terrain (cf. 2.3.1.2, description d'un sondage pédologique) mais il est conseillé de les compléter avec des analyses normées en laboratoire pour obtenir des données quantitatives précises relatives à chaque habitat prélevé (hormis l'épaisseur du sol, déterminée uniquement sur le terrain). Des caractéristiques secondaires peuvent également être prises en compte sur le terrain : (v) l'hydromorphie, (vi) la couverture du sol, (vii) l'état de surface, (viii) l'épaisseur de l'horizon organo-minéral.

### **Calculer un indice d'habitabilité pour les vers de terre**

L'élaboration d'un indice d'**habitabilité potentielle** du sol pour les vers de terre peut être utile à la pré-localisation de réservoirs de biodiversité lombricienne. A chaque valeur de paramètre du sol, estimée sur le terrain ou mesurée en laboratoire, est associée une note de 0 à 3, plus ou moins favorable aux vers de terre : 0 = peu favorable ; 1 = moyennement favorable ; 2 = favorable ; 3 = très favorable (Tableau 1).

Tableau 1 - Notes d'habitabilité par paramètre physico-chimique

<b>Epaisseur du sol (cm)</b>	<b>Note habitabilité</b>
[0 - 20[	0
[20 - 40[	1
[40 - 60[	2
> 60	3
<b>pH</b>	<b>Note habitabilité</b>
[3,5 - 4,5[	0
[4,5 - 5,5[	1
[5,5 - 6,5[	2
>6,5	3
<b>Texture</b>	<b>Note habitabilité</b>
Sableuse majoritaire	0
Argileuse majoritaire	1
Limoneuse majoritaire	2
Limoneuse très majoritaire	3
<b>% Matière organique</b>	<b>Note habitabilité</b>
< 1	0
[1 - 4[	1
[4 - 10[	2
> 10	3

**La moyenne de ces notes correspond à l'indice d'habitabilité**, indiquant pour les valeurs comprises entre 0 et 0.5 une habitabilité très faible, jusqu'à une habitabilité très élevée pour les valeurs >2.5. Ces indices moyens peuvent être interprétés seuls et traduiront ainsi une **habitabilité potentielle**. Ils pourront être confrontés aux communautés lombriciennes réellement observées sur le terrain, dont les valeurs d'abondance et de richesse traduiront une habitabilité **réelle**.

Indice d'habitabilité moyen	Interprétation
[0 ; 0,5[	Habitabilité très faible
[0,5 ; 1,5[	Habitabilité médiocre
[1,5 ; 2,5[	Habitabilité élevée
>2,5	Habitabilité très élevée

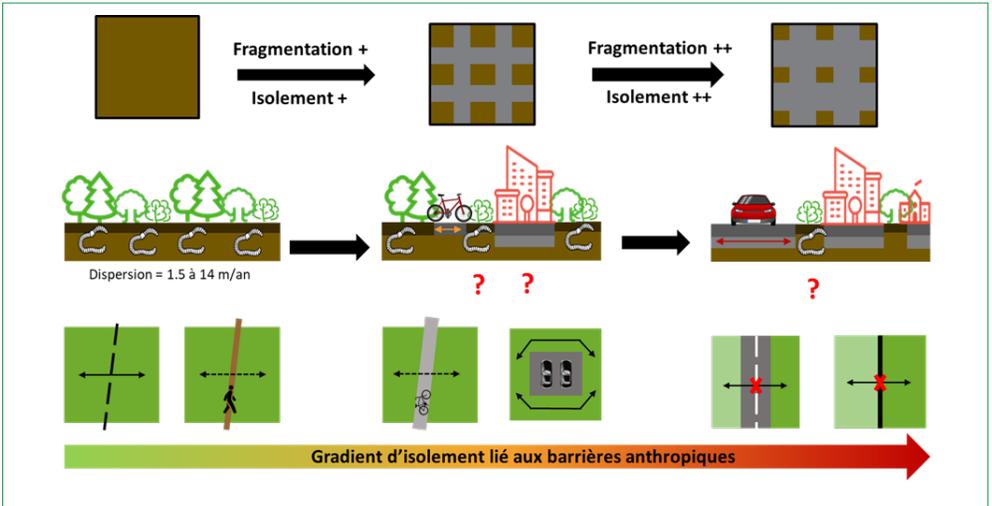
Compte-tenu de la diversité des sols naturels, certains seront intrinsèquement plus favorables à l'habitabilité des lombriciens. En milieu urbain, l'habitabilité des sols est potentiellement dégradée ou améliorée par le phénomène d'anthropisation dû aux modifications induites par des perturbations d'origine anthropique (e.g., décapage, compactage, chaulage, fertilisation). L'habitabilité et l'**anthropisation** des sols ne sont en effet pas corrélées : les modifications des propriétés physiques, chimiques et biologiques subies par les sols du fait d'actions anthropiques peuvent être involontaires et le plus souvent, en dégradant l'habitabilité (e.g., sédimentation de remblais du fait de successions d'usages), ou être volontaires pour améliorer l'habitabilité (e.g., reconstitution de sols fertiles profonds en contexte de végétalisation).

### Continuité des sols

**Les conditions de continuité des sols urbains qualifient leur fonctionnalité de corridors pour les lombriciens. Ces conditions sont dépendantes du degré de franchissabilité des barrières anthropiques, qui définit le degré d'isolement de ces habitats.**

En effet, l'artificialisation engendre la fragmentation du paysage urbain par des infrastructures anthropiques telles que des routes qui séparent les habitats en plusieurs éléments, altérant ainsi les continuités écologiques (Figure 6). Les continuités écologiques correspondent au degré selon lequel le paysage facilite ou altère le déplacement des individus d'un habitat à un autre. Ainsi, pour des espèces à faibles capacités de déplacement

Figure 6 - Illustration de la fragmentation du paysage urbain et de la diversité des barrières anthropiques



telles que les lombriciens, les infrastructures anthropiques constituent autant de barrières à leur dispersion active (i.e., par leurs propres moyens). Elles peuvent engendrer soit une perte d'habitat soit une coupure, dont le degré de franchissabilité par les lombriciens n'est pas quantifié à l'heure actuelle (Figure 7 ; figure 8).

Figure 7 - Diversité de degrés d'isolement spatial pour qualifier la Trame Brune

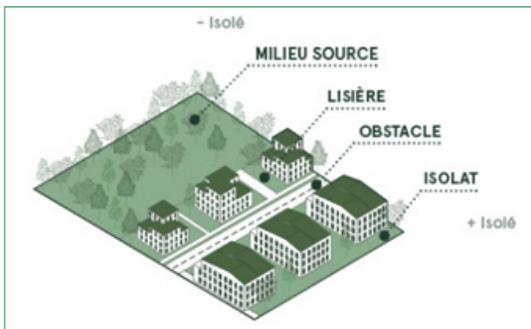


Figure 8 - Diversité de barrières anthropiques définissant des corridors pédologiques



Aujourd'hui, pour les lombriciens, les prairies et pelouses permanentes, fauchées ou pâturées, représentent les zones réservoirs les plus favorables. **La dispersion active des lombrics communs est estimée à 1.5 à 14 mètres par an environ** [7]. Cette faune lombricienne doit pouvoir assurer des échanges de gènes entre les populations présentes dans divers **réservoirs et corridors de la Trame Brune** à des échelles spatiales plus fines (arrondissement / quartier / bloc de maisons / immeubles), que celles de la Trame Verte (région / département / commune).

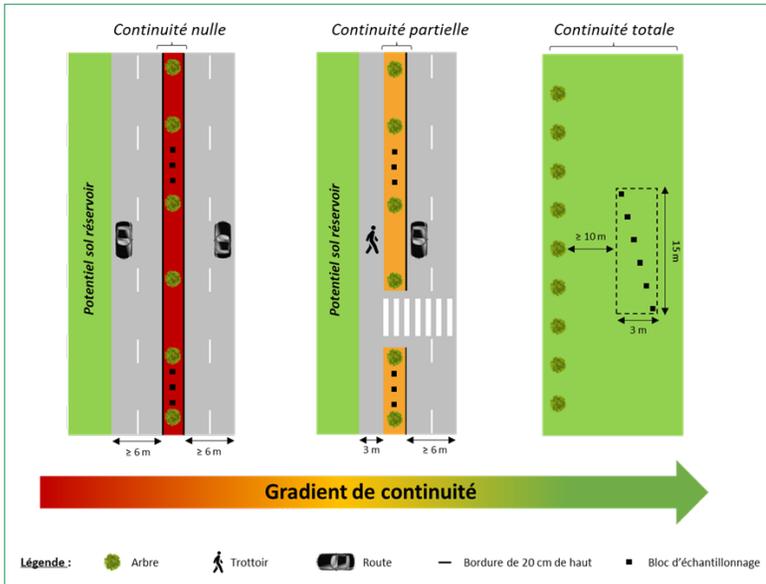
Il y a par ailleurs dans l'expression « Trame Brune » une notion essentielle de connectivité. Les espèces présentes dans le sol ont, comme toutes les autres, des besoins de déplacement pour accomplir leur cycle de vie, se reproduire, échapper à des changements ponctuels dans leur environnement, recoloniser un milieu après un épisode de mortalité, etc. Notamment, plus les populations sont isolées, plus elles sont vulnérables (perte de diversité génétique, risque de disparition locale, ...). Cependant, la qualification des réservoirs et des corridors composant la Trame Brune est mal définie en milieu urbain pour les lombriciens, de même que l'impact des barrières anthropiques sur leur dispersion.

Dans un modèle théorique, un **indice de continuité** des sols pourrait être établi de façon analogue à l'indice d'habitabilité sur la base de la description de caractéristiques associées aux barrières anthropiques telles que : (1) le type d'obstacle vertical (mur, muret, clôture, ...), (2) la hauteur de l'obstacle vertical, (3) le type d'obstacle horizontal (autoroute, départementale, chemin...), (4) l'usage de l'obstacle horizontal (voitures, vélos, piétons, ...), (5) la largeur de l'obstacle horizontal. Dans la pratique, il apparaît peu efficace de combiner des valeurs associées à chacune de ces caractéristiques du fait de la diversité des barrières pouvant entourer une même parcelle, rendant la valeur d'un indice moyenné peu représentatif de la réalité de terrain. Ainsi, nous distinguerons plus simplement

3 grandes modalités de continuité de sol sur la base des travaux de Maréchal et al. (2021 ; 2022) et décrites dans la Figure 9 :

- Une **continuité nulle** entre 2 réservoirs potentiels (i.e., isolement total) si des barrières anthropiques supposées infranchissables, telles que des routes ou murets, entourent la parcelle.
- Une **continuité partielle** s'il existe, a minima, un côté de la parcelle séparé d'un potentiel réservoir par une barrière franchissable tel qu'un chemin piétonnier ou une piste cyclable inférieure à 6 m de large.
- Une **continuité totale** si la parcelle n'est contrainte par aucune barrière anthropique circumvoisine.

Figure 9 - Degrés de continuité des sols (d'après Maréchal, 2024)



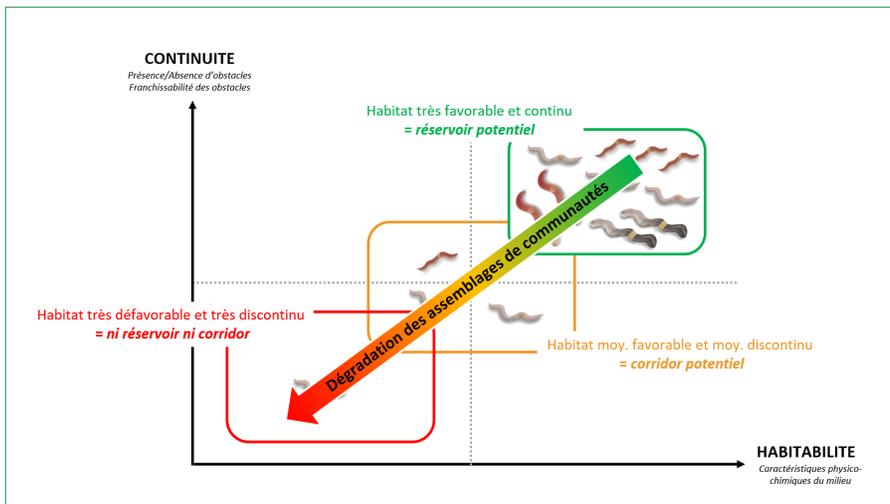
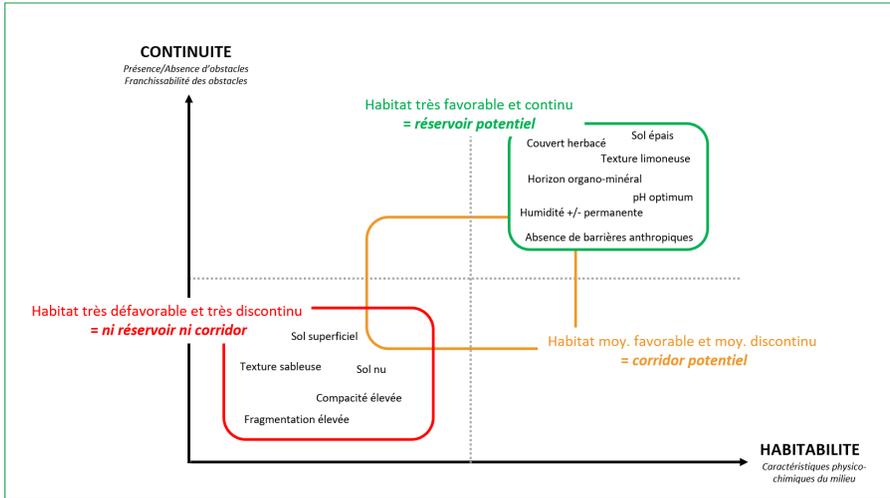
## PROBLÉMATIQUES SCIENTIFIQUES DE L'ÉTUDE TRAM'BIOSOL

En relation aux concepts établis précédemment, plusieurs questions et sous-questions se posent relatives à la Trame Brune urbaine et aux communautés lombriciennes, et méritent d'être testées sur un territoire d'étude :

- Comment les **facteurs urbanistiques** conditionnent-ils les communautés lombriciennes ?
  - Les communautés lombriciennes sont-elles principalement conditionnées par :
    - (1) la couverture du sol ?
    - (2) l'usage du sol ?
    - (3) l'âge d'urbanisation ?
    - (4) les formes urbaines ?
- Comment les **facteurs pédologiques**, modifiés par l'Homme en milieu urbain, conditionnent-ils les communautés lombriciennes ?
  - Les communautés lombriciennes sont-elles principalement conditionnées par :
    - (5) les propriétés physiques et chimiques des sols urbains ?
    - (6) le degré d'anthropisation des sols ?
    - (7) les unités/types de sols urbains ?
- Comment les différents **facteurs conditionnant la Trame Brune urbaine** conditionnent-ils les communautés lombriciennes ?
  - Les communautés lombriciennes sont-elles principalement conditionnées par :
    - (8) le degré d'habitabilité des sols ?
    - (9) le degré de continuité des sols ?

L'hypothèse principale posée est celle d'une dégradation des communautés lombriciennes en relation à une perte d'habitabilité et de continuité (Figure 10). Dans la suite de l'étude, est présentée une démarche méthodologique permettant d'acquérir les données urbanistiques, pédologiques et lombriciennes nécessaires à la caractérisation de la Trame Brune en milieu urbain. L'ensemble des facteurs présentés ci-dessus, impactant potentiellement les communautés lombriciennes, seront testés sur les données lombriciennes acquises sur la zone d'étude.

**Figure 10 - Hypothèse de l'effet de l'interaction habitabilité/continuité des sols sur les communautés lombriciennes**



**DÉMARCHE  
MÉTHODOLOGIQUE DE  
CARACTÉRISATION DE LA  
TRAME BRUNE URBAINE :  
ÉTUDE DE CAS SUR LA  
COMMUNE DE PALAISEAU  
(91)**

---

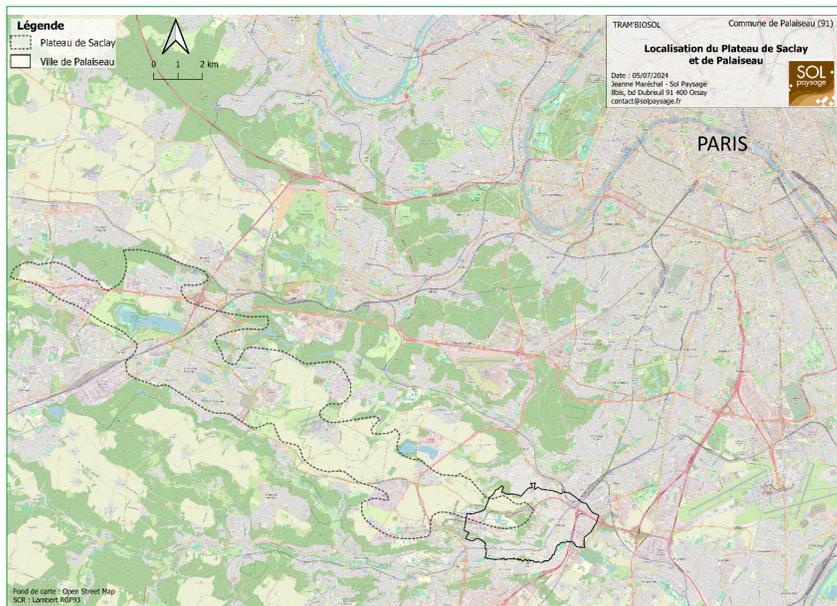
Sur la base de la définition de la Trame Brune établie précédemment, une méthode de localisation et de caractérisation peut être proposée. Elle nécessite (1) la délimitation et la description d'une zone d'étude précise, (2) la collecte de données urbanistiques (pré-diagnostic urbanistique) puis (3) l'acquisition de données de terrain pédologiques et édaphiques (diagnostic pédologique et lombricien).

## PRÉSENTATION DE LA COMMUNE DE PALAISEAU

### Contextes géographique et environnemental

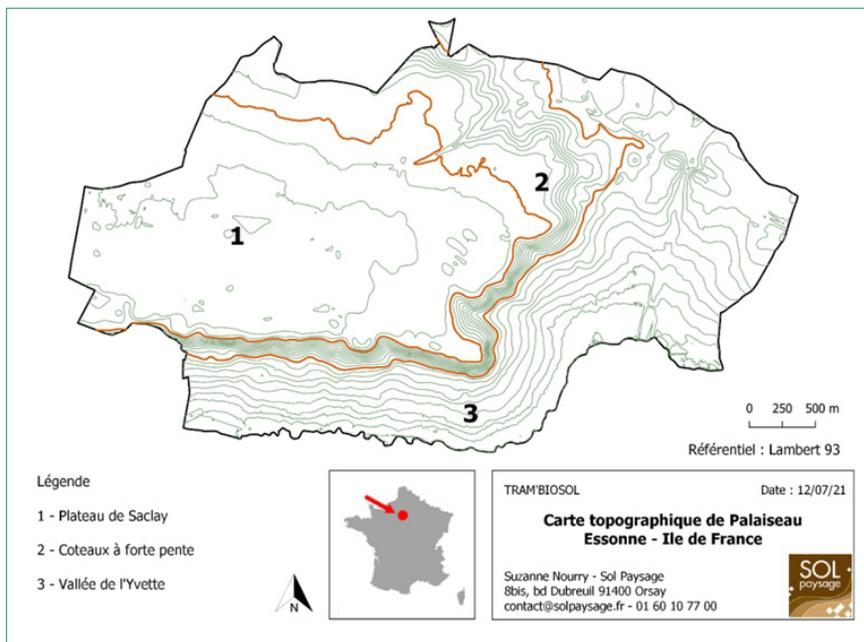
La zone d'étude est située sur le Plateau de Saclay, territoire de 4 114 ha, avec une longue tradition agricole et dont les terres sont parmi les plus fertiles d'Ile-de-France. Il constitue un patrimoine naturel remarquable, dont les différents milieux (étangs, rivières, espaces boisés, parcs et jardins urbains) sont autant d'écosystèmes qui accueillent la faune et la flore franciliennes. Depuis une dizaine d'années, ces terres agricoles et ces espaces naturels sont menacés par le projet d'aménagement du pôle d'enseignement de l'université Paris-Saclay et par la création d'une nouvelle ligne de métro afin de desservir ce futur ensemble.

Figure 11 - Localisation du Plateau de Saclay et de Palaiseau



La ville de Palaiseau, sur laquelle l'étude est menée, est une ville sous-préfecture de 1151 ha du nord du département de l'Essonne (91), à 18 km au Sud-Ouest de Paris, et se trouve en partie sur le Plateau (Figure 11). Elle est traversée par plusieurs rigoles héritées de l'aménagement du système hydraulique du Château de Versailles. La zone d'étude connaît un climat océanique dégradé : sur la période 1991-2021, les températures annuelles moyennes minimale et maximale sont respectivement de 1,4°C et 23,8°C, et les précipitations moyennes annuelles sont de 720 mm [11].

Figure 12 - Carte topographique de la commune de Palaiseau et unités paysagères associées (RGE ALTI-IGN, 2021)

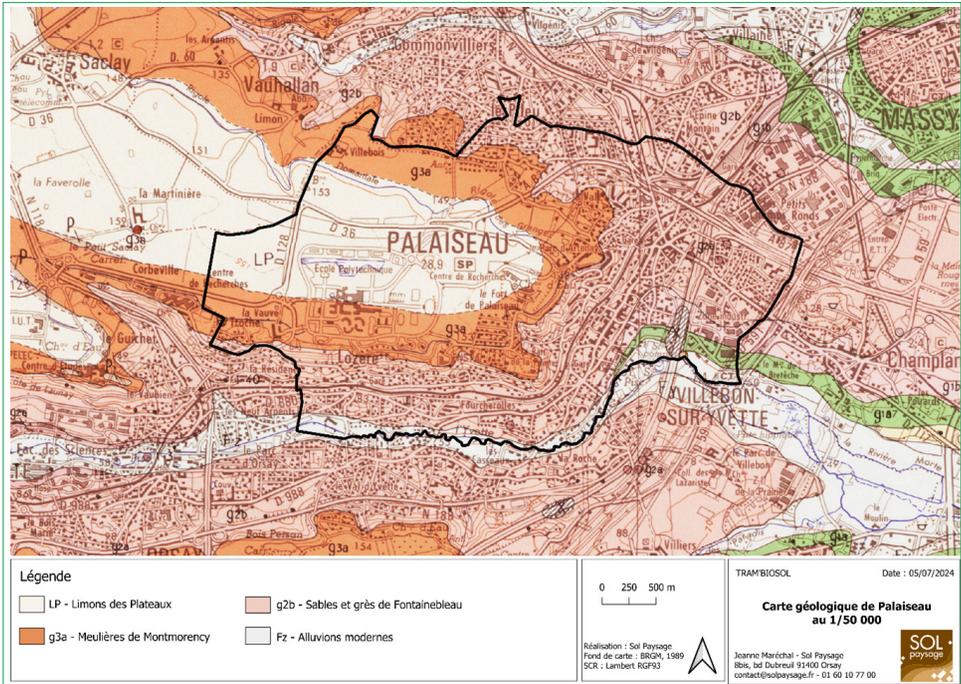


### Contextes géologique et pédologique

Trois unités paysagères composent la commune : (1) le plateau de Saclay, avec une altitude maximale de 157 mètres, (2) les coteaux à forte pente et (3) la vallée de l'Yvette, avec une altitude minimale de 49 mètres [12] (Figure 12).

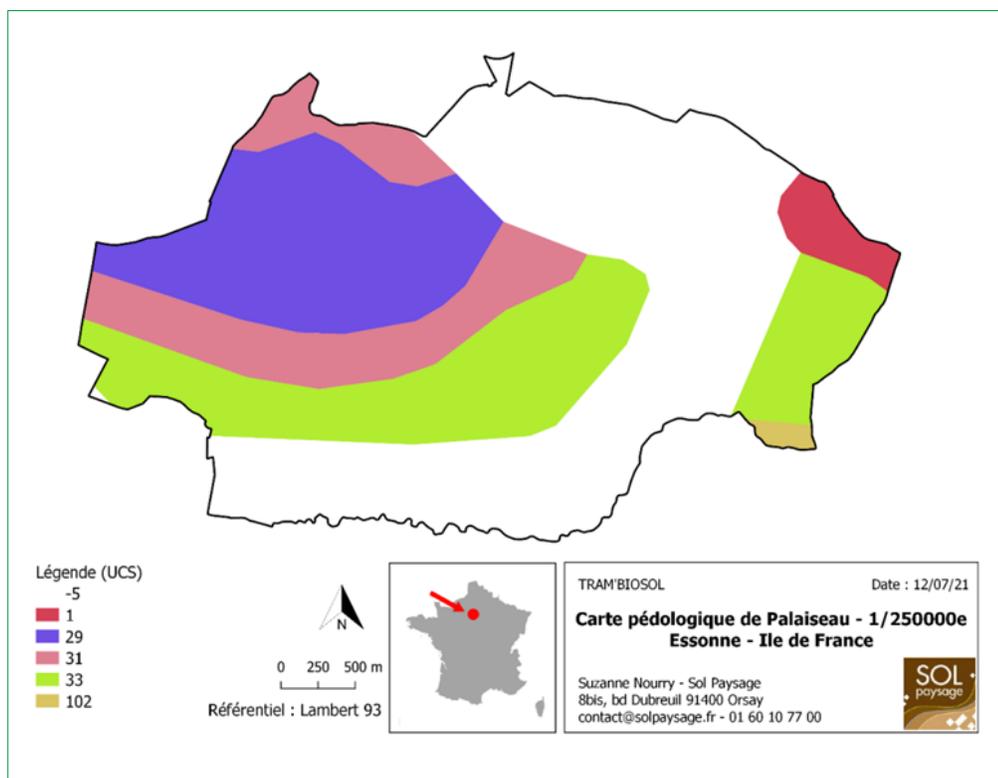
Cette topographie hétérogène s'accompagne de substrats géologiques de nature différente. D'après la carte géologique au 1/50000e dite de Corbeil (BRGM, 1989), le cœur du plateau de Saclay est composé de Limons des plateaux. Il s'agit de dépôts fins, meubles, argileux et sableux renfermant de nombreux débris de meulière. En bordure du plateau, de l'Argile à meulière de Montmorency couvre les Sables de Fontainebleau qui se retrouvent au niveau des coteaux. La vallée de l'Yvette se compose quant à elle d'Alluvions modernes (Figure 13).

Figure 13 - Carte géologique de la commune de Palaiseau, extraite de la carte géologique au 1/50 000e de Corbeil (BRGM, 1989)



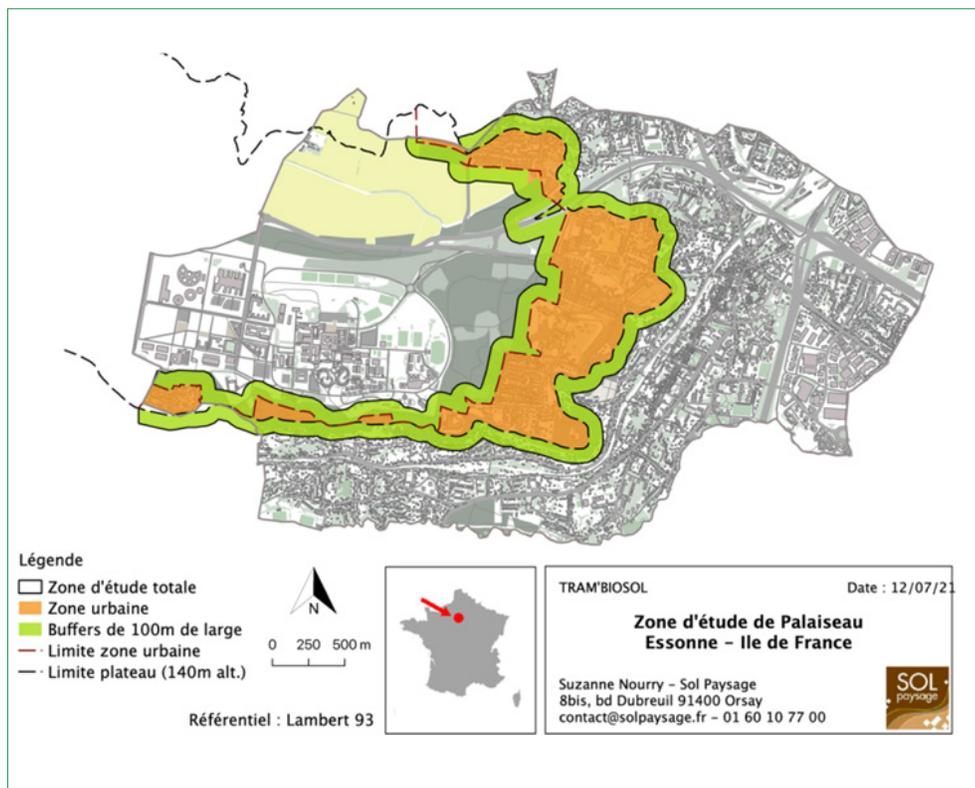
De même, le référentiel régional pédologique de l’Ile de France (RRP IDF) (GisSol, 2004) indique la présence de différentes UCS (Unités Cartographiques de Sol) chacune composée d’une ou plusieurs UTS (Unité Typologique de Sol) sur la commune de Palaiseau. Le cœur du plateau de Saclay se caractérise par des Limons épais hydromorphes sur argile et présente des LUVISOLS TYPIQUES rédoxiques limoneux (UCS29 - UTS 85). En bordure de plateau, des Limons sableux ou caillouteux hydromorphes formant des PLANOSOLS sédimorphes rédoxiques (UCS 31 - UTS 89, 90 et 91) sont présents. Au niveau des coteaux, ce sont des PLANOSOLS sédimorphes rédoxiques caillouteux sableux (UCS 33 - UTS 96) ou des LUVISOLS typiques planosoliques (UCS 33 - UTS 99). De par la présence majoritaire de la zone urbaine, les sols situés en fond de vallée ne sont pas décrits par le RRP IDF (Figure 14).

Figure 14 - Carte pédologique au 1/250 000e de la commune de Palaiseau. UCS -5 : non décrit ; UCS 29 : sommet de plateau de grande culture céréalière de l'Hurepoix, de limon épais sur argile à meulière de Montmorency ; UCS 31 : rebords des plateaux boisés des Alluets, Trappes, de Saint Arnould, de limons plus ou moins sableux sur sables de Lozère et argile à meulière ; UCS 33 : pentes forestières de remaniements de limons, sables stampiens et sables de Lozère sur argiles et/ou paléols (GisSol, 2004).



L'extrait de carte pédologique au 1/250 000e présentée ci-dessus illustre le fait que cette échelle de représentation n'est pas suffisamment fine pour étudier les sols et la Trame Brune à l'échelle de la commune et des quartiers. D'une part, les sols anthropisés ne sont pas cartographiés (UCS -5 non décrit), d'autre part, les UCS représentées n'incluent pas la diversité des sols anthropisés susceptibles de s'y trouver. Pour aboutir à une carte pédologique infra-communale au 1/10 000e, la description et la compréhension des facteurs urbanistiques est nécessaire.

Figure 15 - Délimitation de la zone d'étude située sur la commune de Palaiseau (Fond de carte : BD TOPO - IGN 2021)



### Délimitation précise de la zone d'étude

Au sein de Palaiseau, la zone d'étude correspond à une partie de l'unité paysagère du Plateau de Saclay qui présente un substrat pédologique propre, à l'interface avec la vallée. Le choix d'un unique substrat pédologique, correspondant à l'UCS29 du Référentiel Pédologique Régional d'Ile-de-France (Figure 15), permet de faciliter la caractérisation des sols urbains par comparaison aux sols naturels, et de supposer que l'anthropisation sera le principal facteur à l'origine des différences observées entre les sols sondés.

La zone urbaine choisie présente une surface de 136,5 hectares, délimitée à l'Est par la ligne topographique de 140 m d'altitude (bordure du plateau de Saclay) et à l'Ouest par la limite du bâti. Elle est entourée de part et d'autre de ces limites par deux zones tampon de 100 m de large permettant notamment d'inclure les sols naturels proches dans la zone. Ainsi, les points d'observation seront localisés sur une sous-emprise totale de 280 ha d'espaces urbanisés (zone urbaine + buffers) en bordure de plateau. L'École Polytechnique, située sur le plateau de Saclay et comprise dans la commune de Palaiseau est exclue de la zone d'étude car il s'agit d'un site spécifique à l'écart de la zone urbaine et peu représentatif de la commune.

### PRÉ-DIAGNOSTIC URBANISTIQUE À L'ÉCHELLE COMMUNALE

Le pré-diagnostic urbanistique, tel que proposé dans TRAM'BIOSOL, porte sur trois axes : (1) la caractérisation de la **couverture et de l'usage du sol**, (2) la caractérisation des **formes urbaines**, et (3) la séquence **historique d'urbanisation** et l'**âge du bâti**. Le recoupement de ces informations permet de comprendre la dynamique d'urbanisation de la ville et d'identifier des secteurs ou quartiers ayant potentiellement subi des degrés d'anthropisation similaires de leurs sols naturels initiaux, à des périodes variables. Il est en effet probable que la production d'une forme urbaine, à une période donnée, s'accompagne de modifications pédologiques particulières mais qui restent à identifier. Les communautés lombriciennes associées pourraient présenter des caractéristiques proches. Cette connaissance de la dynamique spatiale et temporelle de la fabrication de la ville est essentielle pour établir un plan d'implantation des observations pédologiques et lombriciennes optimisé pour acquérir des données représentatives de la diversité des sols naturels et anthropiques de la ville.

## Couverture et usage du sol

L'étude de la couverture et de l'usage du sol sur une zone d'étude peut être réalisée grâce à la base de données vectorielle de l'IGN pour la description de l'occupation du sol, l'OCS GE [13]. Il s'agit d'un référentiel national utilisable aux différents échelons territoriaux pour la mise en place des politiques publiques d'aménagement du territoire et l'élaboration des documents d'urbanisme. Son échelle d'utilisation jusqu'au 1 :2 500 la rend intéressante pour une application en milieu urbain, même si des vérifications sur le terrain sont souhaitables pour des études à l'échelle de la parcelle. Il s'agit d'une couche de données socle, pouvant être au besoin enrichie à des niveaux thématiques affinés permettant de prendre en compte les particularités locales et de répondre à des besoins spécifiques. Cette base de données sera cruciale pour le suivi de l'artificialisation et l'atteinte du zéro artificialisation nette à horizon 2050 fixé par la loi « Climat et résilience » du 22 août 2021.

Ainsi, près de 70% des 137 ha de la zone d'étude est couverte par de la végétation (peuplements de feuillus, formations arbustives et formations herbacées), cet espace correspondant ainsi à la localisation d'une Trame Brune potentielle.

En termes d'usage, l'usage résidentiel est majoritairement représenté à 42%, suivi de la sylviculture (23%) et de la production tertiaire (17%) (Figure 16). Afin de préciser la nature des bâtis associés à l'usage résidentiel et des impacts au sol associés, une étude approfondie des formes urbaines est nécessaire.

## Typologie des formes urbaines

Afin d'établir une typologie des formes urbaines de la ville de Palaiseau, une analyse fine de la typo-morphologie du bâti a été réalisée avec l'aide d'outils de traitement SIG et de la base de données BD TOPO qui fournit une couche vectorielle de l'ensemble des bâtiments présents sur le territoire français. En plus de représenter l'emprise du bâti, cette base de données associe à chaque bâtiment un nombre important d'informations, notamment son usage, sa hauteur, son âge ou encore le nombre de logements qu'il abrite, la forme de sa toiture ou sa matérialité. Associé à l'étude du parcellaire et à une vérification via des images satellites et Street View, l'ensemble de ces outils permet d'établir une classification typo-morphologique précise à l'échelle d'un grand territoire.

La figure ci-dessous permet de localiser l'ensemble des formes urbaines identifiées à Palaiseau, en association avec les infrastructures de transport. Cette lecture paysagère urbanistique constituera une clé d'interprétation des communautés lombriciennes à l'échelle des quartiers (Figure 17).

**Figure 16 - Carte de couverture (en haut) et d'usages des sols (en bas) de la zone d'étude et pourcentages associés sur la zone d'étude (données OCS GE, IGN)**

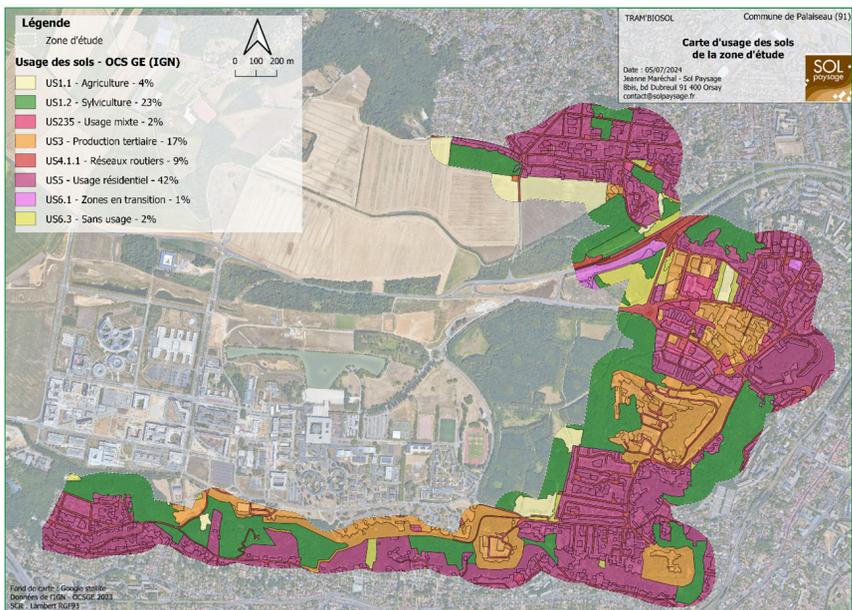
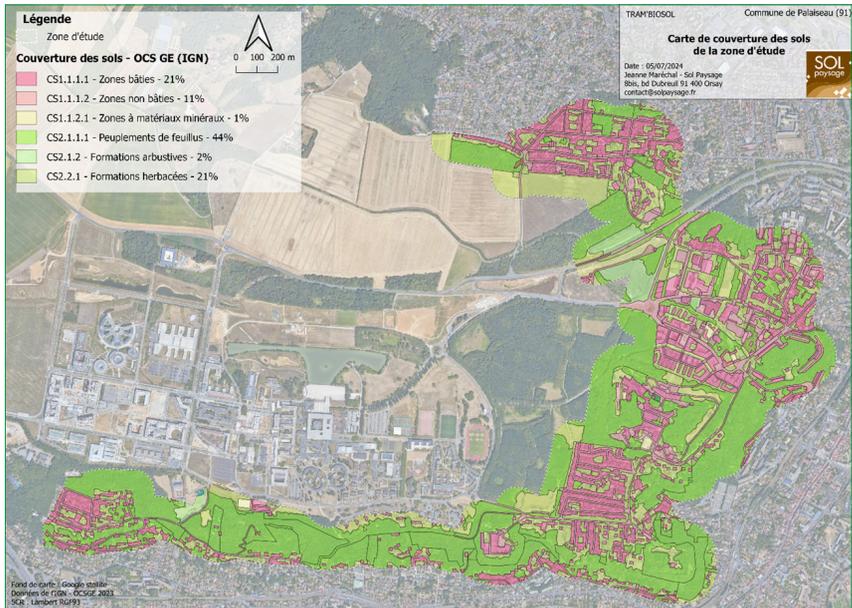
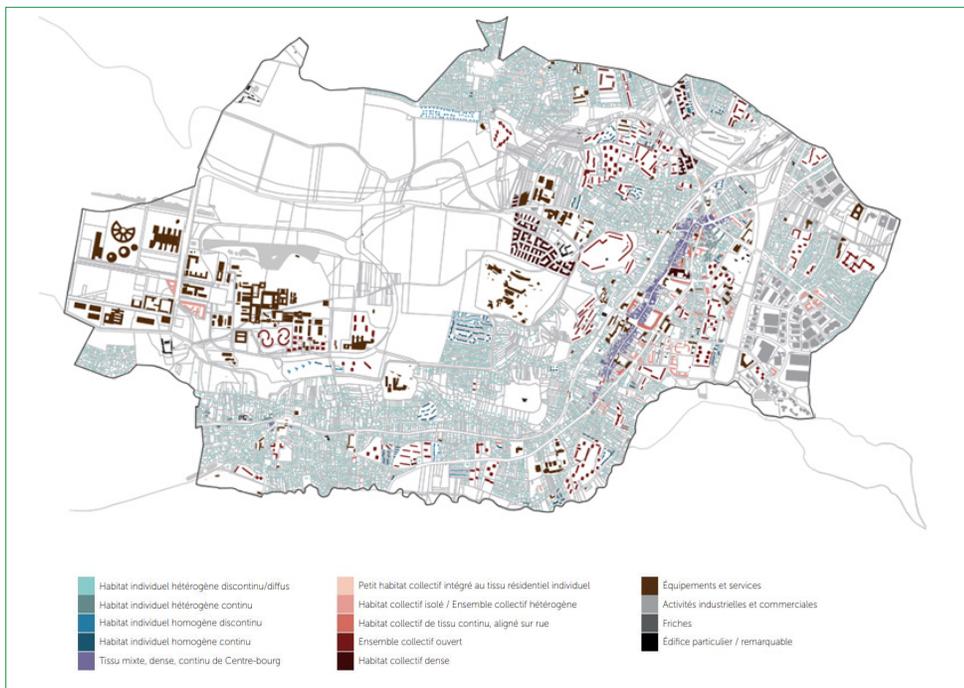


Figure 17 - Typologie des formes urbaines de Palaiseau



Auteur : Kevin Lledo (Lambert-Lénack, 2021)

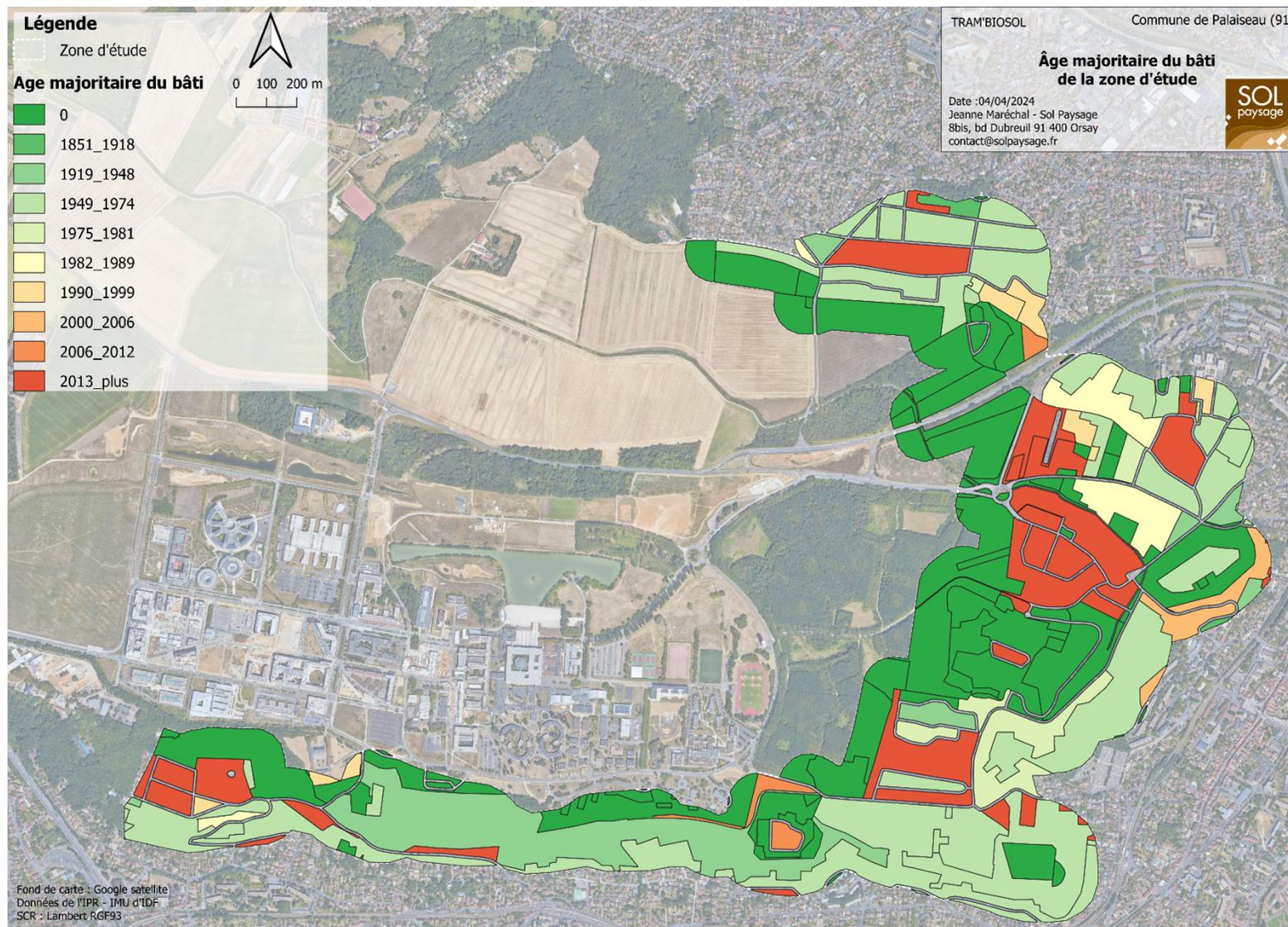
Une version simplifiée de cette typologie consiste à regrouper les cinq typologies d'habitats individuels en deux grandes catégories : (1) **l'habitat individuel continu** et (2) **l'habitat individuel discontinu**. De la même façon, les cinq typologies d'habitats collectifs peuvent être regroupés en deux grandes catégories : (1) **l'habitat collectif continu** et (2) **l'habitat collectif discontinu**. Cette simplification sera utilisée dans la suite de l'étude.

### Historique d'urbanisation et âge du bâti

En contexte francilien, l'Institut Paris Région met à disposition un référentiel géographique appelé « îlots morphologiques urbains » (IMU) [14] qui s'inscrit en lien et en complément du Mode d'occupation du sol (MOS), premier référentiel géographique propre à l'IPR, développé depuis 1982 pour suivre et analyser le territoire francilien. Parmi les données descriptives des IMU, la donnée « Âge du bâti majoritaire » permet de localiser les époques de construction majoritaire des bâtiments les plus représentés en superficie au sein de l'IMU, présentée par classe.

La carte représentant ces données sur la zone d'étude (Figure 18) permet de voir qu'hormis quelques secteurs d'habitats résidentiels, l'âge majoritaire du bâti (traduit des années de construction indiquées dans les données IMU) est relativement ancien (>50 ans).

Figure 18 - Age majoritaire du bâti de la zone d'étude



## DIAGNOSTIC PÉDOLOGIQUE À L'ÉCHELLE INFRA-COMMUNALE

### Acquisition des données pédologiques

#### *Implantation des points d'observations*

L'implantation des points d'observation est réalisée sur la base de la connaissance du contexte géologique et pédologique, croisée aux données acquises par le pré-diagnostic urbanistique mené sur l'ensemble de la commune. Ainsi, des quartiers d'intérêt ont été sélectionnés pour l'emplacement des points d'observations pédologiques et lombriciens afin d'obtenir une couverture de la diversité des types de sols naturels et anthropisés potentiellement identifiables. La densité des points d'observation dépend également de l'échelle d'observation envisagée. Dans une ambition d'étude à l'échelle des quartiers, une représentation au 1/10 000e est nécessaire, impliquant deux à trois observations par hectare [15]. Le plan d'implantation prévisionnel ainsi établi est ensuite soumis aux différentes contraintes inhérentes à la pédologie en milieu urbain.

En effet, en milieu urbain, les observations pédologiques sont contraintes notamment par la présence de réseaux enterrés qui sont identifiés lors de Déclarations d'Intention de Commencement de Travaux (DICT), ainsi que les autorisations d'accès aux parcelles, plus ou moins difficile à faire aboutir selon la nature du propriétaire : Etat - Accès très aisé ; Commune - Accès aisé ; Privé groupe (entreprise, résidence) - Accès difficile ; Privé personnel - Accès très difficile. En particulier, la commune a soutenu le projet en dédiant une page de son journal local afin de solliciter la participation des habitants pour nous ouvrir les portes de leurs jardins (observations pédologiques et prélèvements lombriciens). Le temps nécessaire aux demandes d'autorisations et à l'identification des propriétaires n'est pas à négliger et peut être équivalent au temps prévisionnel de terrain.

#### *Réalisation de la campagne de sondages pédologiques*

Les phases d'acquisition des données pédologiques ont été réalisées aux mois de mai-juin 2021 et novembre-décembre 2021. Au total, 94 sondages pédologiques ont été réalisés à la tarière manuelle sur les emprises publiques et privées de l'emprise d'étude de 269 ha, soit un ratio de 3 sondages/ha permettant une échelle de restitution au 1:10 000e, apportant une définition nécessaire à l'étude de quartiers (Figure 19).

Les observations sont réalisées à la tarière manuelle, d'un diamètre de 6 cm environ et d'une profondeur maximale de 120 cm. Les informations suivantes sont relevées (AFNOR, 2007) :

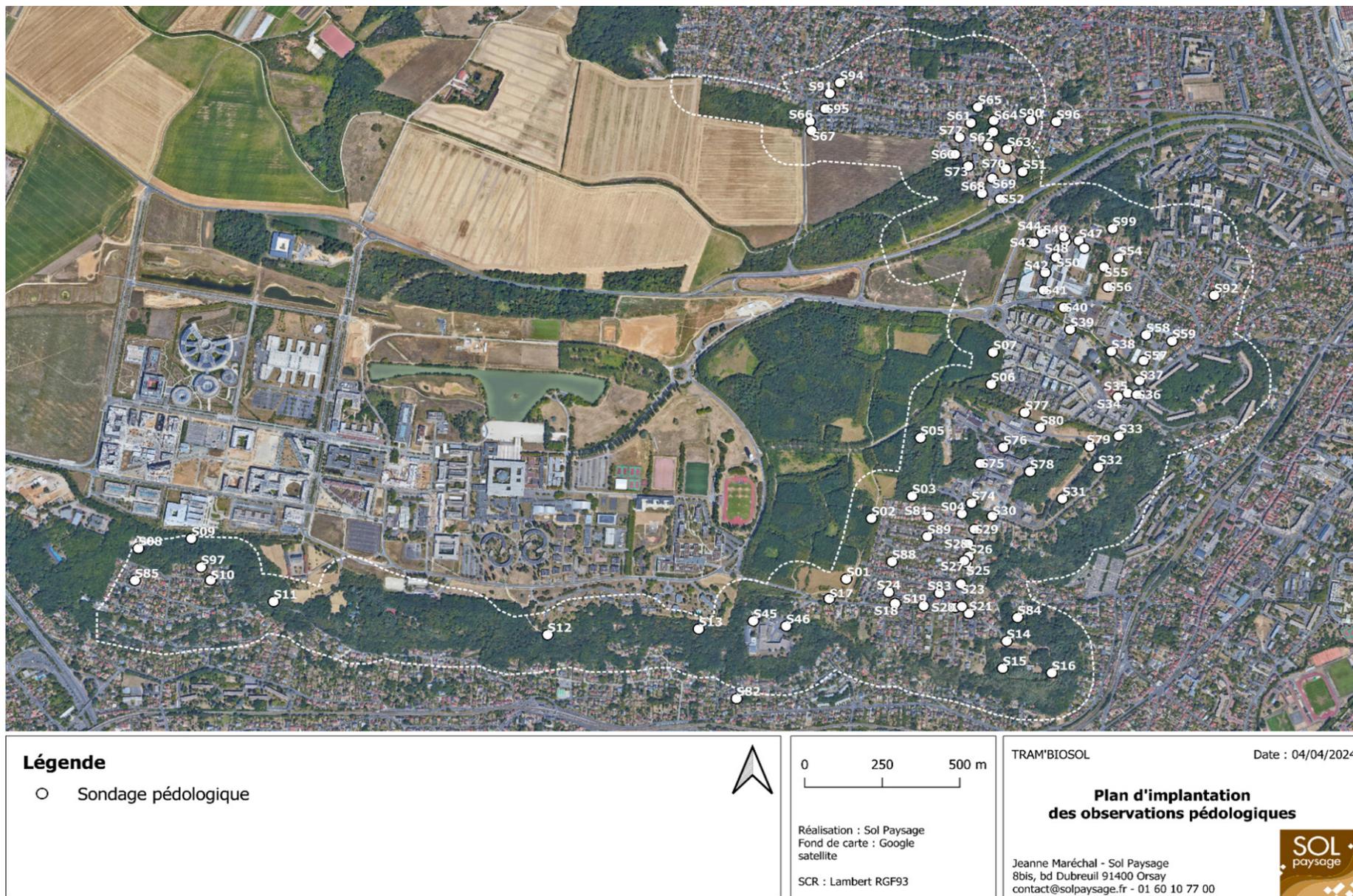
- Position GPS
- Pente
- Couvert végétal (forêt, pelouse, prairie, friche herbacée ou arbustive)
- Aspect surface (densité du couvert, principales espèces végétales, éléments grossiers en surface (EGs), etc.).

Ensuite, de 1 à 5 horizons sont distingués et décrits par les éléments suivants :

- Profondeur de transition
- Texture
- Humidité (de sec à eau libre)
- Couleur (code Munsell)
- Effervescence à HCl (de 0 à 4)
- Pourcentage de MO (de 0 à >3%)
- Compacité (de meuble à très compact)
- Hydromorphie (abondance, taille et contraste des tâches d'oxydation ou de réduction et des nodules)
- Abondance et taille des EGs naturels
- Abondance et nature des éléments anthropique.

Enfin, des commentaires peuvent être faits pour aider à l'interprétation et une synthèse de l'ensemble du sondage est écrite. Ces informations sont rassemblées sur une fiche d'observation. Chaque sondage et chaque horizon pris séparément sont photographiés ainsi que l'environnement autour de chaque point. Le temps nécessaire à la description d'un sondage pédologique et aux prélèvements d'échantillons est d'environ 30 à 45 minutes.

Figure 19 - Plan d'implantation des observations pédologiques



## Cartographie des sols urbains au 1:10 000e du secteur d'étude

### Unités Typologiques de Sol

Comme présenté en 2.1.2, les sols du secteur d'étude sont partiellement cartographiés et représentés de façon surfacique à l'échelle du 1/250 000e par des Unités Cartographiques de Sols (UCS). Chacune de ces UCS peut comprendre une ou plusieurs Unités Typologiques de Sols (UTS) qui correspondent à des grands types de sols. Afin d'affiner l'échelle de représentation au 1/10 000e et prendre en compte les sols urbains, chaque sols est décrit et nommé selon la formule suivante :

*Référence + hydromorphie + texture + caractère calcaire + épaisseur + origine/lithologie*

Chaque formule distincte correspond ainsi à une Unité Typologique de Sol (UTS). Du fait de l'uniformité géologique et pédologique volontairement sélectionné pour l'étude, seules deux grandes références de sols sont observées : les LUVISOLS TYPIQUES et les ANTHROPOSOLS RECONSTITUES. Au sein de ces deux références, une large gamme de diversité de combinaisons de paramètres d'hydromorphie, de texture, de basicité, d'épaisseur et de lithologie sont observées.

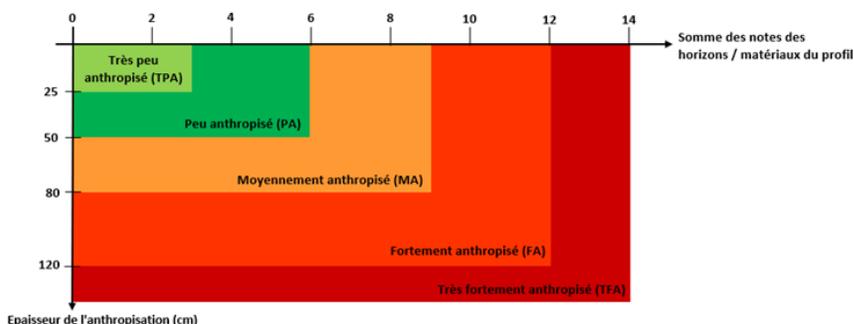
### Anthropisation des sols

L'introduction du concept d'anthropisation des sols apparaît nécessaire pour apporter une clé de lecture à la diversité des sols urbains, pour le moment manquante en pédologie. Nous le définissons ainsi : des « modifications volontaires ou involontaires des propriétés physiques, chimiques et/ou biologiques naturelles d'un sol sous l'effet des activités humaines (e.g., fertilisation, mélange, nivellement, talutage, addition de matériaux, compactage, pollution...), induisant des marqueurs pédo-morphologiques plus ou moins lisibles et durables ». Il s'agit d'un concept pédologique relatif à des critères morphologiques observables dans un sondage ou un profil de sol, permettant de définir un gradient d'anthropisation traduisant l'intensité des activités humaines subies par un sol. Le degré d'anthropisation des sols peut se mettre en évidence surtout par les apports de matériaux déposés sur les parcelles au moment/ou après la construction.

Pour associer un degré d'anthropisation à chacun des sols, trois critères de modification des sols sont pris en compte :

- le type de matériaux
- l'épaisseur de ces matériaux
- la présence d'« artefacts » et/ou de débris et déchets d'origine humaine (indices morphologiques de l'action humaine).

Figure 20 - Grille permettant d'évaluer le degré d'anthropisation des sols



Ainsi, chaque matériau constituant le sol est affecté d'une note qui augmente avec l'empreinte anthropique :

- **Note 0** : horizons pédologiques non remaniés incluant les horizons labourés naturels
- **Note 1** : matériaux terreux (pédologiques, géologiques) apportés
- **Note 2** : matériaux terreux mélangés avec des matériaux anthropiques à <20% du volume total de l'horizon
- **Note 3** : horizons pédologiques mélangés avec des matériaux anthropiques entre 20% et 50% du volume total de l'horizon
- **Note 4** : matériaux anthropiques >50% (remblais divers, déchets, ...) et/ou remblais et matériaux compactés et/ou sable de réseaux anthropiques
- **Note 5** : matériaux anthropiques imperméables (bitume, dalle, stabilisé).

Les notes de chacun des matériaux identifiés sont sommées. La note finale est combinée à l'épaisseur maximale impactée par une activité anthropique. Cinq catégories d'anthropisation sont ainsi identifiées : (1) très peu anthropisé, (2) peu anthropisé, (3) moyennement anthropisé, (4) fortement anthropisé, et (5) très fortement anthropisé (Figure 20).

Figure 21 - Degrés d'anthropisation des sols

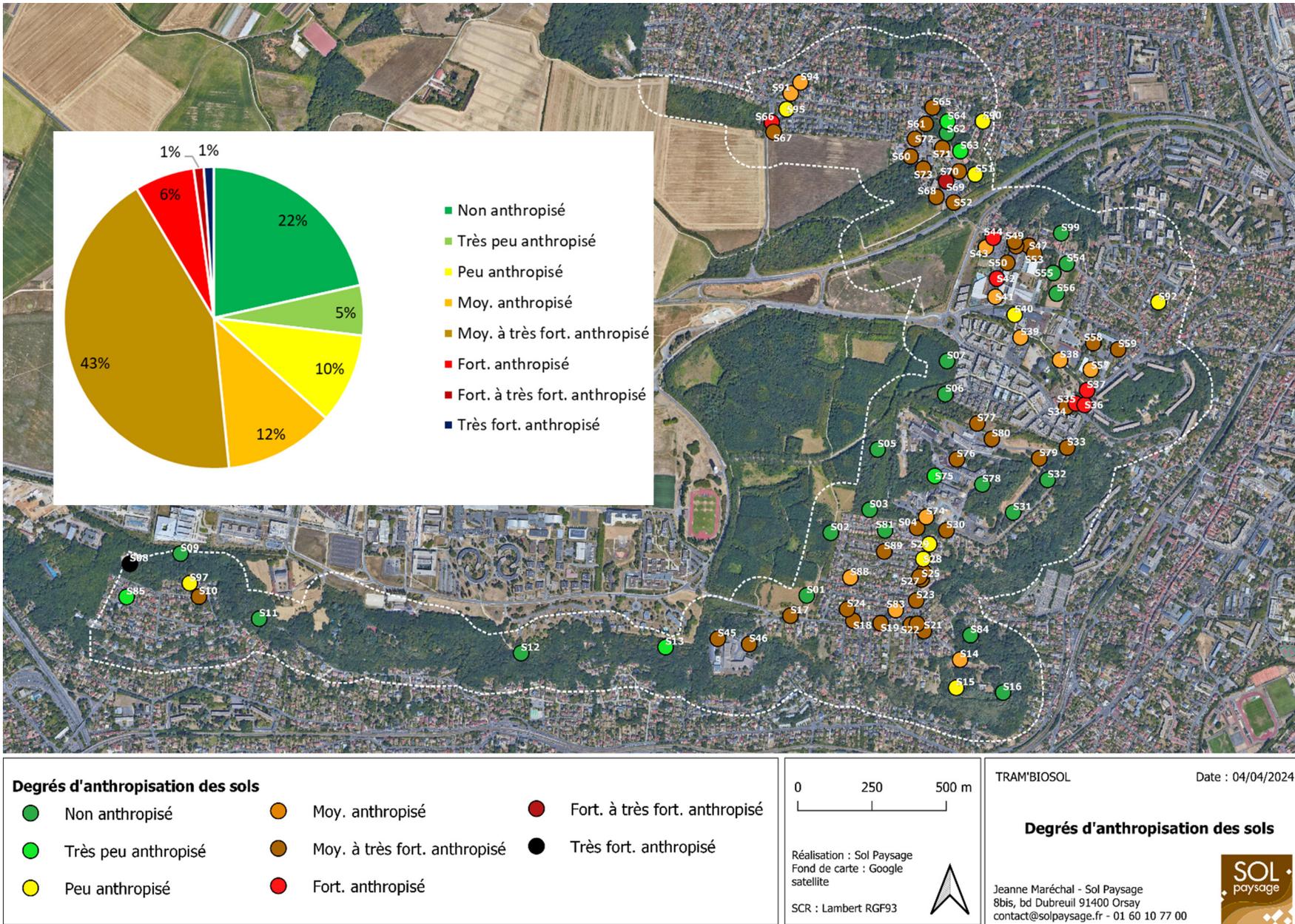
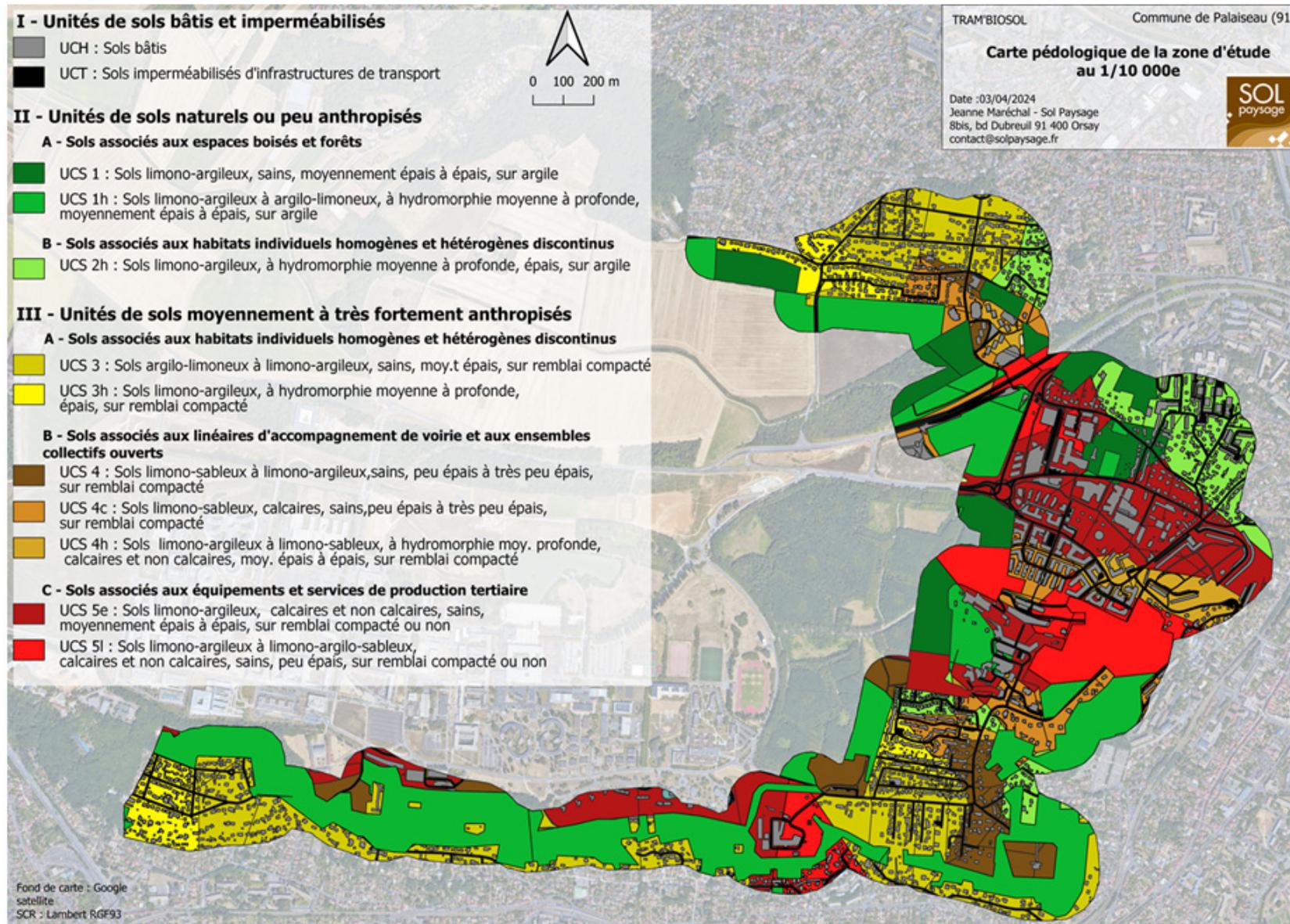


Figure 22 - Carte pédologique de la zone d'étude au 1/10 000e



A la lecture de ce critère, les sols investigués dans la zone d'étude sont à 37% dans des gammes non à peu anthropisées (Figure 21), ces derniers étant en majorité localisés dans les zones arborées non bâties. La gamme de sols moyennement à très fortement anthropisés est la plus représentée avec 63% des sols investigués. Cela s'explique par l'incertitude associée aux sondages à la tarière manuelle qui ne permettent pas d'observer les sols sur toute la profondeur en cas de matériaux compacts ou riches en éléments grossiers, ce qui ne permet pas de trancher sur la profondeur exacte d'anthropisation ni la nature des matériaux. L'ensemble des sols moyennement à très fortement anthropisés se situent majoritairement au sein du tissu urbain résidentiel.

### Unités Cartographiques de Sol (UCS)

La carte pédologique au 1/250 000e (Figure 14) indiquait des imprécisions dans les contours des unités cartographiques de sol, et notamment une absence d'information sur l'emprise urbaine (UCS « -5 »). Afin de pallier à ces contraintes, des UCS urbaines ont été proposées à partir des 94 sondages pédologiques réalisés sur 137 ha de la zone d'étude (Annexe 1). Les regroupements sont réalisés sur la base de similarités pédologiques (degré d'anthropisation, texture, hydromorphie, épaisseur, ...) mais également sur la base d'une lecture paysagère. En l'occurrence, dans le cadre de cette étude, les UCS ont été créées pour prendre en compte (1) leur degré d'anthropisation et (2) les formes urbaines associées. De façon synthétique, une unité de sols bâtis/imperméabilisés et deux grandes unités de sols non bâtis ont été caractérisées sur la zone d'étude. Les unités de sols non bâtis sont des **unités de sols naturels ou peu anthropisés** qui correspondent aux LUVISOLS TYPIQUES observés notamment dans les espaces boisés peu impactés par l'urbanisation (UCS 1 « sains » et UCS 1h « hydromorphes ») ou au sein d'habitats individuels (UCS 2h). Les autres sols de la zone d'étude sont associés à des **unités de sols moyennement à fortement anthropisés** (UCS 3-4-5) et correspondent en quasi-totalité à des ANTHROPOSOLS RECONSTITUES reposant pour la plupart sur des remblais compactés (Figure 22).

Des observations complémentaires en profil pourraient être envisagées pour lever les incertitudes quant aux matériaux désignés comme « remblai compacté » pour caractériser précisément leur nature, origine et profondeur. De la même manière, il pourrait être intéressant d'approfondir la connaissance des mouvements et modifications des sols à l'échelle de la parcelle pour mieux comprendre les relations entre les observations morphologiques et les processus de création de formes urbaines par exemple. Cependant, ce travail peut être fortement contraint par l'absence de données d'archives ou la difficulté de les identifier et d'y avoir accès.

## CARTOGRAPHIE DE LA TRAME BRUNE POTENTIELLE

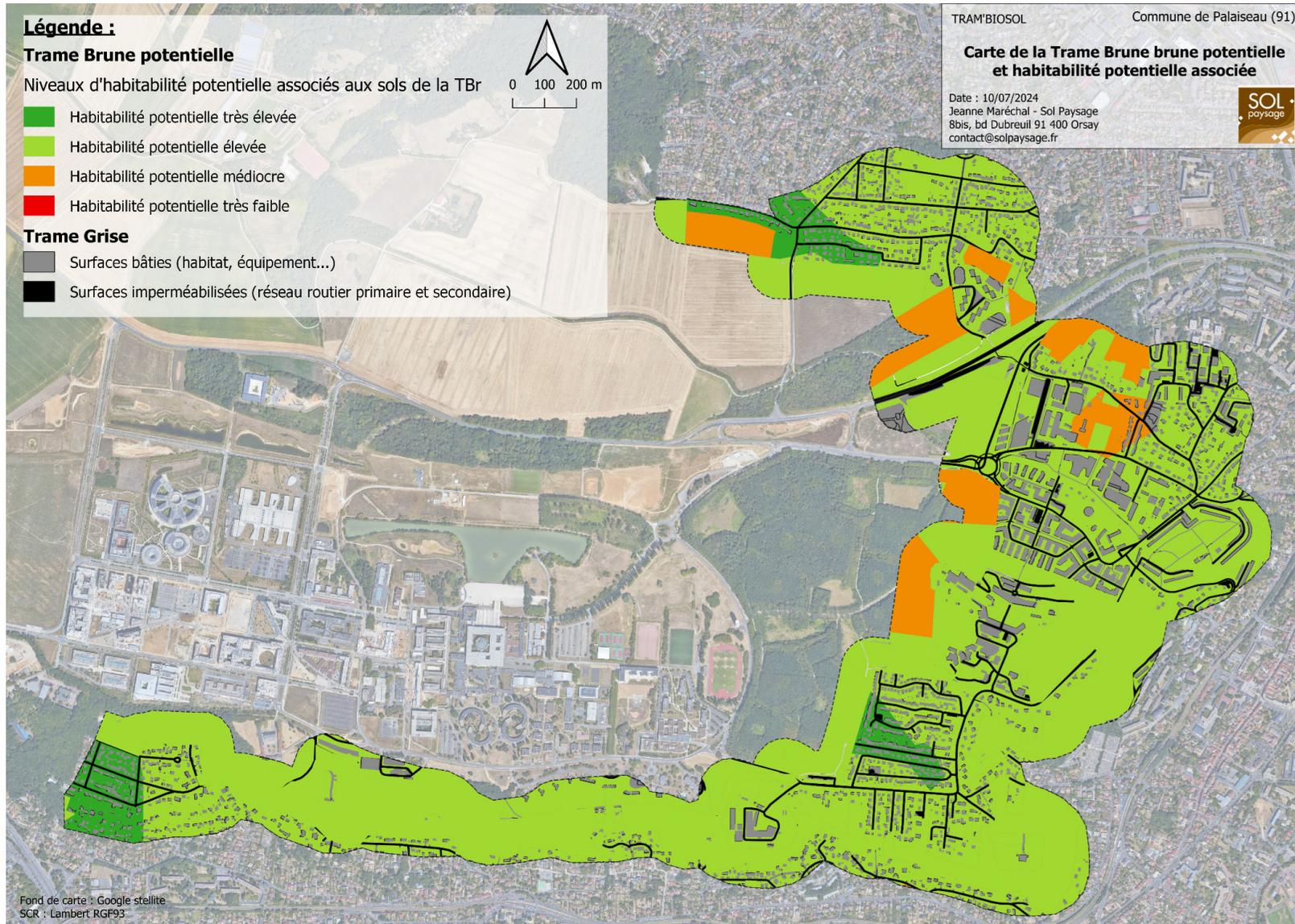
L'ensemble des données accumulées au cours du pré-diagnostic urbanistique et du diagnostic pédologique permettent d'établir une carte de localisation de la Trame Brune potentielle (Figure 23). Elle correspond aux espaces de sol végétalisés susceptibles d'être des habitats pour les communautés lombriciennes. Ces espaces de Trame Brune peuvent être évalués en termes d'habitabilité potentielle sur la base de l'indice présenté en 1.3.1. Ainsi, à chaque UCS précédemment identifiée est calculé un indice d'habitabilité à partir des données pédologiques acquises au sein de chaque UCS (Tableau 2).

Tableau 2 - Indices d'habitabilité associés à chaque UCS

N°UCS	Indice d'habitabilité	Interprétation
UCS 1	1,8	Habitabilité médiocre
UCS 1h	2,3	Habitabilité élevée
UCS 2	2,3	Habitabilité élevée
UCS 3	2,3	Habitabilité élevée
UCS 3h	2,8	Habitabilité très élevée
UCS 4	2,0	Habitabilité élevée
UCS 4c	2,0	Habitabilité élevée
UCS 4h	2,0	Habitabilité élevée
UCS 5e	2,0	Habitabilité élevée
UCS 5l	2,0	Habitabilité élevée

Le calcul de ces indices indique une habitabilité de la zone d'étude très majoritairement élevée, voire très élevée dans les sols appartenant à l'UCS 3h. L'UCS 1 apparaît moins habitable, du fait notamment de teneurs en matière organique inférieures à 4% et de valeurs de pH proches de 6. Cette représentation cartographique de l'habitabilité potentielle des sols permet notamment de localiser des réservoirs potentiels de biodiversité lombricienne à préserver. Des prélèvements de vérification pourront être effectués pour évaluer l'habitabilité réelle de ces sols.

Figure 23 - Carte de la Trame Brune potentielle



Sont exclues de la Trame Brune potentielle les surfaces supportant des bâtiments ainsi que les surfaces imperméabilisées d'infrastructures de transport (réseau routier secondaire et primaire), qui peuvent être regroupées sous le terme de « Trame Grise ». Ces éléments de Trame Grise sont supposés être non habitables par les vers de terre du fait de l'absence de sol (excavations) ou de contraintes physiques fortes a minima sur 20 à 50 cm de profondeur (surfaces scellées, couches compactées, chaulées, remblais, ...). Ces éléments constituent des barrières anthropiques supposées infranchissables pour les vers de terre. Leur identification permet de localiser les zones où les lombriciens sont susceptibles de subir les conséquences d'un isolement total (parcelles ou quartiers entourés de routes).

## DIAGNOSTIC DE LA MACROFAUNE LOMBRICIENNE À L'ÉCHELLE INFRA-COMMUNALE

### Echantillonnages lombriciens

Une première campagne de prélèvement a eu lieu entre mars et avril 2021 dans des systèmes prairiaux du Plateau de Saclay afin d'établir des valeurs de référence locales (36 parcelles échantillonnées). Une deuxième campagne a eu lieu entre mars et avril 2022 sur la zone d'étude de Palaiseau (61 parcelles échantillonnées). Dans la mesure du possible et selon les contraintes d'autorisations, les échantillonnages lombriciens ont été réalisés aux emplacements déjà décrits pédologiquement en milieu public et privé (Figure 24). La période d'échantillonnage restreinte ajoute une contrainte supplémentaire à la multiplication des observations. En effet, la période d'échantillonnages correspond à mars-avril pour coïncider avec la période de forte activité des vers de terre. Le protocole d'échantillonnage appliqué est le « Test Bêche » [10].

#### *Protocole « Test-Bêche »*

*Le protocole de prélèvement « Test-Bêche » développé par l'Observatoire Participatif des Vers de Terre consiste à extraire 6 blocs de sol (20 cm x 20 cm x 25 cm) espacés de 2 m et en un tri manuel afin de collecter les individus. Les individus prélevés sont stockés dans des flacons d'éthanol (solution à 90%) pour leur conservation. Le comptage, la détermination de l'espèce (ou de la sous-espèce), du stade de développement et la pesée des vers de terre sont effectués à la Plateforme ECOBIOSOIL de l'Université de Rennes. Les individus sont assignés à leur groupe fonctionnel : épigés, épi-anéciques, anéciques stricts et endogés. Dans l'impossibilité*

*d'identifier des individus à leur espèce (le plus souvent avec des juvéniles), ces individus sont attribués au groupe fonctionnel auquel ils appartiennent, puis distribués proportionnellement aux adultes qui ont été identifiés. Afin d'obtenir une estimation du nombre de vers de terre par m<sup>2</sup>, le nombre total de vers de terre par bloc (de 0.2m de côté) est multiplié par 25 [16, 17].*

Conjointement aux prélèvements lombriciens, un échantillon de sol issu des 6 blocs de sol est également prélevé dans chaque parcelle. Ces échantillons sont envoyés au laboratoire Aurea Agrosociences pour analyses physico-chimiques : matière organique/sec (%), pH eau/sec (%), argiles, limons fins, limons grossiers, sables fins et sables grossiers (%).

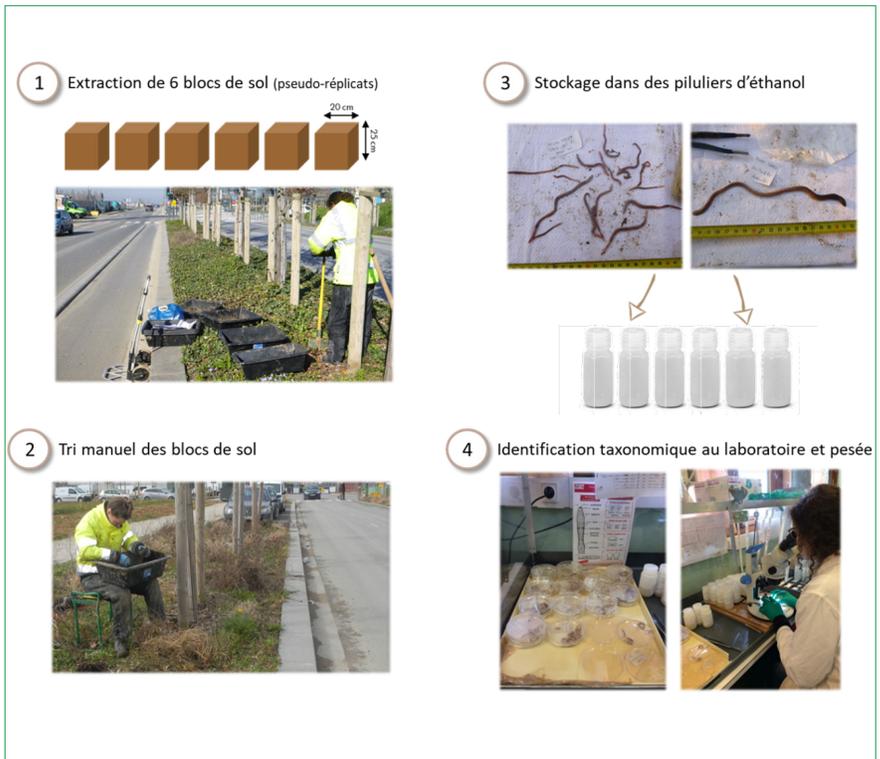
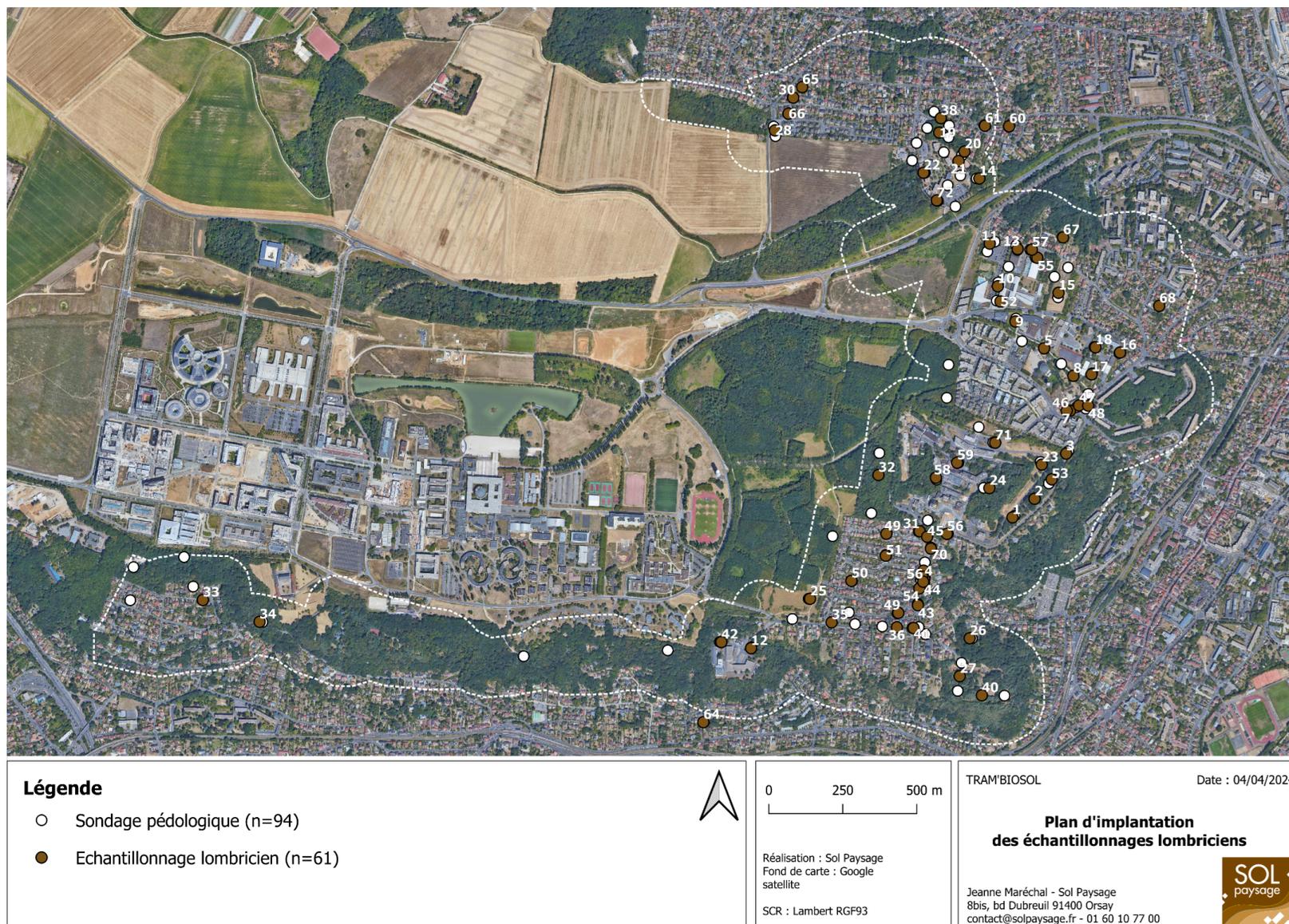


Figure 24 - Plan d'implantation des échantillonnages lombriciens



## Abondance et richesse totales

Parmi les 61 parcelles échantillonnées sur la zone d'étude, 60% d'entre elles présentaient une abondance lombricienne élevée à très élevée. Aucune parcelle n'a été décrite en gamme d'abondance très faible. Ainsi, l'abondance moyenne observée est de  $375 \pm 199$  individus/m<sup>2</sup>, soit une **abondance élevée** (Figure 25). Cette valeur obtenue sur la zone d'étude urbaine est équivalente à l'abondance moyenne observée dans des systèmes prairiaux de référence localisés sur le Plateau de Saclay, qui atteignait  $391 \pm 217$  individus/m<sup>2</sup>.

Figure 25 - Abondance lombricienne moyenne observée sur la zone d'étude et nombre d'observations par gamme d'abondance associée (gammes du référentiel ECOBIOSOIL, Université de Rennes)

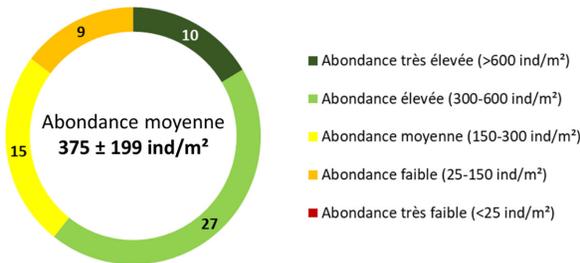
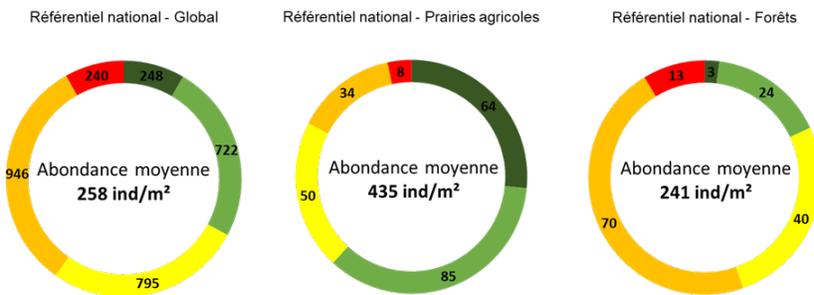


Figure 26 - Abondance moyenne et nombre d'observations par gamme d'abondance associée (valeurs du ECOBIOSOIL, Université de Rennes. De gauche à droite : tous usages confondus, prairies agricoles, forêts)



En comparaison aux valeurs du référentiel national, l'abondance moyenne et le nombre d'observations par gammes d'abondance de la zone d'étude se rapprochent de celles des prairies agricoles, majoritairement représen-

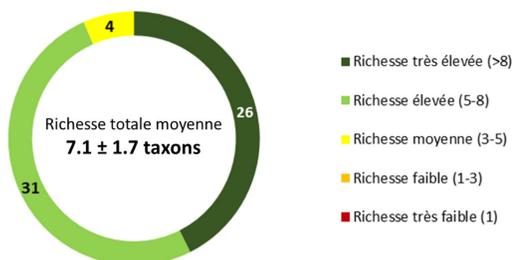
tées par une abondance élevée à très élevée (Figure 26). Cela est cohérent avec les sites prélevés, majoritairement sélectionnés pour leur couverture prairiale afin de faciliter la comparaison inter-sites (jardins, espaces verts urbains, bordures de chemins ou de voirie, ...).

Au total, 20 espèces ont été identifiées sur l'ensemble des parcelles prélevées au sein de la zone d'étude. Parmi elles, six espèces dominantes représentent 77% de l'abondance totale :

- *Allolobophora chlorotica chlorotica* - 15%
- *Aporrectodea caliginosa caliginosa* - 14%
- *Aporrectodea terrestris* - 13%
- *Allolobophora rosea rosea* - 12%
- *Aporrectodea longa longa* - 12%
- *Allolobophora icterica* - 11%

En termes de richesse totale,  $7.1 \pm 1.7$  taxons ont été identifiés en moyenne par parcelle, ce qui correspond à une gamme de **richesse élevée** (Figure 27). Sur l'ensemble des 61 parcelles prélevées, 93% présentent une richesse élevée à très élevée.

Figure 27 - Richesse lombricienne totale moyenne observée sur la zone d'étude et gammes de richesse associées (valeurs du référentiel ECOBIOSOIL, Université de Rennes)



## Impacts des facteurs urbanistiques, pédologiques, et de Trame Brune sur les communautés lombriciennes

Dans cette partie, l'ensemble des facteurs identifiés lors du pré-diagnostic urbanistique et du diagnostic pédologique sont testés sur les paramètres lombriciens suivants : **abondance totale**, **richesse totale** et **indice de Shannon**. Il s'agira d'apporter des éléments de réponse aux problématiques présentées (cf. Problématiques scientifiques de l'étude Tram'bio-sol). Un test de Kruskal-Wallis est appliqué au jeu de données pour chacun des paramètres testés (si  $n > 1$ ) afin d'identifier des différences significatives, suivi de tests de Wilcoxon pour les comparaisons multiples en cas de significativité.

**Aucun des facteurs testés n'a d'impact significatif sur les paramètres lombriciens testés, indiquant une importante homogénéité des communautés lombriciennes sur l'ensemble de la zone d'étude (Tableau 3).**

**Tableau 3 - Effets des facteurs urbanistiques, pédologiques sur les paramètres lombriciens. Le résultat est significatif si p-value < 0.05. La valeur K correspond à la statistique du test de Kruskal-Wallis. La valeur df correspond aux degrés de liberté.**

	Abondance totale			Richesse			Shannon		
	K	df	p-value	K	df	p-value	K	df	p-value
<i>Facteurs urbanistiques</i>									
Couverture du sol	7.2	5	0.21	9.3	5	0.10	5.3	5	0.38
Usage du sol	8.0	6	0.24	5.4	6	0.50	8.2	6	0.23
Âge du bâti	9.4	7	0.23	1.0	7	1.00	2.9	7	0.89
Forme urbaine	11.1	7	0.13	7.8	7	0.35	6.4	7	0.50
<i>Facteurs pédologiques</i>									
Anthropisation	7.0	5	0.22	3.5	5	0.61	3.2	5	0.66
UCS	7.2	9	0.61	8.1	9	0.52	8.7	9	0.46

De plus, aucune corrélation n'a été identifiée entre les paramètres lombriciens testés et les propriétés physico-chimiques de l'horizon de surface (corrélation de Spearman ; p-value > 0.10) ce qui peut s'expliquer par un caractère relativement homogène et donc peu discriminant des propriétés des sols (Tableau 4).

**Tableau 4 - Valeur moyenne des propriétés physico-chimiques des horizons de surface prélevés**

Propriété physico-chimique	Argile (%)	Limon (%)		Sable (%)		pH	Matière organique (%)
		fin	grossier	fin	grossier		
Moyenne ± écart-type	21.1 ± 5.8	13.3 ± 5.8	23.0 ± 12.6	23.9 ± 12.8	14.6 ± 8.0	7.3 ± 1.0	4.1 ± 1.5

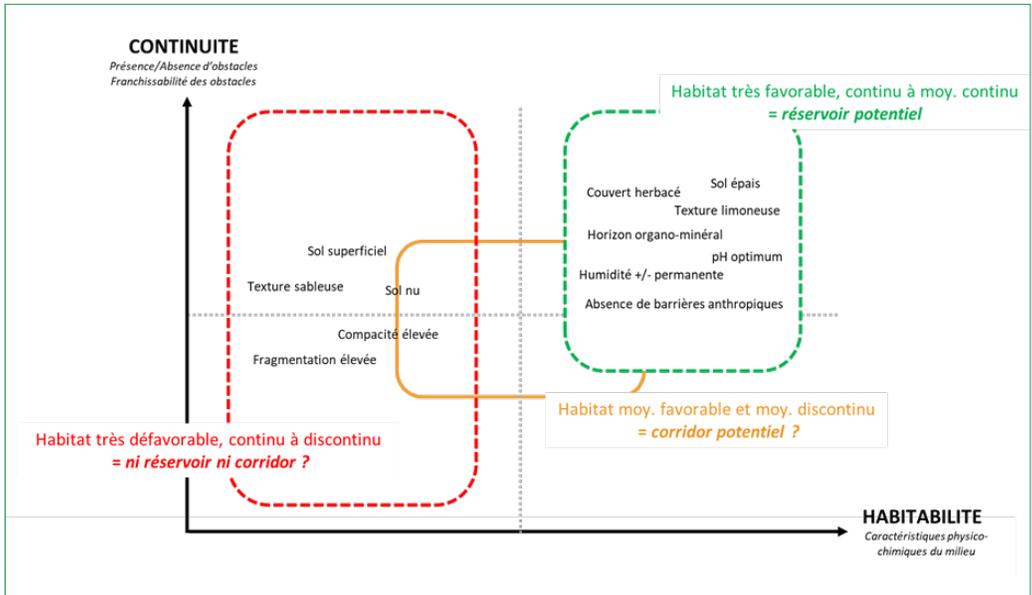
Un indice d'habitabilité a été associé à l'échelle de la parcelle échantillonnée (et non à l'échelle de l'UCS comme présenté en Figure 22), à partir des données pédologiques acquises sur le terrain et en laboratoire, selon la méthode de calcul décrite (cf Habitabilité de sols). **Seules deux gammes d'habitabilité, élevée et très élevée, sont représentées sur les parcelles échantillonnées.** De même, un indice de continuité a été associé à chaque parcelle échantillonnée selon la nomenclature décrite (cf. Continuité des sols). Aucun impact significatif de l'habitabilité et de la continuité n'a été observé sur les paramètres lombriciens testés (Tableau 5).

**Tableau 5 - Effets des facteurs de la Trame Brune (habitabilité, continuité) sur les paramètres lombriciens. Le résultat est significatif si p-value < 0.05.**

	Abondance totale			Richesse			Shannon		
	K	df	p-value	K	df	p-value	K	df	p-value
<i>Facteurs de trame brune</i>									
Habitabilité	3.7	1	0.06	0.0	1	0.89	0.1	1	0.80
Continuité	1.5	2	0.47	1.0	2	0.59	0.4	2	0.84

Un facteur explicatif probable de l'homogénéité de la réponse lombricienne aux différents facteurs testés est le niveau d'habitabilité élevé à très élevé des sols de la zone d'étude. En effet, les sols de l'emprise, mêmes anthropisés, ont des caractéristiques relativement homogènes et intrinsèquement favorables aux communautés lombriciennes (i.e., limoneux à limono-argileux, riches en matière organique, pH neutre à légèrement basique, moyennement épais à épais). Ces propriétés sont héritées des sols naturels initiaux sur lesquels s'est développée la ville, majoritairement des LUVISOLS TYPIQUES. Ces derniers sont reconnus pour leur

Figure 28 - Hypothèse révisée de l'effet de l'interaction habitabilité/continuité des sols sur les communautés lombriciennes, au regard des résultats de l'étude TRAM'BIOSOL. Le rectangle vert correspondrait à la gamme d'habitabilité explorée dans TRAM'BIOSOL.

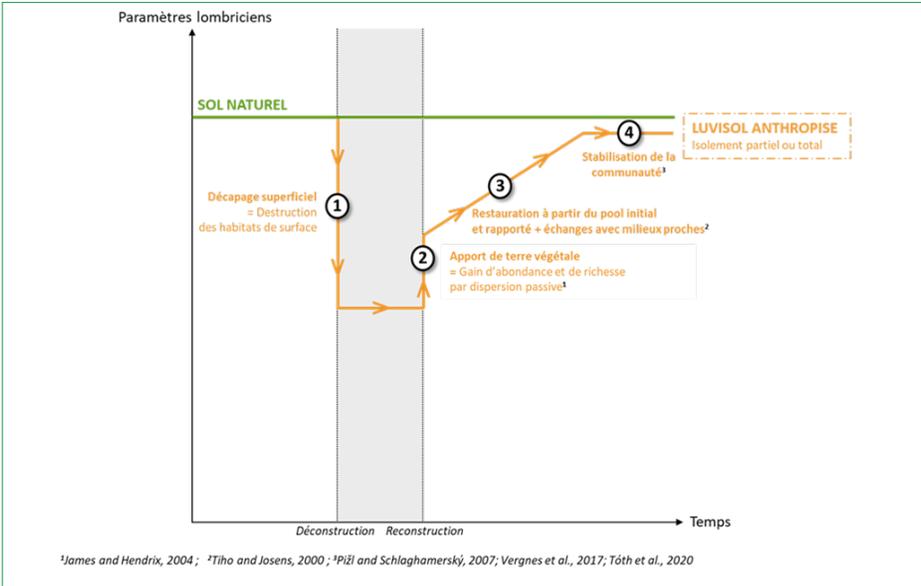


grande fertilité physique, chimique et biologique, constituant ainsi un habitat permettant le développement de communautés lombriciennes en abondance et richesse élevées. L'étude pédologique a en effet révélé que même les sols les plus anthropisés étaient constitués de ces mêmes matériaux, laissant supposer que l'urbanisation progressive de la ville a été réalisée en conservant les matériaux pédologiques locaux, favorables à la recréation volontaire ou involontaire de sols à niveau d'habitabilité élevé. Ainsi, la zone d'étude ne permettrait pas de tester des gammes d'habitabilité suffisamment contrastées pour identifier un impact significatif de ce critère sur les communautés lombriciennes (Figure 28).

Au regard de ces résultats, la zone urbaine étudiée serait constituée d'une multitude de réservoirs de biodiversité lombricienne, confortant l'idée que la ville peut constituer une zone refuge pour les invertébrés du sol dans la mesure où des habitats leur sont préservés.

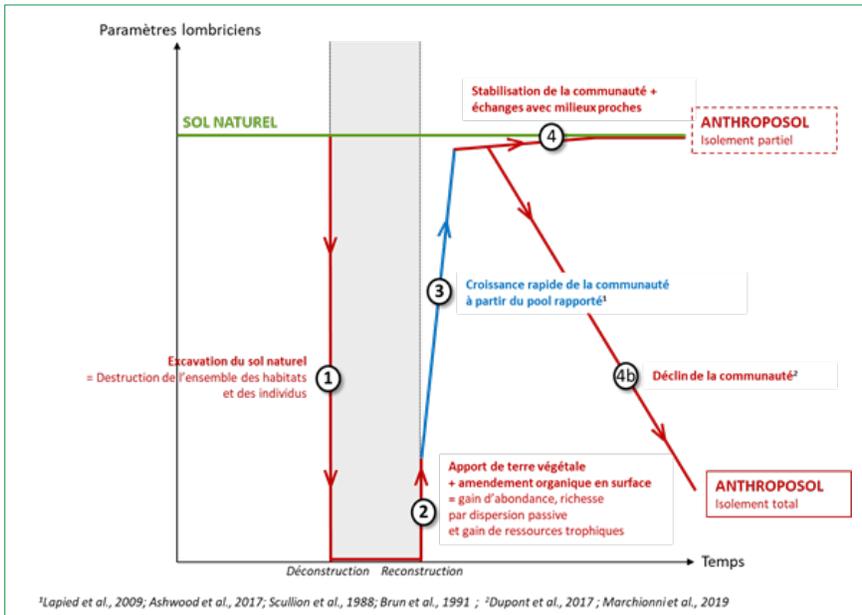
En parallèle, le **facteur temps explique aussi probablement les résultats obtenus**. En effet, aucune forme urbaine de moins de 10 ans n'a été

Figure 29 - Schéma simplifié de la cinétique de restauration des communautés lombriciennes suite à une phase travaux avec impact superficiel sur les sols (d'après Maréchal, 2021 [9] ; 2022 [8])



échantillonnée du fait d'une urbanisation relativement ancienne sur la zone d'étude. Ce choix méthodologique avait pour objectif d'annuler un biais potentiel lié à des travaux très récents, permettant d'évaluer plus objectivement des facteurs urbanistiques, tels que la forme urbaine, sur des communautés ayant bénéficié d'un temps de résilience nécessaire à leur restauration. Une étude sur un secteur géographique proche a en effet montré qu'une trentaine d'années après des travaux de sols superficiels, les communautés lombriciennes étaient comparables à des communautés de sols prairiaux naturels locaux [9]. Cela peut s'expliquer par la **préservation dans les horizons pédologiques plus profonds**, non impactés par les travaux, de **pools d'espèces à partir desquels les communautés pourraient se restaurer** (Figure 29).

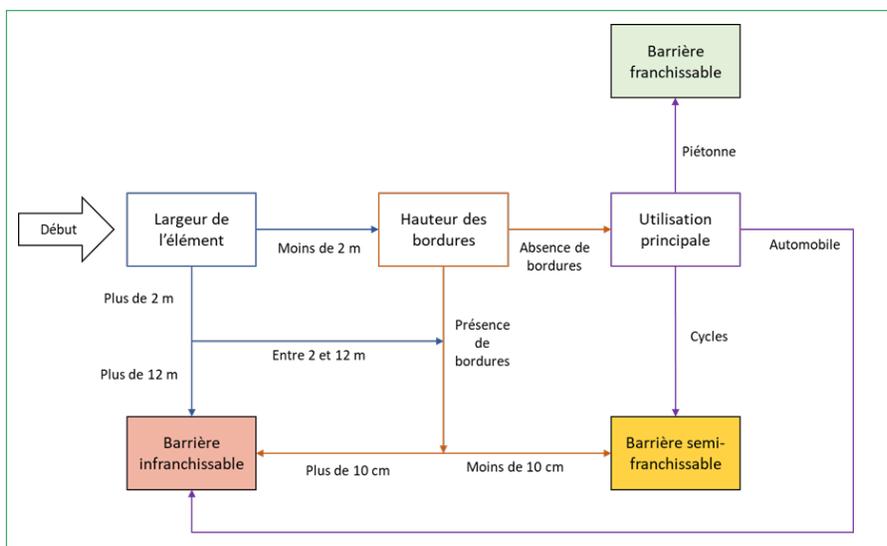
Figure 30 - Schéma simplifié de la cinétique de restauration des communautés lombriciennes suite à une phase travaux avec impact profond sur les sols (d'après Maréchal, 2021 ; 2022)



L'absence d'effet de modalités d'isolement des sols (partiel ou total) sur les communautés lombriciennes étaye également cette hypothèse d'une résilience des communautés permise par la préservation d'individus dans les sols de la zone d'étude, naturels ou anthropisés. L'hypothèse d'un effet néfaste des ruptures de continuité de sol sur les lombriciens n'a donc pas pu être vérifiée dans le cadre de TRAM'BIOSOL. A l'inverse, l'étude citée précédemment [9] a pu mettre en évidence un effet significatif d'un isolement total des sols par rapport à un isolement partiel, dans le cas de sols reconstitués dans leur intégralité, 20 ans après leur mise en œuvre. En ce sens, la **colonisation** et la **restauration** lombricienne dans des sols reconstitués seraient dépendantes de (1) l'apport d'individus par des matériaux transportés (dispersion passive) mais aussi (2) de la connexion à un potentiel réservoir (dispersion active) (Figure 30). Une étude récente a de plus démontré une plus grande diversité génétique dans des parcelles urbaines entourées par une plus grande proportion d'espaces verts, jouant le rôle de « pas japonais » et de corridors qui faciliteraient la dispersion [18].

Néanmoins, des études complémentaires seraient nécessaires pour **vérifier (1) le caractère franchissable ou infranchissable des barrières anthropiques** qui n'est que supposé à l'heure actuelle (Figure 31), ce qui permettrait de confirmer un isolement « total » et l'impossibilité de flux géniques entre populations séparées, par exemple, par une route ; **(2) l'impact d'un isolement total sur le long terme sur le brassage génétique des populations.** Malgré des modes de reproduction permettant aux communautés lombriciennes d'assurer des brassages génétiques importants avec ou sans fécondation (e.g., polyploïdie, parthénogenèse), il est envisageable qu'un épuisement génétique puisse impacter négativement sur le long terme des populations totalement isolées, au sein d'une surface minimale d'habitat qui reste également à définir. Pour ce faire, des observations directes de terrain par capture-marquage-recapture, ou l'outil génétique peuvent être employés. Cette dernière approche se base sur l'étude de marqueurs moléculaires (i.e., séquences ADN très variables) dont la variation permet de comparer des profils génétiques entre populations voisines, d'identifier d'éventuels brassages génétiques occasionnés par des échanges effectifs, et ainsi de trancher sur l'efficacité de la continuité ou au contraire sur l'importance de la fragmentation. **De cette façon, l'enjeu de la préservation de corridors pédologiques pourrait être affiné, au-delà de l'enjeu de préservation des réservoirs, déjà bien identifié.**

Figure 31 - Arbre de décision pour évaluer la franchissabilité d'une voirie (hypothèses) (Le-febvre, Maréchal et Cluzeau, 2022)



**DÉMARCHE  
MÉTHODOLOGIQUE  
D'INTÉGRATION DE LA  
TRAME BRUNE DANS  
LES PROCESSUS  
D'AMÉNAGEMENT URBAIN**

---

La méthode de caractérisation de la Trame Brune en milieu urbain, développée dans le cadre du programme TRAM'BIOSOL, a montré qu'il est nécessaire en premier lieu d'acquérir une connaissance des caractéristiques pédologiques des sols, y compris dans des secteurs définis comme "artificialisés" au sens du ZAN. Il est alors nécessaire d'imaginer comment cette connaissance pourrait être utilisée dans les processus d'aménagement urbain. Il est à cet égard important de mettre en évidence la chaîne des bénéfices écologiques, économiques, climatiques et sociétaux qui découleraient de la prise en compte des questions de biodiversité des sols dans la fabrique de la ville de demain. Il conviendrait notamment de comprendre (i) quelles sont les étapes des processus d'urbanisation qui seraient concernées et (ii) quels sont les acteurs et métiers qui pourraient intégrer cette connaissance pédologique dans leurs pratiques professionnelles. Pour se faire, deux principaux **champs d'actions** sont à considérer ; (1) le premier concerne l'échelle de la **planification territoriale** et particulièrement l'urbanisme réglementaire, la production des documents d'urbanisme et des orientations programmatiques ; (2) le second, généralement positionné à une échelle plus fine, concerne les **processus d'aménagement de l'urbanisme opérationnel**, c'est-à-dire la production et la réalisation de projets urbains. Pour chacun de ces champs d'actions, il sera indispensable d'évaluer les bénéfices potentiels de l'intégration de la connaissance de la Trame Brune dans les métiers de l'urbanisme et de l'aménagement, mais aussi d'identifier les freins et les leviers qui pourraient se présenter.

## IDENTIFICATION DES LEVIERS D'ACTION À L'ÉCHELLE DE LA PLANIFICATION TERRITORIALE

La première échelle de réflexion pour la prise en compte de la Trame Brune dans la fabrique de la ville est celle de la planification communale et intercommunale. Pour éclairer les pistes d'actions envisageables à cette échelle de territoire, un travail pluridisciplinaire a été réalisé par le **groupe de travail multi-acteurs durant le séminaire n°2** du projet TRAM'BIOSOL qui s'est tenu à Paris les 21 et 22 juin 2023. Les partenaires impliqués dans ce séminaire n°2 avaient participé à notre **séminaire n°1** de restitution du 18 avril 2023 à Paris, rendant compte des travaux présentés dans les chapitres précédents (Parties 1 et 2).

Il ressort de ce séminaire un ensemble de recommandations qui pourraient être intégrées aux différentes étapes du travail de planification urbaine. Le premier constat est que la planification oriente et limite l'usage

d'un sol « surface » seulement en deux dimensions. Or, l'enjeu de la Trame Brune est de considérer également la troisième dimension du sol, son épaisseur, et voire la quatrième si le temps nécessaire à l'(r-)établissement d'un sol fonctionnel est pris en compte. Pour identifier des solutions qui pourraient enrichir les règlements des PLU/i, il apparaît nécessaire de nourrir le diagnostic de territoire avec des connaissances relatives à ladite trame. La première étape est donc de convaincre les décideurs politiques et les urbanistes de la nécessité de réaliser le plus en amont possible un « **diagnostic pédologique territorial** ». Il devra ensuite s'articuler avec les autres diagnostics territoriaux disponibles, afin de mettre en lumière les enjeux convergents et ceux qui sont en contradiction afin que des arbitrages éclairés puissent s'opérer.

Des éléments spécifiques aux sols et à la Trame Brune peuvent ainsi être intégrés à toutes les étapes de la planification et dans les documents associés :

### Pré-diagnostic urbanistique

Ce pré-diagnostic est destiné à **comprendre la dynamique d'urbanisation** et donc de l'altération des sols naturels qui a pu avoir lieu sur le territoire d'étude. Il porte à la fois sur la chronologie du processus de développement de la ville, mais aussi sur la typologie des formes urbaines qui ont été produites à chaque période d'urbanisation. Les formes urbaines s'accompagnent en effet de différentes modalités d'intervention sur les sols qui ont un impact plus ou moins marqué sur l'anthropisation de ces sols. Cette connaissance de la dynamique spatiale et temporelle de fabrication de la ville peut être, soit une donnée déjà existante dans des études urbaines préalables, soit à créer spécifiquement pour le besoin de la démarche de connaissances de la Trame Brune. Ces connaissances nouvelles vont servir à établir un plan d'échantillonnage optimisé d'observations de sols représentatifs de la diversité pédologique de la zone d'étude (agglomération, ville, quartiers, ...).

### Diagnostic pédologique

La méthodologie testée dans le cadre du programme TRAM'BIOSOL et présentée plus haut, permet de définir les contours de réalisation de ce diagnostic. Ce dernier devra ensuite dialoguer avec les autres diagnostics territoriaux disponibles afin de mettre en lumière les enjeux convergents et ceux qui sont en contradiction afin que des arbitrages soient opérés. Il s'agira surtout de **mettre en évidence les secteurs à enjeux sur lesquels une attention particulière pour la protection de la Trame Brune est recommandée**. L'approche du diagnostic pédologique peut être globale à

l'échelle du territoire couvert par le PLU/i, ou par zones à enjeux (OAP, lisières, zones AU, ...). Le choix de l'échelle peut aussi dépendre du niveau de sensibilité des élus sur cette thématique, souhaitant établir un diagnostic couvrant plus ou moins leur territoire, ou plus ou moins détaillé selon les secteurs. Ce diagnostic pédologique pourrait à l'avenir être imposé via le Code de l'urbanisme qui a décliné la loi Climat Résilience en prenant appui sur les objectifs ZAN. Notamment sur les territoires à enjeux d'artificialisation ou de désartificialisation, un diagnostic agropédologique pourrait être rendu obligatoire sur les périmètres d'aménagements. Il constitue en effet pour le moment, un **chaînon manquant** pour orienter le choix des projets (urbanisme, choix des formes urbaines, ...). Il pourrait être réalisé au même titre que les diagnostics de zones humides, les études faune/flore ou Natura 2000, ... Dans l'attente de ce cadre réglementaire, ce n'est que par la sensibilisation, la pédagogie et la persuasion que ce diagnostic pédologique pourra être envisagé.

### **Projet d'Aménagement et de Développement Durable (PADD)**

Le PADD est l'une des pièces maîtresses du PLU. Il doit refléter les nouveaux enjeux réglementaires et politiques et **permettre une prise de conscience de l'importance des sols** dans la stratégie de développement de villes résilientes. A partir d'une évaluation environnementale du territoire, il définit des orientations et des objectifs qui devront se décliner ensuite dans les documents de planification et de programmation. En effet, il présente le projet communal ou intercommunal dans sa globalité en définissant les lignes directrices générales d'aménagement du territoire pour les années à venir, à partir des enjeux identifiés par le diagnostic. Le contenu du PADD précise qu'aux côtés des préoccupations d'urbanisme, de logement et de transport, ce document se doit également de définir des objectifs **(i)** de qualité paysagère, **(ii)** de protection et de mise en valeur des espaces naturels, agricoles et forestiers, **(iii)** de préservation et de mise en valeur des ressources naturelles, **(iiii)** de lutte contre l'étalement urbain, **(iiiii)** de préservation et de remise en bon état des continuités écologiques. Même si la notion de **Trame Brune** n'est pas explicitement citée dans les textes officiels, elle est en fait **en interface avec beaucoup de ces objectifs**. De plus, aujourd'hui, les **enjeux liés à l'application du principe du ZAN** ainsi que ceux d'adaptation des villes au changement climatique, définis dans la loi Climat et Résilience du 22 Août 2021, **donne une véritable légitimité à l'intégration du concept de Trame Brune** pour l'établissement des documents de planification urbaine.

## Zonage et le règlement du PLU

Les orientations présentées dans le PADD doivent ensuite être déclinées dans les pièces règlementaires. La **phase réglementaire** (zonage, règlement écrit et OAP) permet de définir et cadrer le choix des formes urbaines, des matériaux, de l'architecture, des unités de plantation, les surfaces de pleine terre (qui ne précisent pas nécessairement sa profondeur ou ses qualités) ... Le zonage et le règlement cadrent les éléments qui sont demandés lors des permis de construire, conformément aux articles R\*431-4 à R\*431-34-1 du Code de l'urbanisme. Le zonage doit se faire relativement à des indicateurs adaptés à la planification, mais également vérifiables simplement sur le terrain pour leur bonne application. Les enjeux à considérer dans le zonage sont : (i) la valeur patrimoniale et écologique des sols (ii) les secteurs de carences (faible épaisseur - % élevé d'imperméabilisation) (iii) les menaces (secteurs de projets).

Les Orientations d'Aménagement et de Programmation (OAP) constituent des outils d'aménagement du territoire. Dans l'idéal, ces OAP pourraient être inspirées par des données du diagnostic territorial de la Trame Brune :

- **OAP thématique** (biodiversité, Trame Brune par type de forme urbaine...) au service de la qualité de vie.
- **OAP sectorielle** (obligatoire pour le moment sur les zones AU et non obligatoire sur les zones en renouvellement) : définit des règles spécifiques pour des secteurs à enjeux. Elle contient potentiellement aussi les résultats de l'expertise pédologique (portée financièrement par l'EPCI ou les porteurs de projet).
- **OAP thématique** avec secteurs à enjeux : cette catégorie indiquerait que des analyses plus précises, de type diagnostic agropédologique, sont à prévoir par les porteurs de projet dans le secteur, mais aussi que des ratios spécifiques s'appliqueraient, notamment concernant les exigences d'habitabilité des sols. Elles pourraient par exemple être prévues dans le cadre de la commande publique dès lors qu'un projet d'aménagement serait réalisé sous maîtrise d'ouvrage publique. Ces mesures seraient à réaliser par des géomètres formés et/ou des pédologues (quantification précise des surfaces imperméabilisées et des surfaces non imperméabilisables en lien avec la quantification et qualification de l'habitabilité des sols, ...).

Par ailleurs, le règlement du PLU pourrait conditionner l'octroi des autorisations d'urbanisme à des propositions précises sur la limitation des impacts des projets d'aménagement sur le sol concerné, à l'image d'une forme nouvelle du mécanisme des surfaces éco-aménageables (Art. L. 151-22 du Code de l'urbanisme).

## Mise en application du PLU

Une fois le PLU approuvé et opposable, sa mise en application concerne la vérification de la conformité des demandes d'aménagement et des permis de construire par rapport aux attentes et exigences des différents documents de ce Plan. Il est évident que l'évolution des exigences du PLU, notamment quand elles portent sur de nouvelles notions, nécessitent un véritable travail de sensibilisation et de formation des services des collectivités locales en charge de l'instruction des demandes. Cela demande également de prévoir des indicateurs et des outils d'évaluations simples et facilement appropriables et vérifiables par des agents non experts du sujet de la Trame Brune ou de la biodiversité.

## Les besoins de Formation

La mise en application de ces principes se heurte malheureusement à des difficultés d'une compréhension réelle des enjeux et d'appropriation des objectifs méthodologiques permettant de définir la Trame Brune par beaucoup d'acteurs de la planification urbaine. Ce concept de Trame Brune et ses bénéfices attendus pour la réussite des projets de renaturation des villes et d'adaptation au changement climatique doit donc faire l'objet d'un travail pédagogique par des programmes de sensibilisation et de formation. Ces programmes s'adressent logiquement **à tous les acteurs concernés par la planification** : (i) cadres de la fonction publique territoriale aux différents niveaux (ville, EPCI, Départements, Régions), (ii) des décideurs (élus), (iii) services déconcentrés de l'Etat, (iv) acteurs des structures susceptibles d'être des AMO (Assistant à la Maîtrise d'Ouvrage), (v) militants et personnels des associations de protection de la nature et de l'environnement, (vi) secteur professionnel Bureaux d'études, Architectes, Urbanistes, Paysagistes (Ordre des Architectes, FFP, SFU, FNAU, FN CAUE, UPGE, ...) ... Il est également indispensable de construire des modules de contenus théoriques et pratiques pour les différents cursus de formation pourvoyeurs des futurs cadres (pépiniéristes, paysagistes, écologues, géomètres, architectes, aménageurs, urbanistes promoteurs, ...).

## IDENTIFICATION DES LEVIERS D'ACTION À L'ÉCHELLE DE L'AMÉNAGEMENT

La seconde échelle à considérer pour la prise en compte de la Trame Brune dans la fabrique de la ville est celle de l'aménagement. Un autre groupe de travail organisé par l'équipe TRAM'BIOSOL s'est réuni le 6 septembre 2023 afin d'approfondir les réflexions sur le volet **aménagement**.

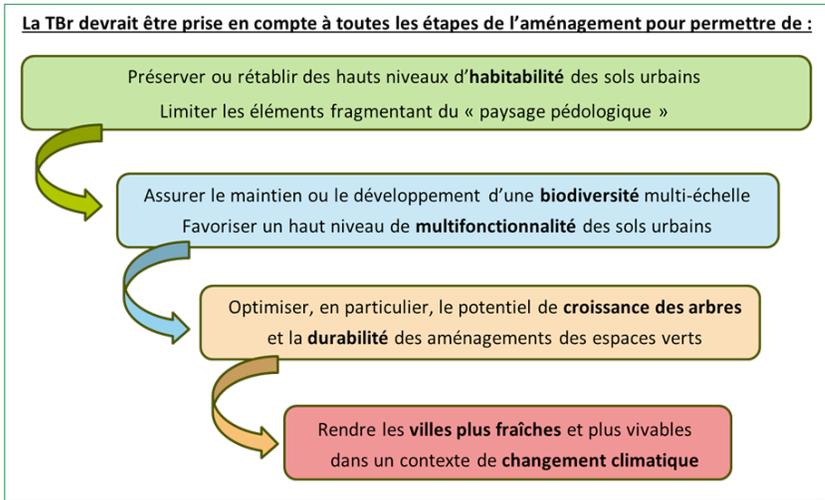
La pratique des projets urbains montre généralement que malgré les ambitions affichées, la Trame Verte et notamment le patrimoine arboré, sont souvent dégradés par les opérations d'aménagement. **La fonctionnalité de la Trame Brune, non visible et généralement non caractérisée, est donc presque toujours altérée par les modalités de réalisation des projets urbains.** Sa prise en compte à défaut d'une législation contraignante nécessite donc un important travail de mobilisation, de sensibilisation et de pédagogie auprès de l'**ensemble des acteurs de la chaîne d'aménagement** (services d'urbanisme opérationnel des collectivités locales, Sociétés d'aménagements, équipes de maîtrise d'œuvre et entreprise en charge des travaux, notamment de terrassement et d'espaces verts). En effet, **l'absence d'obligation réglementaire implique, à l'heure actuelle, de démontrer un intérêt économique de la prise en compte de la Trame Brune, au-delà des intérêts écologiques et de qualité de vie qui sont portés par les documents d'urbanisme.** Il s'agit donc de convaincre que la mise en œuvre d'une Trame Verte pérenne, dont la fertilité s'auto-entretient, sur laquelle la croissance des arbres est assurée et génère donc des aménités positives mesurables (paysage, ombrage, rafraîchissement, qualité de l'air...), nécessite la conception d'une Trame Brune fonctionnelle durable. Il s'agit d'assurer son **habitabilité** (réservoirs de vie biologique des sols) et sa continuité pour assurer les cycles de vie et les déplacements (corridors) de la biodiversité du sol. Par répercussions, les bénéfices apportés par une Trame Brune fonctionnelle assureront aussi la possibilité des bénéfices attendus de la Trame Verte (Figure 32).

Comme pour la planification urbaine, plusieurs étapes-clés jalonnent la réalisation des projets d'aménagement, aussi est-il important d'analyser comment chacune de ces étapes peut être favorable à la prise en compte de la Trame Brune.

### Les études préalables

Les études de sols (diagnostics agropédologiques) ne sont actuellement ni obligatoires ni, à tort, jugées indispensables. Pourtant, elles conditionnent la réussite de l'intégration paysagère de l'opération, mais encore faut-il comprendre l'enjeu de prise en compte du temps long dans la re-création des Trames Vertes. L'objectif sera donc de convaincre de la nécessité de prévoir dans les études préalables, la réalisation d'un diagnostic agropédologique. Ce dernier pourrait de plus être combiné avec les autres analyses du sol (pollution, géotechnique, perméabilité) afin de mutualiser les démarches et les engins nécessaires. Les objectifs seraient alors **(1)** d'intégrer au sein des études préalables, une analyse approfondie des sols dans le cas où aucune donnée n'a été fournie ou alors à une échelle non adaptée (diagnostic agropédologique) ; **(2)** de réaliser un diagnostic

Figure 32 - Intérêts de la prise en compte de la Trame Brune à toutes les étapes de l'aménagement : argumentaire à destination des acteurs de l'aménagement proposé par TRAM'BIOSOL



lombricien à la parcelle confirmant ou non le potentiel fonctionnel du sol et permettant le passage de la modélisation prédictive (envisagée lors de la planification sur échantillons) aux données terrain ; **(3)** d'établir une cartographie des scores "Trame Brune" d'avant-projet : **(i)** profondeur, **(ii)** habitabilité, **(iii)** continuité, **(iiii)** occupation de sol, **(v)** couvert (issu données terrain) qui serviront à définir les enjeux de programmation et de référence pour l'évaluation des projets.

Le produit de sortie des études préalables de sols est donc une représentation cartographique des zonages pédologiques, associée à un scoring par zone dont la moyenne permet d'établir un score global de la Trame Brune locale.

### Programmation et stratégies d'aménagement

Pour que la prise en compte de la Trame Brune soit optimale, il est nécessaire d'avoir une incitation programmatique par la collectivité territoriale compétente, ce qui correspond au 1<sup>er</sup> niveau de la stratégie d'aménagement. Pour que la notion de Trame Brune soit prise en compte, elle doit apparaître dans le contrat de concession d'aménagement comme une demande du concédant, en cohérence avec les OAP éventuelles, afin d'être intégrée dans le programme et le projet futur. Les études préalables

de diagnostic des sols doivent permettre de **produire**, pour la phase de programmation, un **cahier des charges** avec des indications pour préserver la qualité physique, chimique et biologique des sols afin d'optimiser leur habitabilité au moment de leur reconstitution. Mais ce cahier des charges doit également identifier les différents itinéraires techniques envisageables selon le contexte des opérations, afin d'orienter le travail des équipes de maîtrise d'œuvre. La forme urbaine aura aussi un impact majeur sur la valorisation de la Trame Brune tout comme les différents processus d'aménagement associés à chaque type de formes urbaines. La connaissance du sol doit donc être en dialogue avec la définition de la forme urbaine, le plus en amont possible du projet.

### Phase de conception et d'élaboration du projet

Le travail de conception du projet doit intégrer l'objectif d'élaboration d'un modèle théorique de sol reconstitué à forte habitabilité permettant d'assurer la réussite du projet de plantation. Ce modèle intègre deux objectifs complémentaires, (1) un objectif d'habitabilité du sol et (2) un objectif de continuité de la Trame Brune.

En ce qui concerne l'**habitabilité**, elle repose principalement sur le besoin d'une épaisseur suffisante du sol (existant préservé ou recréé) assurant la présence de tous les étages pédologiques nécessaires à la survie des différentes communautés lombriciennes (en tant qu'indicateur du fonctionnement de l'ensemble de la biodiversité du sol), afin qu'elles puissent se développer et assurer les fonctions biotiques ou abiotiques positives pour la fertilité du sol (incorporation de la matière organique) et le cycle de l'eau (action sur les capacités d'infiltration et de rétention en eau du sol).

Pour ce qui est des **continuités** à assurer pour permettre le déplacement des espèces et les flux géniques entre populations, un **indice de connectivité du sol** reconstitué au sein de l'emprise projet (cf. Figure 37) et du sol jouxtant l'emprise projet (c'est-à-dire les potentiels réservoirs de biodiversité) pourrait être créé. Le projet se compose néanmoins d'obstacles entraînant une altération de cette connectivité avec notamment la coupure des bâtiments, des voiries, voire des réseaux. Pour limiter cet effet de barrières interrompant la Trame Brune, il faudra agir sur la géométrie du projet (position des bâtiments par rapports aux corridors pédologiques), mais également imaginer des solutions constructives permettant d'embarquer les fonctions pédologiques du sol dans la réalisation de ces infrastructures (revêtements perméables, drain d'aération, mélanges terre/pierre, ...) (Figures 33, 34 et 35).

Figure 33 - Proposition de projet incluant des adaptations en faveur des continuités écologiques

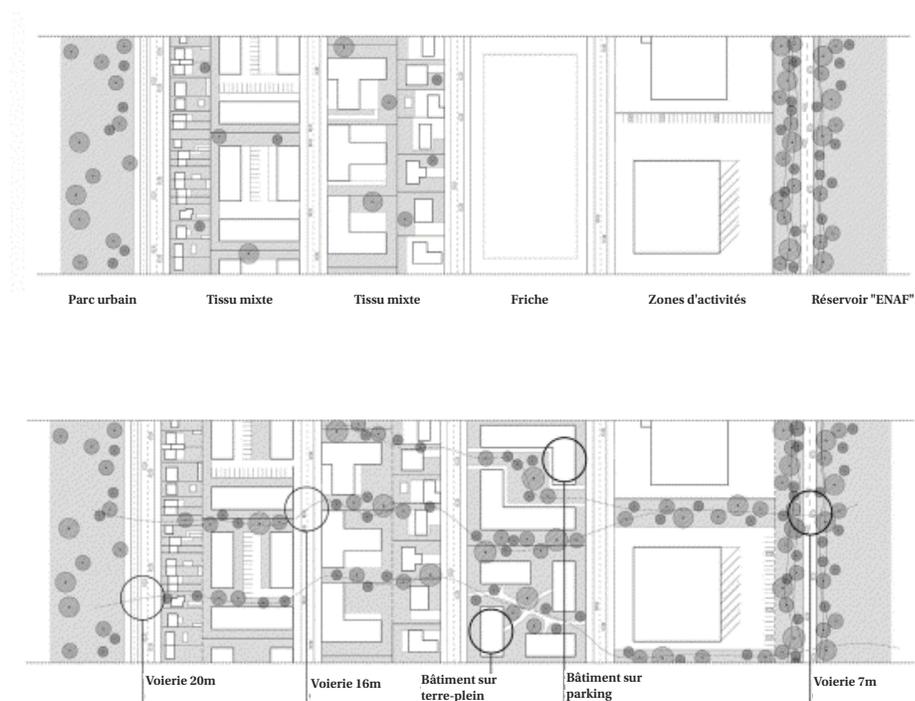
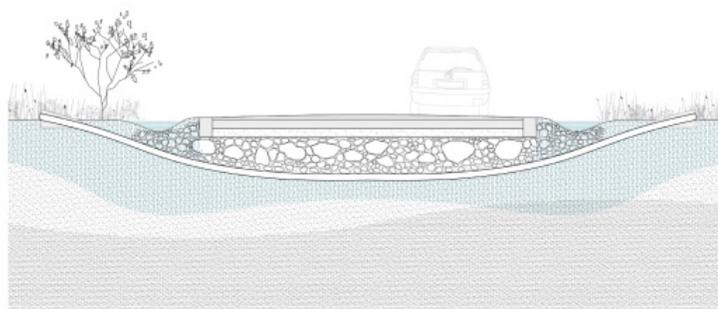
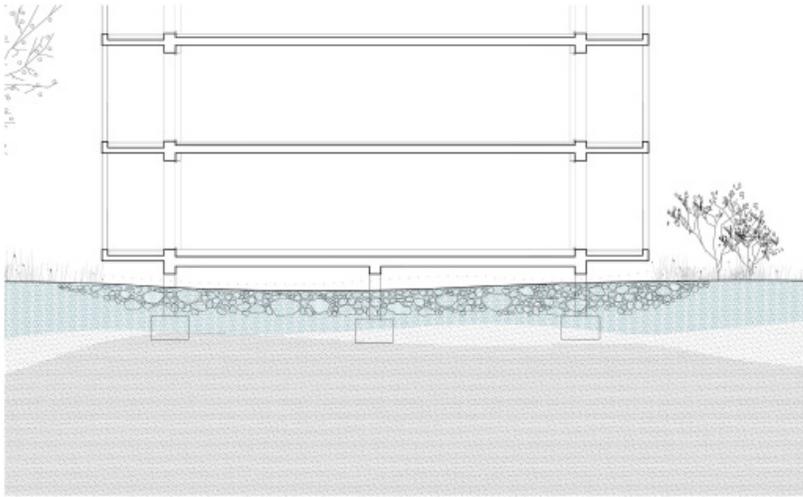


Figure 34 - Exemple d'adaptation constructive pour une voierie



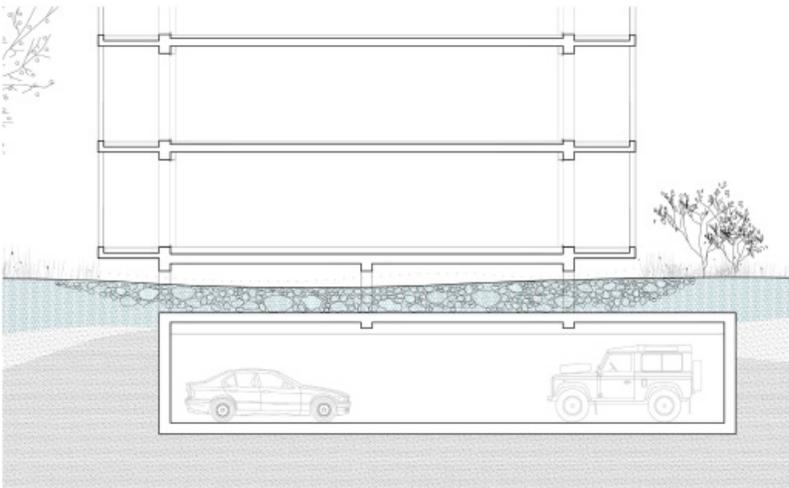
Voierie 7m

**Figure 35 : Exemple d'adaptation constructive pour un bâtiment : la solution sur pilotis pour garder le sol et les racines en place est une technique assez développée au Canada ainsi qu'aux Etats-Unis.**



Bâtiment sur terre-plein

**Figure 36 : Exemple d'adaptation constructive pour un bâtiment avec parking souterrain : Il existe un vide sanitaire sous le bâtiment qui réduit l'impact sur la vie des sols notamment grâce à la circulation de l'air et potentiellement de l'eau.**



Bâtiment sur parking

Sur le même principe, la continuité de la Trame Brune peut s'envisager en couverture d'une infrastructure enterrée. Il suffit alors de garantir d'assurer une profondeur minimale et une continuité du sol mis en place en couverture (Figure 36). Pour que l'habitabilité du sol reste élevée, il est important de penser la relation eau/sol/air/plante sur le long terme, car la stabilité des écosystèmes ne s'acquiert que dans la durée.

### Phase de réalisation du projet

Les pièces contractuelles du marché doivent présenter des préconisations opérationnelles pour le chantier afin de minimiser les impacts sur la Trame Brune (préserver l'habitabilité) et sur la végétation à conserver. Un clôturage fixe des parties à préserver est souvent la seule solution pour mettre en défens certains espaces. La diffusion de ces règles n'étant néanmoins pas une garantie, il est donc nécessaire d'agir sur deux autres leviers : **(1) un levier pédagogique** destiné aux acteurs des entreprises réellement présents sur le chantier et qui n'ont que rarement connaissance des exigences écrites dans les dossiers de consultation ; **(2) l'autre levier** complémentaire indispensable est **financier**, sous forme de pénalités suffisamment dissuasives pour garantir un effort d'organisation et de protection de la part des entreprises.

Une autre phase cruciale à surveiller concerne tous les travaux de terrassement, stockages des terres et reconstitution des sols. Le maître d'œuvre, qui n'est pas toujours expert de ces sujets et des exigences pédologiques, doit alors se faire assister d'un bureau d'étude spécialiste de ces sujets. En effet, ce qui est mal fait au départ est souvent définitivement perdu, et il est illusoire de rechercher a posteriori des solutions correctives.

Enfin, en ce qui concerne plus spécifiquement les exigences liées à la Trame Brune, l'évaluation de la conformité des ouvrages pédologiques devra analyser l'habitabilité potentielle des sols, car à la livraison, il n'y aura pas encore les abondances et les richesses taxonomiques de tous les vers de terre indicateurs qui s'installent successivement dans le temps. Il faudra également, en ce qui concerne les arbres plantés en motte, vérifier les communautés lombriciennes issues des pépinières. Des modèles prédictifs en cours de réflexion permettront sans doute prochainement d'avoir des idées de la cinétique de remise en place d'un équilibre de la biodiversité lombricienne des sols reconstruits. Néanmoins, il faut penser que ce temps d'évaluation de la refonctionnalisation écologique des sols ne pourra s'évaluer qu'au bout de plusieurs années.

## Exploitation ultérieure de la Trame Verte et de la Trame Brune par le gestionnaire

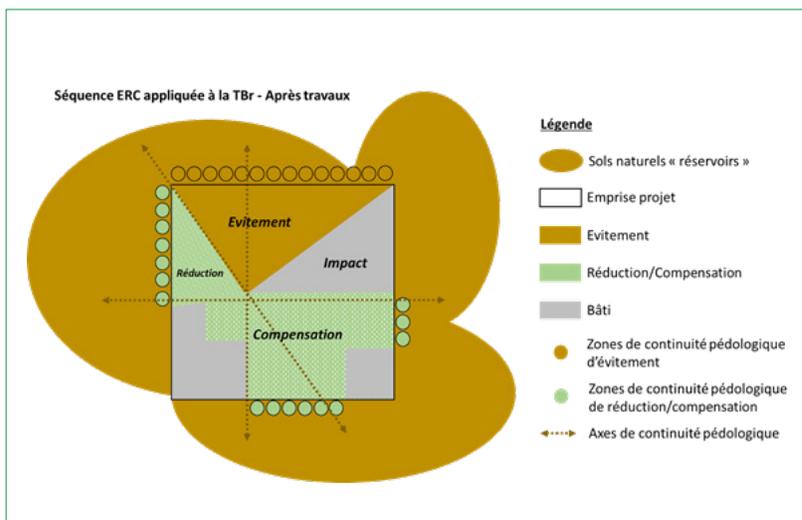
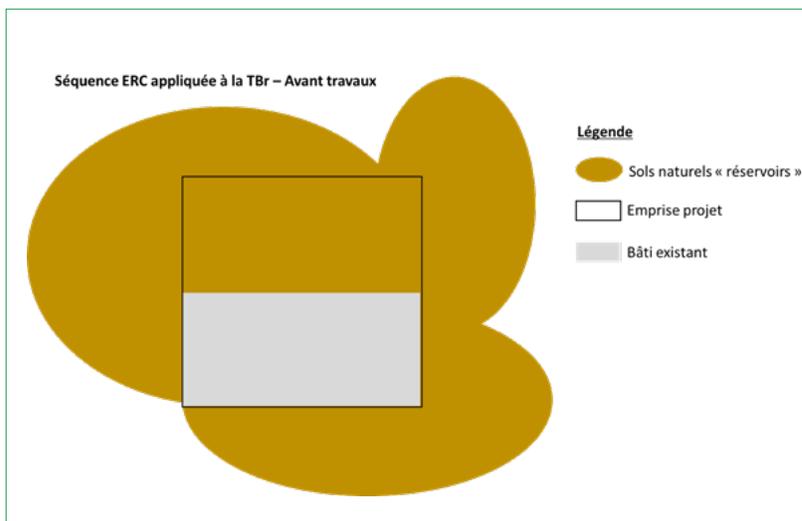
Le projet doit également donner des clés pour accompagner le travail du gestionnaire vers l'état d'équilibre de la trame paysagère recherché. Un projet de paysage ou de renaturation n'est pas achevé lors de sa réalisation, il débute seulement ! La prise en compte de la dynamique du paysage est donc une nécessité malheureusement trop souvent oubliée par les équipes de maîtrise d'œuvre qui connaissent assez mal généralement les techniques et enjeux liés à l'entretien des formes paysagères. Un **dialogue entre la conception et la gestion** doit donc également exister tout au long du projet pour permettre d'envisager cette dynamique temporelle d'évolution du paysage. En ce qui concerne l'évaluation de la réussite de l'installation de la Trame Brune, il sera intéressant que le gestionnaire s'approprie également un protocole de suivi. Cette évaluation se fera à +5 ans et/ou +10 ans après l'installation des sols, et portera sur l'étude des communautés de vers de terre, mais aussi sur les dynamiques de croissance des plantations, les deux permettant d'estimer le niveau de fertilité atteint par le sol.

## Lien avec la séquence ERC dans le projet d'aménagement

Si on considère que les enjeux juridiques actuels liés à la biodiversité, concernent également les espèces animales qui sont présentes dans les sols, alors l'application de la logique ERC peut s'appliquer finement à la prise en compte de la biodiversité des sols dans les projets d'aménagement (Figure 37).

- **Evitement** : il s'agirait de mettre en application la démarche proposée par le programme TRAM'BIOSOL par une identification des zones de l'emprise de projet selon les différents degrés de fonctionnalité de la Trame Brune, en termes de continuité/discontinuité et obstacles à franchir et d'habitabilité. L'habitabilité définissant la qualité du réservoir comme habitat favorable à la biodiversité, ce degré d'habitabilité des sols est classé en 3 à 5 classes. Après Identification des zones avec le degré d'habitabilité de plus élevée, il conviendrait de recommander d'éviter de modifier ces sols pour éviter la dégradation des habitats favorables à la biodiversité. Le maintien de l'habitabilité des sols et l'évitement de sa dégradation nécessitent la décision de mesures conservatoires.
- **Réduction** : cette partie concerne majoritairement les processus de travaux. Il s'agit d'identifier et de formaliser des recommandations et exigences techniques à inscrire dans le projet d'aménagement et à traduire dans les pièces de ses marchés de travaux. Les

Figure 37 - Exemple de séquence ERC appliquée à la Trame Brune (propositions TRAM'BIO-SOL)



objectifs porteront sur les moyens de minimiser pour les sols excavés, l'impact des travaux d'excavation, de stockage et de remise en œuvre. Il se complète d'une recherche dans la planification du projet, de conditions permettant la connexion entre habitats préservés et remaniés.

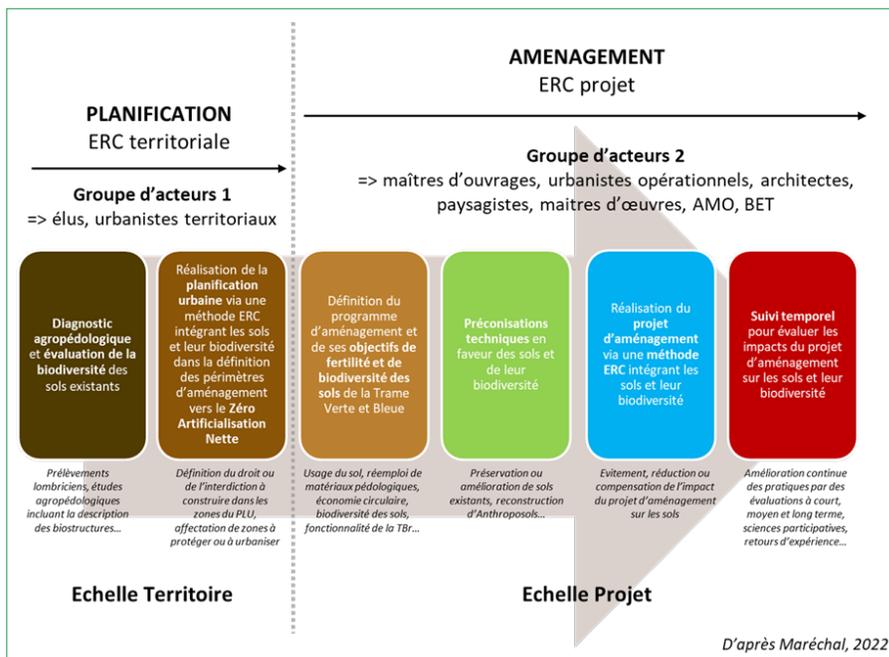
- **Compensation** : même si elle doit être limitée et considérée comme le choix ultime, elle est malheureusement une réalité de la démarche d'aménagement urbain soumis à des injonctions souvent contradictoires. Elle concerne par exemple, le démontage du sol et sa remise en forme à un autre endroit dans une logique de désartificialisation. D'où le besoin de connaître les secteurs à renaturer et les besoins liés au renforcement des continuités de la Trame Verte. Là également, des recommandations et des exigences techniques doivent être clairement précisées dans les documents du projet afin de reconstituer des sols à forte habitabilité potentielle et de reconstruire des connexions. Des techniques d'inoculation (bactéries, champignons, vers de terre, ...) sont à tester pour accélérer la refonctionnalisation écologique de ces néo-sols.

En conclusion, en ce qui concerne la partie opérationnelle de la fabrique de la ville, il existe de nombreuses pistes de solutions organisationnelles, conceptuelles et techniques, qui rendent possible la prise en compte de la **Trame Brune comme** complément des mesures en faveur de la biodiversité, mais surtout comme **garantie de réussite de l'installation d'une Trame Verte** pouvant maximiser des bénéfices écosystémiques.

Aussi est-il aujourd'hui nécessaire de sortir du champ de la recherche pour développer des indicateurs opérationnels adaptés à chaque étape de la fabrique de la ville, de la planification territoriale à l'aménagement et jusqu'au suivi de son devenir dans le temps.

Il nous semble donc que les approches et recommandations produites dans ce chapitre pourraient alimenter l'approche réglementaire des Trames Verte et Bleue des documents d'urbanisme, en permettant d'aller vers une évolution de la définition de la Trame Verte qui inclurait la Trame Brune comme support de cette même Trame Verte (Figure 38). L'objectif de maximiser les services écosystémiques associés à la végétation, notamment par rapport aux enjeux de lutte contre les îlots de chaleur et de rafraîchissement de la ville, est la principale valeur ajoutée qui serait apportée aujourd'hui par la prise en compte de la Trame Brune.

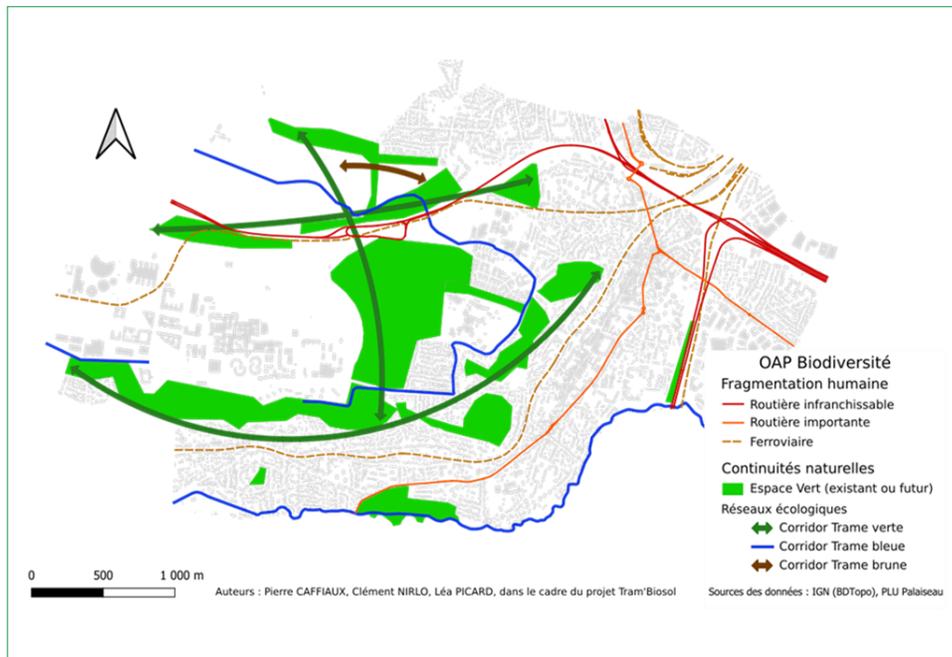
Figure 38 - Echelles de prise en compte des sols et de leur biodiversité pour la planification et l'aménagement



## LE CAS D'ÉTUDE DE LA COMMUNE DE PALAISEAU : QUELLE STRATÉGIE FONCIÈRE OPÉRER ?

Sur le territoire de la commune de Palaiseau, une étude a été menée afin d'analyser la possibilité d'intégrer la Trame Brune dans les documents d'urbanisme. Parmi les documents du PLU de la commune de Palaiseau, le secteur d'une OAP a été plus particulièrement étudié. Il s'agit de l'OAP « Plateau (Croix de Villebois) » qui présente des enjeux significatifs en matière de préservation et de mise en valeur de la Trame Verte. L'idée serait d'introduire une **OAP thématique Biodiversité** dans le PLU de Palaiseau qui intégrerait les enjeux de prise en compte de la Trame Brune, et qui devrait dialoguer avec une **OAP Mobilité**, car les axes de communication sont souvent des éléments de coupure des continuités écologiques. Cette modélisation a été pour le moment appliquée au secteur du territoire retenu pour l'étude.

Figure 39 - Exemple d'OAP Biodiversité

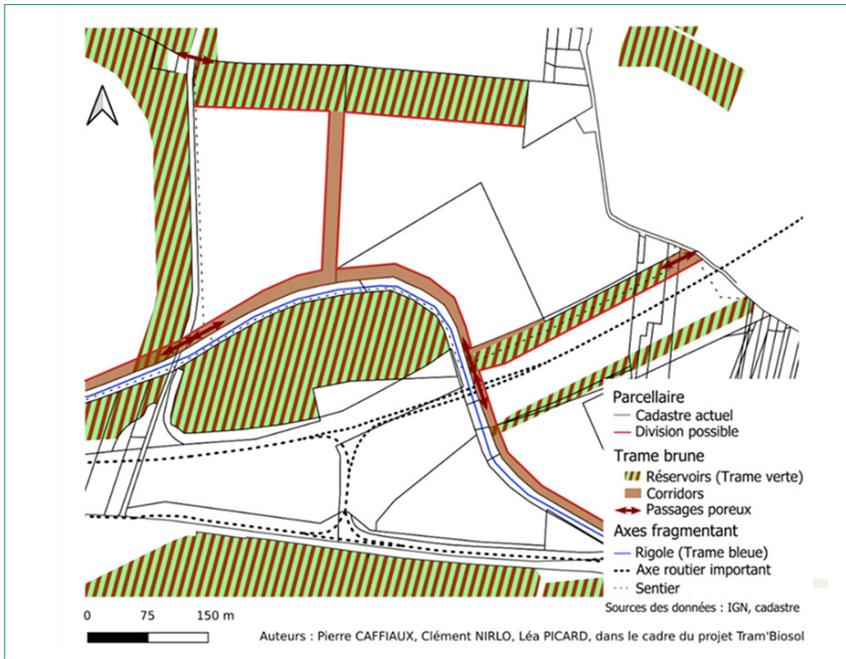


La représentation ci-dessus montre comment cette prise en compte peut être illustrée dans les documents de planification. La Trame Brune est en effet la condition même d'existence de la Trame Verte et permet d'élargir la prise en compte des enjeux de biodiversité (Figure 39).

Dans un contexte urbanisé, il est facilement imaginable d'avoir une bande de terrain en fond de parcelle, s'étendant de part et d'autre de la limite, avec dans le règlement écrit, la limitation du travail de la terre et des clôtures n'ayant pas de semelles filantes. Dans un contexte agricole, cette solution est moins intéressante. Une bande traversant un champ où le labour serait interdit va à l'encontre des pratiques de culture actuelles.

Afin de matérialiser dans les documents de planification l'objectif de pérennisation de la Trame Brune, il est important d'analyser la matrice cadastrale afin de voir si la géométrie du parcellaire est compatible avec les notions de continuité du sol vivant. Ce découpage du parcellaire doit être également analysé en lien avec la diversité des propriétaires présents et la répartition entre la nature publique ou privée des propriétaires. Cette

Figure 40 - Matérialisation de la Trame Brune dans une logique de maîtrise foncière



connaissance précise permet de proposer des stratégies foncières adaptées à la préservation de la continuité de la Trame Brune.

Le schéma ci-dessus illustre une hypothèse de matérialisation de la Trame Brune dans une logique de maîtrise foncière (Figure 40).

L'hypothèse d'une maîtrise totale du foncier par une stratégie d'acquisition foncière apparaît d'office comme complexe, difficilement justifiable et finalement souvent non adaptée. Une logique de découpage du foncier permettant d'identifier la continuité écologique de manière plus pertinente sur le parcellaire, afin de lui appliquer un zonage de protection de la Trame Verte spécifique semble plus réaliste (Figures 41 & 42). Reste à identifier quels outils de maîtrise foncière conviendraient pour s'assurer de la pérennisation de ladite trame.

Figure 41 - Exemple de divisions parcellaires intégrant un corridor écologique

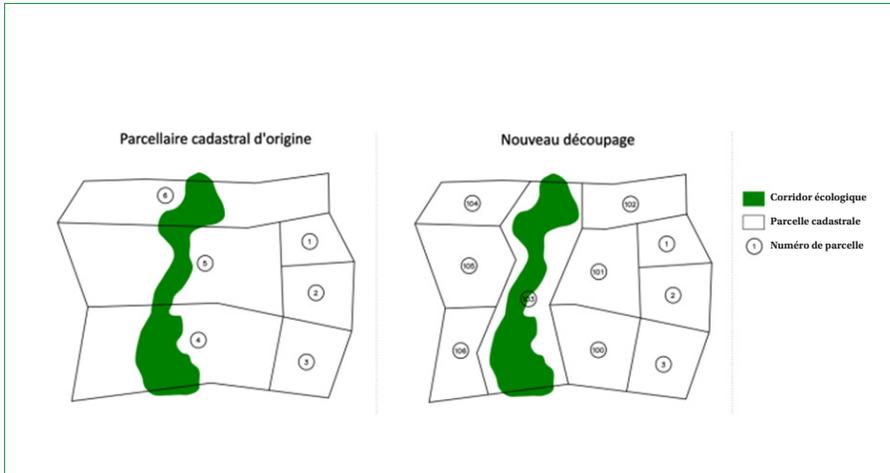
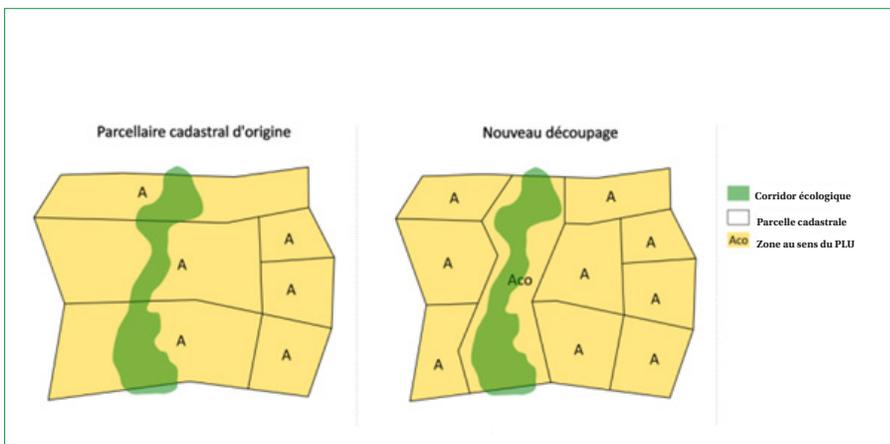


Figure 42 - Exemple de nouveau zonage considérant les corridors écologiques

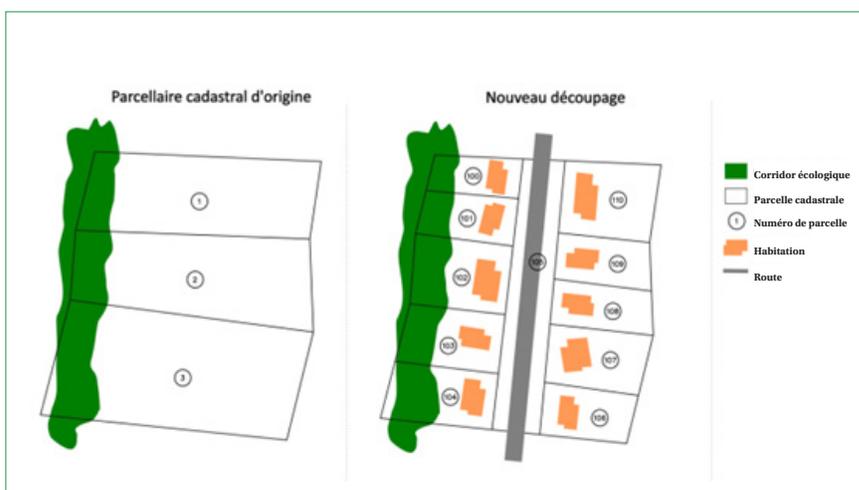


L'acquisition foncière présente à cet égard des inconvénients notables. En plus d'être coûteuse à l'achat, la gestion et l'entretien des parcelles restent à la charge de la personne publique. Il faudrait par ailleurs, soit que le propriétaire consente à la vente, soit que le bien soit mis en vente et compris dans un périmètre de préemption, soit enfin que le bien puisse être exproprié (ce qui questionne sur la légalité de la déclaration d'utilité publique). Les servitudes d'urbanisme entraînant l'inconstructibilité d'un bien ne sont pas indemnissables, ce qui les rend difficilement acceptables par les propriétaires qui les subissent.

Ces espaces, au lieu d'être mis en réserve, pourraient être vendus à des tiers, qui constitueraient un ensemble de jardins privatifs sur lesquels des prescriptions d'urbanisme, des prospects, un règlement spécifique ou un cahier des charges de lotissement peuvent être appliqués.

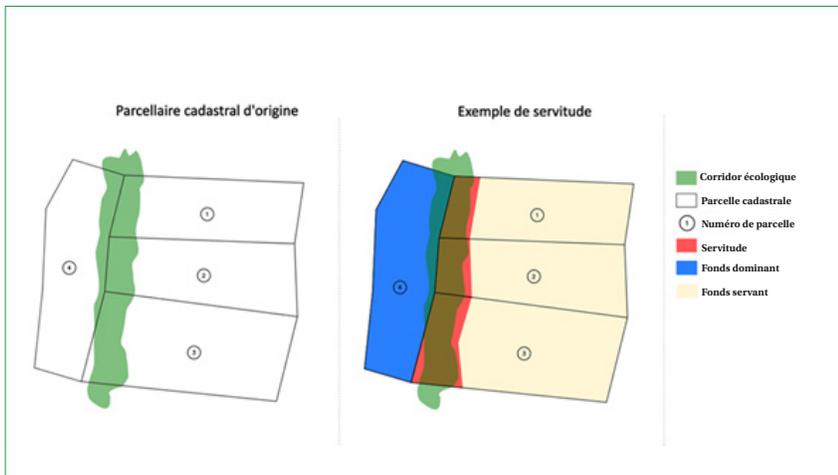
L'agencement du foncier va alors ici être impacté et pensé selon ce règlement. Enfin, l'aménagement pourrait être pensé dans le cadre de la législation relative au lotissement et le passage de la Trame serait préservé par l'aménageur ; ensuite, sa pérennisation serait assurée par le règlement du lotissement. Ce qui, éventuellement, pourrait par la suite, faire obstacle à des projets de densification (Figure 43).

Figure 43 - Exemple de division foncière intégrant un corridor écologique au sein d'un lotissement



Enfin, la maîtrise de la continuité de la Trame Brune peut être envisagée avec l'**utilisation d'un mécanisme de servitude**, plus souple et ne nécessitant pas un contrôle total du foncier. Il existe différents mécanismes de servitude : la **servitude conventionnelle** peut être envisagée s'il existe un fonds dominant et un fonds servant<sup>2</sup> ne pouvant être réunis dans les mains d'un même propriétaire. Étant donné le découpage foncier existant, il y aura nécessairement autant de servitudes que de parcelles traversées par la Trame Brune, qui seraient définies, chacune, comme fonds servant (Figure 44).

Figure 44 - Exemple de servitude



Du fait de son objectif ci-présent, la servitude conventionnelle n'a d'intérêt que si elle est continue entre différents espaces servant de réservoir à la Trame Brune. Cette servitude vise donc à relier ces réservoirs, par ce type de corridor, afin de favoriser un brassage génétique des populations sur le long terme.

<sup>2</sup> Le fonds (ou le terrain) est dit dominant lorsque la servitude est créée à son avantage. Le fonds est servant lorsqu'il supporte la servitude, sans que cela crée un avantage pour le propriétaire du terrain.

Autre forme de servitude, le mécanisme de création d'une **servitude dite écologique ou environnementale** ayant un objectif exclusivement de préservation de l'environnement est actuellement à l'étude. Elle se rapproche de celui d'**obligation réelle environnementale** (Art. L. 132-3 du Code de l'environnement) et pourrait trouver des applications dans certaines situations pour la préservation de la Trame Brune.

Enfin, par le biais d'une loi, une **servitude d'utilité publique** ayant pour objet la préservation des sols pourrait être créée (en prévoyant un mécanisme d'indemnisation).

**En conclusion**, plusieurs mécanismes de maîtrise foncière et de réglementation des usages par le droit de l'urbanisme sont mobilisables, mais leur pertinence dépend du contexte foncier. Plusieurs mécanismes pourront d'ailleurs s'imaginer de manière combinée dans la mise en place d'une stratégie territoriale de protection. Ils pourront enfin être complétés par des outils contractuels pour assurer la pérennité dans le temps de la Trame Brune.

Ainsi, si la prise en compte de la Trame Brune est envisagée d'un point de vue politique, technique ou peut-être demain réglementaire, sa prise en compte dans l'élaboration des documents de planification urbaine est tout à fait possible, pertinente et souhaitable. Sa prise en compte nécessite néanmoins une approche différente et complémentaire de celle des Trames Verte et Bleue. Alors que la Trame Brune est moins facilement perceptible au premier abord car située dans la matrice du sol et non pas au-dessus, à la vue de tous.

Notre étude TRAM'BIOSOL montre que la caractérisation de la Trame Brune à l'échelle de la ville est possible, même hors des espaces naturels et agricoles, y compris sur les espaces déjà urbanisés. Une fois cette connaissance globale acquise, l'analyse de la Trame Brune met en évidence des **secteurs de fragilité sur lesquels doivent se focaliser des prescriptions** particulières à intégrer aux documents de planification urbaine. C'est cette possibilité qui a été notamment analysée sur le secteur de la Commune de Palaiseau, et qui montre que le croisement de plusieurs outils réglementaires (PADD, OAP, Zonage, ...) permet d'apporter un cadre précis pour la traduction dans l'opérationnalité de la prise en compte de la Trame Brune.

# CONCLUSION ET PERSPECTIVES DE L'ÉTUDE TRAM'BIOSOL

---

## TRAME VERTE ET TRAME BRUNE, DES TRAMES SUPERPOSÉES OU COMPLÉMENTAIRES ?

D'après le modèle conceptuel de la Trame Brune développé dans notre projet TRAM'BIOSOL, **la Trame Brune est incluse dans la Trame Verte**. La Trame Verte urbaine est définie par l'ensemble des espaces végétalisés utilisés par des organismes invertébrés ou vertébrés vivant à la surface du sol, capables de se déplacer de plusieurs centaines de mètres/an et disposant le plus souvent de pattes et/ou d'ailes. Ces invertébrés trouvent leurs ressources trophiques et/ou un espace de protection contre les prédateurs au sein des communautés végétales. La localisation des espaces végétalisés de la Trame Verte permet en effet de cartographier les surfaces de sols capables d'assurer une production primaire de ressources alimentaires pour la biodiversité du sol, et d'identifier ainsi une Trame Brune potentielle.

Cette Trame Brune concerne cependant des organismes plus contraints en termes de déplacements et de ressources alimentaires, les taxons usagers de la Trame Brune étant associés au sol durant toute la durée de leur cycle biologique (espèces géobiontes). De plus, à la différence des taxons utilisateurs de la Trame Verte, ceux de la Trame Brune n'auront accès qu'à certains espaces végétalisés interconnectés du fait de leur faible capacité de dispersion et de franchissement de barrières anthropiques. Ainsi, **la distinction entre Trame Verte et Trame Brune est dépendante du choix de l'organisme-modèle permettant de répondre à telle ou telle problématique.**

**Les réservoirs de la Trame Brune sont également à distinguer de ceux de la Trame Verte.** A l'échelle des organismes du sol, des surfaces de 100 à 500 m<sup>2</sup> constituent déjà des paysages de grande dimension pour ces taxons. En effet, du fait des faibles vitesses de déplacement des communautés lombriciennes, 1.5 à 14 mètres par an environ [7], elles sont susceptibles de coloniser sur le long terme des réservoirs de surface relativement restreinte comparativement aux réservoirs de Trame Verte qui peuvent s'étendre sur plusieurs dizaines de km<sup>2</sup>. La surface minimale d'un réservoir, nécessaire au maintien des communautés lombriciennes sur le long terme, n'est cependant pas encore bien délimité dans la littérature scientifique [18]. Néanmoins, **un réservoir de Trame Brune doit constituer un milieu de vie favorable au maintien et au développement des communautés lombriciennes, c'est-à-dire à niveau d'habitabilité élevé.**

## CARTOGRAPHIER ET PRÉSERVER LA TRAME BRUNE URBAINE

Au regard de l'étude TRAM'BIOSOL, plusieurs enseignements peuvent être retenus pour identifier, préserver et restaurer la Trame Brune urbaine :

- La **cartographie de la Trame Brune** ne fait sens à l'heure actuelle que par l'identification de zones à haut potentiel d'habitabilité (i.e., potentiels réservoirs). Cette identification de réservoirs de biodiversité édaphique nécessite une connaissance urbanistique, historique et pédologique fine afin d'aboutir à une carte des sols à l'échelle d'une commune voire de ses quartiers (1/10 000e voire 1/5 000e) et ainsi à une carte de la Trame Brune potentielle, permettant d'identifier des zones à enjeux qui pourraient faire, ensuite, l'objet d'un diagnostic des communautés lombriciennes.

- La **préservation et/ou la restauration de la Trame Brune** peut d'ores et déjà suivre des règles de décision simples à l'issue du diagnostic lombricien, à savoir (1) **mettre en défends les réservoirs lombriciens avérés** ; (2) **restaurer les communautés lombriciennes dans les zones déficitaires** (e.g., sols partiellement ou totalement dégradées, remaniées récemment...). Dans cette dernière situation, plusieurs cas de figure peuvent se proposer :

- Les sols présentent une **habitabilité élevée** et sont **en connexion avec un réservoir** : il est hautement probable que les communautés se restaurent naturellement à partir d'un pool d'espèces existant et/ou par colonisation (dispersion des lombriciens par leurs propres moyens), à condition que les communautés aient pu bénéficier d'un temps suffisant long permettant leur restauration ;

- Les sols présentent une **habitabilité élevée** et **ne sont pas en connexion avec un réservoir** : (1) les communautés peuvent se restaurer uniquement à partir d'un pool d'espèces qui aurait été préservé dans des horizons profonds, ou (2) aucun pool d'espèces n'a pu être préservé (e.g., reconstitution d'un sol profond) ; dans ce cas, des techniques d'inoculation permettraient de compenser un déficit d'abondance ou de catégories écologiques à un instant t. Dans la limite d'un milieu d'accueil favorable, il peut s'agir d'introduction de lombriciens adaptés au milieu d'accueil par prélèvements dans un milieu naturel local [15], ou encore d'implantation dans le sol d'accueil, de blocs de sols contenant des lombriciens [19,20,21].

- Les sols présentent une **habitabilité faible** : des solutions d'ingénierie pédologiques peuvent être mises en œuvre pour produire des sols à niveau d'habitabilité plus élevé, c'est-à-dire respectant les critères pédologiques et physico-chimiques nécessaires à l'atteinte d'une habitabilité élevée à très élevée (cf. Habitabilité des sols). Les cas de figure précédents peuvent ensuite être remobilisés.

## LES ENJEUX DE LA PRISE EN COMPTE DE LA TRAME BRUNE DANS LA FABRIQUE DE LA VILLE

Jusqu'à récemment, la question des sols ne se posait pas véritablement dans les processus amont de développement urbain. Les sols naturels ou agricoles situés en périphérie des villes ont longtemps été considérés comme de simples réserves foncières dont la seule valeur sociétale était de permettre l'extension urbaine, aussi bien en zones urbaines que rurales. Depuis les années 1960, l'étalement urbain a ainsi détruit ou dégradé ces sols fertiles qui avaient nourri ces mêmes villes pendant des siècles après leur installation tout en leur prodiguant d'importantes aménités environnementales. La prise de conscience progressive, à partir des années 2000-2010, de l'enjeu de préserver les surfaces et les potentialités des sols a conduit à l'intégrer dans la loi dite Climat et Résilience (2021) qui a défini l'objectif de Zéro Artificialisation Nette des sols (ZAN) à l'horizon 2050.

L'intégration d'une Trame Brune dans les processus de fabrication de cette nouvelle ville est nécessaire dès la planification, afin de garantir la détermination de projets en accord avec les services rendus par les sols non imperméabilisés. En outre, dans un contexte de renaturation comptabilisée au titre du ZAN, la désartificialisation de sols dans l'enveloppe urbaine pourrait contribuer in fine à la reconstitution d'une Trame Brune fonctionnelle. Parmi les fonctions du sol, la fonction « habitat pour la biodiversité » est centrale. En effet, la réalisation des fonctions du sol est en grande partie assurée par la biodiversité du sol, grâce à des interactions complexes, trophiques et non trophiques, entre les composantes biotiques et abiotiques du sol. Pour évaluer le fonctionnement biologique des sols, le bioindicateur lombricien est ainsi apparu comme pertinent au regard de son statut d'espèce « clé de voûte » et « ingénieur des écosystèmes » (cf. Le ver de terre comme taxon cible de la TBU).

Néanmoins, au sens du Code de l'environnement, l'absence de cadre juridique protégeant les sols « pour eux-mêmes », ajoutée au manque de formation et de sensibilisation des acteurs de l'aménagement (élus, aménageurs, urbanistes, architectes, ...) en relation aux enjeux fonciers, n'en-

couragent pas l'intégration des multifonctionnalités de tels sols dans les processus d'aménagement urbain. A ce jour, l'intégration de la Trame Brune dépend d'approches volontaires portées par des acteurs attentifs à ces aspects nouveaux de la préservation d'un cadre de vie urbain résilient. Ces démarches gagneraient à être généralisées, ne serait-ce que pour garantir la fonctionnalité de la Trame Vertes d'ores et déjà identifiée dans le SRCE.

La prise en compte de la Trame Brune aux échelles de la planification et de l'aménagement, a pour objectif de préserver et/ou de restaurer la biodiversité des sols susceptible d'optimiser l'ensemble des bénéfices en décollant.

La préservation/restauration de la biodiversité des sols, évaluée à partir des vers de terre dans notre cas d'étude, passe par la prise en compte, dans les démarches de planification et d'aménagement, des deux facteurs limitants de la Trame Brune mis en évidence dans les [chapitres 1 et 2](#) : (1) l'habitabilité et (2) la continuité des sols (cf. 1.3).

Il semble d'abord nécessaire de clarifier, à l'échelle de la planification urbaine, les notions de ZAN et de Trame Brune. En effet, l'étude de la Trame Brune soulève deux incohérences majeures par rapport aux concepts associés au ZAN :

- Tout d'abord, la métrique de l'évaluation du ZAN porte sur un pas de 2500 m<sup>2</sup> : or, la Trame Brune se qualifie et se cartographie à des échelles plus fines, sur des espaces beaucoup plus petits.
- Ensuite, il n'existe aucune cohérence entre la Trame Brune, dans sa réalité fonctionnelle, et les critères arbitraires d'attribution d'un caractère artificialisé ou non d'un sol, tels qu'ils ont été définis avec le couple "couverture et usage du sol" de la nomenclature OCSGE (OCcupation du Sol à Grande Echelle). Ainsi, un sol artificialisé au sens de la nomenclature du ZAN n'implique pas nécessairement une absence de Trame Brune fonctionnelle. Ces deux notions ne portent donc pas sur le même objet.

Les postulats du ZAN définis à l'échelle de la planification peuvent être mis de côté dès lors que l'on rentre dans la logique du projet. La méthode d'évaluation du ZAN à l'échelle du projet reste en effet à inventer. TRAM'BIOSOL apporte des premiers éléments de réponses opérationnelles en prenant en compte la couverture pédologique grâce à :

- (1) Des études de terrain, qui ont permis d'introduire le concept d'anthropisation des sols : cette anthropisation conduisant à des niveaux fonctionnels très variables de ces sols. Ainsi, des sols fortement anthropisés peuvent être très habitables et fertiles.

- (2) Des cartes des sols et des cartes thématiques telle que la carte de la Trame Brune potentielle et de son habitabilité potentielle.
- (3) Des prélèvements lombriciens sur le terrain permettant de vérifier l'habitabilité réelle des sols, et donc vérifier les hypothèses théoriques d'habitabilité potentielle. Il a ainsi été constaté que dans le cas d'une forte habitabilité du sol, quel que soit son état d'anthropisation, les discontinuités ne génèrent que peu d'effet sur le maintien et la diversité des populations. La question des flux géniques sur le long terme entre des espaces discontinus se pose néanmoins.

Il ne peut pas y avoir de compréhension de la Trame Brune, ni de la relation entre forme urbaine et biodiversité des sols sans cartographie et évaluation des sols réalisée à l'échelle des quartiers, permettant de définir notamment l'habitabilité potentielle de ces sols pour la biodiversité. Ces premiers résultats montrent le formidable intérêt qu'il y aurait à mieux connaître les fonctions des sols (habitabilité, fertilité, ...) au sein de la zone artificialisée de la ville qui apparaît aujourd'hui en blanc dans les cartes pédologiques. A l'avenir, un fort besoin de connaissances des sols à de grandes échelles (1 :5000e ou 1 :10 000e) peut être espéré pour mieux combiner forme urbaine et biodiversité dans les grands projets urbains. Ce sera néanmoins aux acteurs de l'aménagement, s'ils sont convaincus, de prendre en charge l'acquisition de la connaissance de la biodiversité des sols.

Cette connaissance, une fois acquise, permettrait par rétroaction de discuter du ZAN sur des bases concrètes à l'échelle du projet, en intégrant notamment les fonctions remplies par ces sols. C'est donc une possibilité de traduire le ZAN plus finement à l'échelle du projet, au regard de sa définition fonctionnelle, qui ouvre l'opportunité de décliner la réglementation de la loi à l'échelle du projet. Cette traduction pourrait s'opérer (i) par une recherche d'un équilibre ZAN évaluée à l'échelle du projet, (ii) par l'application du principe ERC. Les surfaces et proportions du projet correspondant aux logiques d'évitement, de réduction et de compensation peuvent être facilement évaluées grâce à la connaissance des sols. Enfin, cela voudrait dire qu'il faudrait intégrer aux études d'impact, une cartographie des sols qui permettrait de rendre compte de l'incidence réelle du projet en cohérence avec l'objectif ZAN.

Il faudra également stabiliser et préciser la **notion de pleine terre**. En effet, la séquence ERC ne pourra s'appliquer qu'aux grands projets soumis à étude d'impact : comment faire le lien entre la notion de Trame Brune et celle de pleine terre ? Par exemple, les exigences en matière de pleine terre pourraient être utilisées lors de la définition de la Trame Brune pour des petits projets diffus.

Il sera nécessaire de combiner l'approche ERC et l'application du ZAN dans les grands projets, ainsi que la maîtrise de la Trame Brune dans les projets diffus avec les exigences de pleine terre, avant d'envisager de nouvelles logiques de composition des projets urbains qui tiennent compte de la fonctionnalité de la Trame Brune. Cette ambition porte tant sur la conception des projets de reconstruction de la ville sur elle-même, que sur les processus de gestion ultérieurs, pour entretenir et stimuler la vie biologique des sols par l'adaptation des pratiques d'entretien.

Les deux questions suivantes restent néanmoins toujours sans réponse :

- Comment répondre à la difficulté pour les cartographes des sols urbains de rendre compte de la complexité et de la diversité des sols urbains ?
- Comment sensibiliser et acculturer les acteurs de l'aménagement de la ville pour qu'ils comprennent les enjeux de prise en compte de la Trame Brune et consentent à commander ces études ?



# BIBLIOGRAPHIE

- [1] Hinsinger P. *La vie cachée des sols*. 2024. Editions Quae.
- [2] Pörtner, H.O., Scholes, R.J., Agard, J., Archer, E., Arneth, A., Bai, X., Barnes, D., Burrows, M., Chan, L., Cheung, W.L., Diamond, S., Donatti, C., Duarte, C., Eisenhauer, N., Foden, W., Gasalla, M. A., Handa, C., Hickler, T., Hoegh-Guldberg, O., Ichii, H.T., 2021. Scientific outcome of the IPBES-IPCC co-sponsored workshop on biodiversity and climate change.
- [3] <https://artificialisation.biodiversitetousvivants.fr/>
- [4] <https://www.mayenne.gouv.fr/Actions-de-l-Etat/Amenagement-durable-urbanisme-construction-patrimoine/Planification/Zero-artificialisation-nette-ZAN-comment-protger-les-sols#:~:text=L'objectif%20ZAN%20consiste%20%C3%A0,artificialis%C3%A9s%20sur%20le%20territoire%20concern%C3%A9>
- [5] Bouché, M.B., 1972. *Lombriciens de France: écologie et systématique*. INRA - Annales de Zoologie Ecologie Animale, Paris.
- [6] Edwards, C.A., 2004. *Earthworm Ecology* (2nd edition). CRC Press, Boca Raton.
- [7] Eijsackers, H., 2011. Earthworms as colonizers of natural and cultivated soil environments. *Applied Soil Ecology* 50, 1–13.
- [8] MARECHAL (J.) - *Sols fertiles et Trame Brune en milieu urbain : impacts de l'ingénierie pédologique sur les sols et les communautés lombriciennes*. Thèse en écologie, Université de Rennes.
- [9] MARECHAL (J.), HOFFNER (K.), MARIE (X.), CLUZEAU (D.). 2021. Response of earthworm communities to soil engineering and soil isolation in urban landscapes. *Ecological Engineering* 169, 106307 (2021).
- [10] MARECHAL (J.), HOFFNER (K.), MARIE (X.), CLUZEAU (D.). Impacts of soil engineering processes and anthropogenic barriers on earthworm communities in urban areas. *European Journal of Soil Biology* 120, 103598 (2024).
- [11] <https://fr.climate-data.org/>
- [12] <https://www.ville-palaiseau.fr/attractive/ville-dequilibre/plan-local-durbanisme-plu>
- [13] <https://geoservices.ign.fr/ocsge>
- [14] <https://www.institutparisregion.fr/nos-travaux/publications/les-ilots-morphologiques-urbains-imu/>

[15] AFNOR *Qualité des sols - Cartographie des sols appliquée à toutes les échelles - Acquisition et gestion informatique de données pédologiques en vue de leur utilisation en cartographie des sols* NF X 31 560 AFNOR, 2007.

[16] <https://ecobiosoil.univ-rennes1.fr/page/protocole-participatif-test-beche-vers-de-terre>

[17] [https://drive.google.com/file/d/1R70c0Iei0xcD1MhRx-9c5pHxuyHblTrameVerteln/view?usp=share\\_link](https://drive.google.com/file/d/1R70c0Iei0xcD1MhRx-9c5pHxuyHblTrameVerteln/view?usp=share_link)

[18] MAUTUIT (A.), FERNADEZ MARCHAN (D.), BARANTAL (S.), BRAND (M.), LUCAS (A.), CORTET (J.), VERGNES (A.), DEACENS (T.). Environmental drivers of diversity and phylogeographic pattern in urban earthworms. *European Journal of Soil Biology* 121, 103620 (2024).

[19] BUTT (K.R.), FREDERICKSON (J.), MORRIS (R.M.) - *Earthworm cultivation and soil-inoculation: a practical technique for land restoration*. *Ecological Engineering* 4, 1-9 (1995).

[20] BRUN (J.), CLUZEAU (D.), CHIAVERINI (P.), HEIDET (J.C.) - *Les lombriciens dans les manipulations et la restauration de sols dégradés*, in: 10th International Soil Zoology Symposium, Advances in Management and Conservation of Soil Fauna, Bangalore, 7-13 August 1988. pp. 429-447 (1991).

[21] BRUN (J.J.), CLUZEAU (D.), TREHEN (P.) & BOUCHE (M.B.) - *Biostimulation : Perspectives et limites de l'amélioration biologique des sols par stimulation ou introduction d'espèces lombriciennes efficaces*. *Rev. Ecol. Biol. Sol*, 24 (4) : 685-701 (1987)

LEFEBVRE (H.). *Méthodologie cartographique et caractérisation des continuités écologiques des sols de la ville de Paris : vers la caractérisation d'une Trame Brune en milieu urbain fragmenté*. Mémoire de fin d'études. Cours ingénieur AgroParisTech, dominante IDEA (Encadrement D.Cluzeau, Yan Le Bourligu & J.Maréchal) (2022).

NOURRY (S.) - Stage M2 AETPF AgroParisTech Parcours Gestion des Sols et Services Ecosystémiques. TRAM'BIOSOL. *Caractérisation de sols urbains et définition d'un gradient d'artificialisation pour l'étude de la Trame Brune*. Février-Août 2021. (Encadrement D. Cluzeau, Rebecca Dingkuhn)

DERDER (A.) - Stage M2 BEE Université Paris-Saclay Parcours Ecologie de la Conservation. TRAM'BIOSOL. *Evaluation de la capacité des espaces verts urbains en Ile-de-France à assurer un rôle de réservoir de biodiversité pour les communautés lombriciennes*. Février-Août 2021. (Encadrement D. Cluzeau, J. Maréchal)

HUET (M.) - Stage M1 BEE Université de Rennes 1 Parcours Stratégie de Développement. TRAM'BIOSOL. *Isolement et naturalité selon les formes urbaines des quartiers de la commune de Palaiseau*. Mai-Juillet 2021. (Encadrement D. Cluzeau, J. Maréchal)

LLEDO (K.) - Stage de formation pratique de Master de l'Ecole Nationale d'Architecture Paris-Val de Seine. TRAM'BIOSOL. *Intégration de la Trame Brune et de la biodiversité lombricienne dans les programmes d'aménagement urbain*. Février-Mai 2021. (Encadrement E. Lénack)

CAFFIAUX (P.), NIRLO (C.), PICARD (L.) - Projet pré-professionnel - Ecole Supérieur d'Ingénieurs Géomètres et Topographes. « Préservation d'une Trame Brune à l'échelle d'un projet d'aménagement : quelle stratégie foncière opérer ? ». Octobre 2022-Janvier 2023. (Encadrement M. Desrousseaux)

# ANNEXES

---

Annexe 1 - Unités Typologiques de Sols associées à chacune des observations

ID	UTS
S01	LUVISOL TYPIQUE-REDOXISOL limono-argileux à argilo-limoneux, épais, sur argile
S02	LUVISOL TYPIQUE-REDOXISOL surrédoxique, limono-argileux à argileux, épais, sur argile
S03	LUVISOL TYPIQUE, rédoxique, argilo-limoneux, épais, sur argile limoneuse
S04	ANTHROPOSOL RECONSTITUE, sablo-argileux à sableux, calcaire, peu épais, issu de matériaux pédologiques hétérogènes à artéfacts, sur remblai compact
S05	LUVISOL TYPIQUE, limono-argileux, épais, sur argile limoneuse calcaire
S06	LUVISOL TYPIQUE rédoxique, argilo-limoneux à argileux, moyennement épais, sur argile compacte
S07	LUVISOL TYPIQUE rédoxique, argilo-limoneux à argileux, calcaire, épais, sur argile compacte
S08	ANTHROPOSOL RECONSTITUE sableux, épais, issu de matériaux sableux hétérogènes transportés
S09	LUVISOL TYPIQUE rédoxique, limono-argileux à argilo-limoneux, épais, sur argile
S10	ANTHROPOSOL RECONSTITUE, sablo-limono-argileux, à artéfacts, très peu épais, issu de matériau hétérogène transporté
S11	LUVISOL TYPIQUE rédoxique, sablo-argileux à argilo-sableux, moyennement épais, sur argile à meulière
S12	LUVISOL TYPIQUE limono-sableux-argileux à argilo-limono-sableux, peu épais, sur argile
S13	LUVISOL TYPIQUE anthropisé, rédoxique, argilo-limoneux, moyennement épais, remanié et enrichi en matière organique en surface, sur argile
S14	ANTHROPOSOL RECONSTITUE rédoxique, argilo-limoneux, moyennement épais, sur argile
S15	LUVISOL TYPIQUE remanié en surface, argilo-limoneux à sablo-argilo-limoneux, moyennement épais, issu de matériau argilo-sableux
S16	LUVISOL TYPIQUE sablo-argilo-limoneux à argilo-sablo-limoneux, peu épais, issu de matériau argilo-sableux

S17	ANTHROPOSOL RECONSTITUE argilo-limono-sableux, très peu épais, issu de matériaux pédologiques transportés, enrichis en matière organique en surface, sur remblai compact
S18	ANTHROPOSOL RECONSTITUE argilo-limono-sableux, moyennement épais, issu de matériaux pédologiques transportés, enrichis en matière organique en surface, sur remblai compact
S19	ANTHROPOSOL RECONSTITUE limono-argileux à argilo-limoneux, moyennement épais, issu de matériaux pédologiques transportés, enrichis en matière organique en surface, sur remblai compact
S20	ANTHROPOSOL RECONSTITUE limono-argileux à argilo-limoneux, peu épais, issu de matériaux pédologiques transportés, enrichis en matière organique en surface, sur remblai compact
S21	ANTHROPOSOL RECONSTITUE limono-sableux, très peu épais, issu de matériaux pédologiques transportés enrichis en matière organique, sur remblai compact
S22	ANTHROPOSOL RECONSTITUE limono-argileux, moyennement épais, issu de matériaux pédologiques transportés, enrichis en matière organique en surface, sur remblai compact
S23	ANTHROPOSOL RECONSTITUE limono-argileux, peu épais, à artéfacts, issu de matériaux pédologiques transportés enrichis en matière organique
S24	ANTHROPOSOL RECONSTITUE limono-argileux, moyennement épais, issu de matériaux pédologiques transportés, enrichis en matière organique en surface, sur remblai compact
S25	ANTHROPOSOL RECONSTITUE limono-sableux, très peu épais, issu de matériaux pédologiques transportés à artéfacts, sur remblai compact
S26	ANTHROPOSOL RECONSTITUE limono-sableux à limoneux, calcaire, peu épais, issu de matériaux transportés pédologiques, sur remblai compact
S27	ANTHROPOSOL RECONSTITUE limono-argileux à argilo-limoneux, peu épais, issu de matériaux pédologiques transportés, enrichis en matière organique en surface, sur remblai compact
S28	ANTHROPOSOL RECONSTITUE rédoxique, limono-argileux à argilo-limoneux, épais, issu de matériaux pédologiques transportés, sur LUVISOL décapé

S29	LUVISOL TYPIQUE anthropisé, limono-sablo-argileux à argilo-limono-sableux, moyennement épais, issu de matériaux pédologiques transportés, sur LUVISOL décapé
S30	ANTHROPOSOL RECONSTITUE, limono-sablo-argileux, peu épais, légèrement calcaire, issu de matériaux pédologiques transportés, sur remblai compact hétérogène
S31	LUVISOL TYPIQUE rédoxique, limoneux à argilo-limoneux, épais, sur argile limoneuse
S32	LUVISOL TYPIQUE rédoxique, argilo-limoneux à argileux, épais, sur argile
S33	ANTHROPOSOL RECONSTITUE, limono-argileux à argilo-limoneux, calcaire, peu épais, à charge grossière, issu de matériaux pédologiques transportés sur remblai compact
S34	ANTHROPOSOL RECONSTITUE rédoxique, limono-argileux à argilo-limoneux, moyennement épais, issu de matériaux pédologiques transportés sur remblai compact
S35	ANTHROPOSOL RECONSTITUE surrédoxique, limono-argilo-sableux à argilo-sablo-limoneux, calcaire, épais, issu de matériaux pédologiques transportés sur argile
S36	ANTHROPOSOL RECONSTITUE rédoxique, limono-argileux à argileux, hétérogène, calcaire en sous-face, épais, issu de matériaux pédologiques transportés sur argile limoneuse
S37	ANTHROPOSOL RECONSTITUE limono-argileux à argileux, hétérogène, épais, calcaire en surface, issu de matériaux pédologiques transportés sur argile limoneuse
S38	ANTHROPOSOL RECONSTITUE surrédoxique, limono-argileux, épais, issu de matériaux pédologiques transportés, sur LUVISOL enfoui
S39	ANTHROPOSOL RECONSTITUE - REDOXISOL surrédoxique, argilo-limoneux, épais, issu de matériaux pédologiques transportés, sur argile limoneuse
S40	LUVISOL TYPIQUE rédoxique, argilo-limoneux, épais
S41	ANTHROPOSOL RECONSTITUE limono-argileux, moyennement épais, issu de matériaux pédologiques transportés, sur argile compacte
S42	ANTHROPOSOL RECONSTITUE rédoxique, limono-argileux à limono-sablo-argileux, épais, issu de matériaux pédologiques anthropisés, sur remblais compacts

S43	ANTHROPOSOL RECONSTITUE limono-argilo-sableux, calcaire, peu épais, issu de matériaux pédologiques transportés, sur remblais
S44	ANTHROPOSOL RECONSTITUE argilo-sableux à sablo-limoneux, calcaire en profondeur, épais, issus de matériaux pédologiques transportés à charge grossière, sur remblais
S45	ANTHROPOSOL RECONSTITUE argilo-limono-sableux, calcaire, moyennement épais, à horizon humifère de surface, issu de matériaux pédologiques transportés à charge grossière, sur remblais
S46	ANTHROPOSOL RECONSTITUE argilo-limoneux à limono-argilo-sableux, peu épais, issu de matériaux pédologiques transportés anthropisés, calcaires en profondeur, sur remblais
S47	ANTHROPOSOL RECONSTITUE limono-argileux, calcaire, moyennement épais, issu de matériaux pédologiques transportés caillouteux, sur remblais
S48	ANTHROPOSOL RECONSTITUE limono-argileux, peu épais, issu de matériaux pédologiques transportés, sur remblai compact
S49	ANTHROPOSOL RECONSTITUE limono-sableux, calcaire, peu épais, issu de matériaux pédologiques transportés, sur remblai compact
S50	ANTHROPOSOL RECONSTITUE limono-argileux, peu épais, issu de matériaux pédologiques transportés, sur remblai compact
S51	LUVISOL TYPIQUE rédoxique, argilo-limoneux, épais, anthropisé en surface, sur argile
S52	ANTHROPOSOL RECONSTITUE argilo-sableux, faiblement calcaire, peu épais, issu de matériaux pédologiques transportés sur remblai compact
S53	ANTHROPOSOL RECONSTITUE limono-argileux, calcaire, moyennement épais, issu de matériaux pédologiques transportés, sur remblai calcaire
S54	LUVISOL TYPIQUE rédoxique, limoneux à limono-argileux, épais, sur argile
S55	LUVISOL TYPIQUE limoneux à limono-argileux, moyennement épais, sur argile

S56	LUVISOL TYPIQUE rédoxique, limono-argileux à argileux, moyennement épais, sur argile
S57	LUVISOL TYPIQUE limono-argileux, anthropisé en surface, moyennement épais, sur argile
S58	ANTHROPOSOL RECONSTITUE argilo-limoneux, calcaire, moyennement épais, issu de matériaux pédologiques calcaires, caillouteux en profondeur, sur remblai compact
S59	ANTHROPOSOL RECONSTITUE limono-argileux à argilo-limoneux, faiblement calcaire, moyennement épais, issu de matériaux pédologiques transportés sur remblai compact
S60	ANTHROPOSOL RECONSTITUE argilo-limoneux, calcaire, moyennement épais, issu de matériaux pédologiques transportés, sur remblai compact
S61	ANTHROPOSOL RECONSTITUE argileux à limoneux, peu épais, à horizon organique enfoui, sur remblai compact
S62	LUVISOL TYPIQUE rédoxique, limono-argileux, peu épais, sur argile
S63	LUVISOL TYPIQUE limono-sableux à limono-argileux, moyennement épais, anthropisé en surface, sur argile
S64	LUVISOL TYPIQUE rédoxique, argilo-limoneux, épais, sur argile
S65	ANTHROPOSOL RECONSTITUE limono-sableux, très peu épais, compacté, issu de matériaux pédologiques transportés, sur remblai compact
S66	ANTHROPOSOL RECONSTITUE rédoxique, argilo-limoneux à limono-argileux, épais, calcaire en profondeur, issu de matériaux pédologiques transportés, sur remblai sableux compact
S67	ANTHROPOSOL RECONSTITUE limono-argileux, faiblement calcaire, peu épais, issu de matériaux pédologiques transportés, sur remblai compact
S68	ANTHROPOSOL RECONSTITUE argilo-limoneux, faiblement calcaire, moyennement épais, issu de matériaux pédologiques transportés, sur remblai compact
S69	ANTHROPOSOL RECONSTITUE rédoxique, argilo-limoneux à argileux, épais, issu de matériaux pédologiques transportés, sur remblai compact

S70	ANTHROPOSOL RECONSTITUE rédoxique, limono-argileux à argilo-limoneux, moyennement épais, issu de matériaux pédologiques transportés à charge grossière calcaire, sur remblai compact
S71	ANTHROPOSOL RECONSTITUE rédoxique, limono-argileux, moyennement épais, issu de matériaux pédologiques transportés sur remblai compact
S72	ANTHROPOSOL RECONSTITUE limono-argileux, calcaire, peu épais, issu de matériaux pédologiques transportés sur remblai caillouteux calcaire compact
S73	ANTHROPOSOL RECONSTITUE limono-argileux à argilo-limoneux, moyennement épais, faiblement calcaire en profondeur, issu de matériaux pédologiques transportés, sur remblai compact
S74	ANTHROPOSOL RECONSTITUE argileux à argilo-limono-sableux, moyennement épais, enrichi en matière organique en surface, issu de matériaux pédologiques transportés, sur remblai argileux
S75	LUVISOL TYPIQUE-REDOXISOL, limono-argileux, moyennement épais, anthropisé en surface
S76	ANTHROPOSOL RECONSTITUE limono-sableux à argilo-sableux, moyennement épais, issu de matériaux pédologiques transportés hétérogènes, sur argile compacte
S77	ANTHROPOSOL RECONSTITUE limono-sableux, calcaire, très peu épais, issu de matériaux pédologiques transportés enrichis en matière organique, sur remblai compact
S78	LUVISOL TYPIQUE-REDOXISOL limono-argileux, moyennement épais, sur argile
S79	ANTHROPOSOL RECONSTITUE argilo-limoneux, très peu épais, issu de matériaux pédologiques caillouteux transportés sur argile compacte
S80	ANTHROPOSOL RECONSTITUE limono-argileux à argilo-limoneux, calcaire, graveleux, enrichi en matière organique en surface, très peu épais, issu de matériaux pédologiques transportés sur remblai compact
S81	LUVISOL TYPIQUE-REDOXISOL, limono-argileux à argileux, peu épais, sur argile

S83	ANTHROPOSOL RECONSTITUE-REDOXISOL limono-argileux, calcaire, épais, issu de matériaux pédologiques transportés sur LUVISOL décapé
S84	LUVISOL TYPIQUE-REDOXISOL limono-argileux à argileux, épais, sur argile
S85	ANTHROPOSOL RECONSTITUE rédoxique, limono-argileux à argilo-limoneux, épais, issu de matériaux pédologiques transportés enrichis en MO, sur LUVISOL tronqué
S88	ANTHROPOSOL RECONSTITUE rédoxique, limoneux à limono-argileux, épais, issu de matériaux pédologiques transportés sur LUVISOL décapé
S89	ANTHROPOSOL RECONSTITUE limoneux à limono-sableux, calcaire, peu épais, issu de matériaux pédologiques transportés sur remblai compact
S90	LUVISOL TYPIQUE anthropisé, rédoxique, limono-argileux à argileux, épais, avec apport de matériau pédologique calcaire et enrichi en matière organique en surface, sur argile
S91	ANTHROPOSOL RECONSTITUE limono-argileux, rédoxique, calcaire, moyennement épais, issu de matériaux pédologiques transportés sur argile compacte
S92	LUVISOL TYPIQUE-REDOXISOL anthropisé, limono-argileux à argileux, calcaire, moyennement épais, avec apport de matériaux pédologiques transportés et enrichis en matière organique en surface, sur argile
S94	ANTHROPOSOL RECONSTITUE limono-argileux, calcaire, à charge grossière, moyennement épais, issu de matériaux pédologiques transportés, sur argile
S95	ANTHROPOSOL RECONSTITUE rédoxique limono-argileux à argileux, calcaire, épais, issu de matériaux pédologiques transportés, sur argile
S97	ANTHROPOSOL RECONSTITUE-REDOXISOL limono-argilo-sableux à sablo-argileux, épais, issu de matériaux pédologiques transportés enrichis en matière organique en surface, sur argile
S99	LUVISOL TYPIQUE-REDOXISOL limono-argileux à argileux, épais, sur argile

# REMERCIEMENTS

---

Toute l'équipe de TRAM'BIOSOL souhaite remercier l'ensemble des personnes ayant contribué au projet :

- Le PUCA pour le subventionnement du projet, l'organisation des rencontres acteurs-chercheurs, et en particulier Sophie Carré pour le suivi du projet et pour son aide dans l'organisation du séminaire de restitution final du 5 juin 2024.
- L'ensemble des stagiaires et à l'équipe de Sol Paysage pour la collecte de données de terrain, leur contribution aux réflexions méthodologiques, et rapports de stage : Suzanne Nourry, Kevin Lledo, Mathilde Huet, Adam Derder, Kilian Ringelstein, Alexane Leprisé, Howaida Abbas, Rebecca Dingkuhn, Adama Diedhiou, Jean-Pierre Rossignol.
- Sarah Guillocheau pour la détermination taxonomique des lombriciens.
- Les membres du groupe de travail « planification » pour leur contribution aux réflexions : Gil Melin, Léa Assouline, Frédéric Ségur, Philippe Branchu.
- Frédéric Ségur pour la contribution à la rédaction de la partie 3.
- Les habitants de Palaiseau et les équipes de la ville pour les autorisations d'accès aux parcelles.

# **CONSEIL SCIENTIFIQUE DU PROGRAMME BAUM**

**Hélène Peskine**, secrétaire permanente du PUCA (2017-2024), co-présidente du Conseil scientifique

**Philippe Clergeau**, professeur émérite au Muséum national d'histoire naturelle (MNHM), directeur scientifique du programme BAUM, co-président du Conseil scientifique

**Xavier Lagurgue**, architecte DPLG associé XLGD architectures, professeur à l'École nationale supérieure d'architecture Paris-La-Villette (ENSAPLV), chercheur GERPHAU EA 7486, associé CESCO, UMR 7204

**Sébastien Barot**, directeur de recherche à l'Institut de la recherche et du développement (IRD), à l'Institut d'écologie et des sciences de l'environnement-Paris (IEES-Paris)

**Corinne Tiry-Ono**, architecte, professeure à l'École nationale supérieure d'architecture Paris-Val de Seine (ENSAPVS), laboratoire CRH - UMR LAVUE, associée au CRCAO

**Stéphane Garnaud-Corbel**, chef de service adjoint, Service « Anthropisation et fonctionnement des écosystèmes terrestres », Office français de la biodiversité (OFB), Direction de la recherche et de l'appui scientifique

**Elodie Briche**, PhD / coordinatrice R&D Urbanisme Durable, Ademe, Pôle Aménagement des villes et territoires (PAVT)

**Cécile Vo Van**, directrice de projet Nature en ville et Solutions fondées sur la nature (SFN), Cerema Territoires et ville

**Eduardo Blanco**, docteur en aménagement de l'espace, urbanisme, chef de projets chez Energy Cities

**Valérie Charollais**, directrice de la Fédération nationale des Conseils d'architecture, d'urbanisme et de l'environnement (FNCAUE)

**Morgane Flegeau**, urbaniste géographe, maîtresse de conférences en géographie et aménagement, Université de Lorraine, Laboratoire LOTERR (EA 7304)

**Sabine Bognon**, urbaniste géographe, maîtresse de conférences à l'École d'Urbanisme de Paris, laboratoire Lab'urba

**Sandrine Larramendy**, chargée de mission "Approches intégrées Végétal-Paysage-Urbanisme", Plante et Cité

**Marc Bourgeois**, maître de conférences en géographie et aménagement, HDR, Faculté des lettres et civilisations, Université Jean Moulin Lyon 3, UMR Environnement, Ville, Société - 5600 CNRS

**Thomas Redoulez**, délégué général, Union professionnelle du génie écologique (UPGE) (jusqu'en juillet 2023)

**Anaïs Leger-Smith**, ingénieure paysagiste, enseignante-chercheuse à l'École nationale supérieure d'architecture de Toulouse (ENSAT), laboratoire de recherche en architecture (LRA)

**Simon Trauet**, chef de projet Trame verte et bleue et Nature en ville, Direction générale de l'aménagement, du logement et de la nature (DGALN), Direction de l'eau et de la biodiversité (DEB), Sous-direction de la protection et de la restauration des écosystèmes terrestres, Bureau de la politique de la biodiversité

**Yannick Autret**, expert transport, énergie et environnement, Commissariat général au développement durable (CGDD), Service recherche et innovation

**Florence Drouy**, cheffe du Bureau des villes et territoires durables, Direction générale de l'aménagement, du logement et de la nature (DGALN), Direction de l'habitat, de l'urbanisme et des paysages (DHUP), Sous-direction de l'aménagement durable



POUR ALLER PLUS LOIN



La trame brune - TBr - urbaine reste méconnue en tant que trame écologique pour la biodiversité des sols alors qu'elle pourrait constituer un pivot décisif pour une application opérationnelle cohérente des politiques publiques convergeant vers le « zéro artificialisation nette ». Le projet Tram'BioSol a permis d'étudier l'intégration de la TBr et de la biodiversité lombricienne des sols dans les programmes d'aménagement urbain. Cette intégration n'est cependant possible que sur la base d'une compréhension commune et partagée de ce concept encore émergent, et des méthodes de diagnostics sur le terrain. Cet ouvrage propose un cadre conceptuel de la TBr urbaine ainsi qu'une démarche méthodologique pour la localiser et la caractériser à l'échelle des quartiers.

*Organisme national de recherche et d'expérimentation sur l'urbanisme, la construction et l'architecture, le Plan Urbanisme Construction Architecture, PUCA, développe à la fois des programmes de recherche incitative, et des actions d'expérimentations. Il apporte son soutien à l'innovation et à la valorisation scientifique et technique dans les domaines de l'aménagement des territoires, de l'habitat, de la construction et de la conception architecturale et urbaine.*

