

Trame brune de Limoges Métropole

Développement expérimental d'une trame brune sur le territoire d'un EPCI

Phase 1 : Approche méthodologique



Trame brune de Limoges Métropole : Développement expérimental d'une trame brune sur le territoire d'un EPCI

Phase 1 : Approche méthodologique

Rédaction :

Daniel Cluzeau, Laboratoire ECOBIO, Université de Rennes 1

Alexane Leprisé, Laboratoire ECOBIO, Université de Renne 1

Jeanne Maréchal, Laboratoire ECOBIO & BE SolPaysage

Apolline Auclerc, Laboratoire Sols et Environnement UMR 1120 INRAE - Université de Lorraine

Emmanuel Joussein, Laboratoire PEIRENE, Université de Limoges

Maryline Soubrand, Laboratoire PEIRENE, Université de Limoges

Olivier Dom, Direction des Espaces Naturels, Limoges Métropole

Julie Sowa-Doyen, Direction des Espaces Naturels, Limoges Métropole

Table des matières

Introduction :	3
Chapitre 1 : Formaliser la définition normative de la Trame Brune.....	4
1.a Elaboration de la définition pouvant être utilisée par les EPCI de taille moyenne	4
1.a.1. Définition de la Trame brune de Limoges Métropole	4
1.a.2. Note explicative.....	4
1.a.2.1. Détails complémentaires vis-à-vis de la définition générale.....	4
1.a.2.2. Glossaire	4
1.b. Détermination de la liste des taxons clés permettant d'évaluer l'état de la biodiversité, de la méso- et macrofaune du sol au sein de la Trame brune.....	5
1.b.1. Les taxons de la faune du sol utilisateurs de la Trame brune	5
1.b.2. Méthodes d'inventaires faune et physico-chimiques	7
1.b.2.1. Technique du piège barber : capture des invertébrés du sol se déplaçant à la surface du sol	8
1.b.2.2. Protocole Test Bêche pour échantillonner les vers de terre.....	8
1.b.2.3. Technique du carottier : capture des micro-arthropodes du sol	9
1.b.2.4. Analyses des paramètres physico-chimiques du sol	10
1.b.2.5. Description du site échantillonné.....	11
Chapitre 2 : Poser le cadre méthodologique d'identification, de localisation et d'évaluation de la Trame brune	11
2.a. Identifier les caractéristiques des éléments constitutifs de la Trame brune (Réservoirs et corridors)	11
2.a.1. Identifier les caractéristiques favorables ou défavorables à l'accomplissement du cycle biologique des taxons-clés et les modalités de leurs déplacements au sein de la Trame brune..	12
2.a.2. Etat de l'art et proposition de divers gradients pouvant influencer la qualité des réservoirs et des corridors à différentes échelles d'organisation des territoires d'étude.....	12
2.a.2.1. Gradient d'anthropisation du sol	12
2.a.2.2. Gradient d'occupation du sol	13
2.a.3. Caractériser les obstacles perçus par la pédofaune à l'aide d'un gradient d'isolement défini selon la franchissabilité des obstacles	14
2.b. Cahier des charges méthodologique permettant la caractérisation et la cartographie de la Trame brune à l'échelle d'un EPCI de taille moyenne.....	15
2.b.1. Etape 1 : Définition et caractérisation de l'aire d'étude (Limoges Métropole et territoires voisins).....	15
2.b.2. Etapes 2 et 3 : Délimitation des espaces bâtis ou des infrastructures (sols imperméabilisés) vis-à-vis des espaces non bâtis (sols perméables) et qualification	19

2.b.3. Etape 4 : Caractérisation des éléments de la Trame brune	21
2.b.4. Etape 5 : Caractériser le degré d'isolement potentiel et la connectivité potentielle des sols végétalisés de Limoges Métropole.....	22
2.b.5. Cartographie de la Trame brune potentielle.....	24
2.b.6. Synthèse de la méthode.....	28
2.c. Proposer une démarche méthodologique de terrain pour caractériser la réalité de la trame brune à des échelles pertinentes, de la commune au quartier	29
Chapitre 3 : Formaliser et valider la méthodologie au sein du groupe d'Experts.....	30
3.a. Budgétisation.....	30
3.a.1. Inventaires Lombriciens.....	31
3.a.1.1. Organisation et durée de l'échantillonnage	31
3.a.1.2. Estimatif – Lombriciens	31
3.a.2. Inventaires Mésofaune et Macrofaune de surface	32
3.a.2.1. Organisation et durée de l'échantillonnage	32
3.a.2.2. Estimatif – Méso et macrofaune de surface	32
3.a.3. Analyses physico-chimiques du sol.....	33
3.a.3.1. Organisation et durée de l'échantillonnage	33
3.a.3.2. Estimatif – Analyses physico-chimiques.....	33
3.a.4. Estimatif budgétaire général annuel	34
3.b. Réflexion distanciée sur la faisabilité du projet selon l'axe scientifique.....	34
Chapitre 4 : Veiller à sa reproductibilité à l'échelle moyenne des EPCI du territoire national.....	35
4.a. Reproductibilité de la méthode.....	35
4.b. Perspectives d'utilisation de la Trame brune au sein d'un EPCI	36
Chapitre 5 : Positionner Limoges Métropole comme EPCI de référence « Trame brune » au niveau national.....	38
5.a. Retour d'expérience proposées aux EPCI par Limoges Métropole	38
5.b. Proposition d'articles dans les revues techniques	38
5.c. Présentation du travail effectué par les universités dans des colloques de différentes portées.	38
Bibliographie :.....	39

Introduction :

Disposant de larges compétences liées à l'aménagement du territoire, Limoges Métropole souhaite disposer des meilleurs outils pour définir ses orientations stratégiques et mettre en œuvre sa double ambition de développement économique et de préservation du patrimoine naturel.

C'est pourquoi, dès 2009, elle n'a cessé d'être parmi les collectivités pionnières dans le domaine des réseaux et continuités écologiques.

Sa Trame Verte & Bleue (TVB) est opérationnelle depuis 2012, mais c'est surtout sa Trame Noire (TN) qui lui a permis d'acquérir une renommée nationale en faisant de Limoges Métropole le premier EPCI doté d'un tel outil en 2020.

Souhaitant progresser dans sa démarche et affirmer sa position d'EPCI de référence au niveau national dans le domaine des réseaux écologiques et de l'aménagement du territoire, Limoges Métropole entend désormais initier l'étude de sa Trame Brune.

Le concept de Trame Brune est similaire à celui de la Trame Verte & Bleue ou de la Trame Noire. Il s'agit là-encore de définir des réservoirs de biodiversité et des corridors écologiques. Mais ici, le compartiment écologique visé est celui du sol. Le concept de Trame Brune est très novateur dans l'élaboration des projets d'aménagements ou encore dans la littérature scientifique. En effet, la biodiversité des sols, élément essentiel du fonctionnement du sol et des services associés (stockage du carbone, régulation du cycle de l'eau...), est longtemps restée un compartiment délaissé des aménageurs et de la communauté scientifique.

L'ensemble des activités humaines (l'urbanisation, l'industrialisation, l'agriculture, le tourisme) ont des impacts directs ou indirects sur la biodiversité du sol. Ces impacts peuvent provoquer une diminution préjudiciable des populations animales, végétales et microbiennes vivant dans les sols et entraîner une détérioration de ses fonctionnalités écologiques telles que le cycle des nutriments ou la rétention et l'infiltration des eaux pluviales.

A cela s'ajoute les discontinuités écologiques rencontrées dans le paysage (péri)urbain qui accentuent la fragmentation des sols entraînant une probable diminution de la biodiversité des sols.

L'évaluation de l'état de la biodiversité passe en premier lieu par la caractérisation physicochimique des sols. En effet, les propriétés physiques et chimiques des sols sont des facteurs influençant naturellement l'état de la biodiversité des sols. Il est donc important d'avoir une approche couplée, biologique et physico-chimique, afin d'évaluer au mieux l'efficacité de la Trame Brune.

Ainsi, la conceptualisation de la Trame Brune consiste donc à identifier les secteurs du territoire dont les sols présentent les meilleurs paramètres biologiques et physico-chimiques, autrement appelé les réservoirs et corridors pédologiques et d'évaluer leur efficacité.

Une fois ces secteurs identifiés, ils sont cartographiés afin de constituer une couche d'information géographique supplémentaire que les décideurs peuvent utiliser dans le cadre des différents programmes de développement territorial (PCAET, PAT, etc...) et dans les documents d'urbanisme (PLUi, SCOT).

Chapitre 1 : Formaliser la définition normative de la Trame Brune.

1.a Elaboration de la définition pouvant être utilisée par les EPCI de taille moyenne

1.a.1. Définition de la Trame brune de Limoges Métropole¹

Au même titre que la TVB, la Trame Brune (TBr) se compose de **réservoirs (habitats favorables à cette biodiversité des sols)** et de **corridors pédologiques** qui permettent d'assurer la continuité écologique pour la biodiversité vivant dans les différents horizons des sols, aussi bien naturels que plus ou moins anthropisés.

Cette Trame Brune concerne principalement les espèces invertébrées non prises en compte dans la Trame Verte qui vivent continuellement dans ces différents horizons du sol (espèces géobiontes) et qui ont de faibles capacités de dispersion (appendices locomoteurs absents ou très réduits).

1.a.2. Note explicative

Nous allons préciser certains termes utilisés dans cette définition et proposer, sous forme de tableau illustré, une répartition des taxons, de fortement à très peu concernés par la Trame Brune, en se basant sur des classifications écologiques reconnues par la bibliographie.

1.a.2.1. Détails complémentaires vis-à-vis de la définition générale

Les capacités de déplacements de cette biodiversité du sol sont conditionnés par des **facteurs intrinsèques** tels que la présence ou non de soies, de pattes ou d'ailes et par des moyens de déplacement **extrinsèques** tels que (1) le vent (Anémochorie), (2) l'eau (Hydrochorie), (3) les animaux (Zoochorie), (4) les activités humaines (Anthropochorie) ; de tels moyens de déplacements passifs pourraient permettre à cette biodiversité d'être transportée d'un réservoir vers un autre, proche ou très éloigné.

1.a.2.2. Glossaire

Biodiversité / Invertébrés du sol : les sols hébergent un quart de la biodiversité de notre planète (FAO, 2015). Un organisme est considéré comme appartenant à la biodiversité du sol lorsqu'au moins une phase de sa vie se passe dans le sol ou dans un des *micro-habitats* à la surface du sol. Les invertébrés du sol rassemblent les organismes de la **microfaune** (animaux microscopiques d'une taille inférieure à 0,2 mm), la **mésafaune** (invertébrés d'une taille comprise entre 0,2 mm et 4 mm de longueur en moyenne et d'un diamètre de 0,1 à 2 mm ; ils sont difficilement reconnaissables à l'œil nu), la **macrofaune** (invertébrés généralement visibles à l'œil nu avec une taille comprise entre 4 mm et 80 mm de longueur et un diamètre de 2 à 20 mm).

¹ Première définition présentée le 15 mars 2018, à la journée organisée par l'AFB sur "La transition agro-écologique au service des continuités écologiques" :

https://trameverteetbleue.fr/sites/default/files/Journee_echange/15_cluzeau_tramebrune_tvbagroecologie15mars2018.pdf

<https://www.youtube.com/watch?v=EDlhHVbiXZw>

b) La trame brune en milieu rural et urbain (10/2020) : <http://espaces-naturels.info/espaces-naturels-72> (pages 28-29)

c) TRAM'BIOSOL-Comment concilier densification du bâti et biodiversité lombricienne ? (14/12/2020)

http://www.urbanisme-puca.gouv.fr/IMG/pdf/201214_baum_tram_biosol_diaporama.pdf

Réservoirs en lien avec :

Habitat pour un invertébré du sol : éléments du paysage qui offrent les ressources naturelles suffisantes pour permettre à une population de vivre et se développer. Ces éléments prennent en compte l'ensemble des horizons du sol jusqu'au 1^{er} mètre, en particulier l'horizon organique avec les diverses matières organiques en voie de décomposition comme les litières, ou les bois morts, et la couverture végétale présente sur ces sols.

Micro-habitat : espace qui convient au développement ou à une phase de développement d'un invertébré du sol qui peut être un espace sous un minéral (caillou, brique, tuile...), ou en lien avec des matières organiques mortes, comme les feuilles de la litière, les déjections et les cadavres animaux, les bois morts, broyats de bois, ou encore les mousses fixées au sol. D'autres matières apportées par l'Homme peuvent être des micro-habitats pour les organismes du sol comme les composts, fumiers, déchets verts, boues organiques, effluents d'élevage...

Habitat et micro-habitat varient de taille selon la taille du taxon de faune du sol considéré (cf tableau ci-dessous – univers de vie).

Corridor pour les invertébrés du sol : composante permettant le déplacement des espèces à faible capacité de dispersion en surface du sol et dans le sol ; composante d'habitats qui permet le déplacement et la survie des individus (disponibilité des ressources alimentaires, protection contre la prédation par la couverture généralisée de la surface du sol) sans nécessité d'assurer le cycle reproducteur complet de la population.

Facteurs intrinsèques : facteurs liés au taxon (caractéristiques morphologiques, anatomiques, physiologiques, comportementales, ...) permettant des déplacements actifs des individus. La distance parcourue annuellement sera fonction du développement +/- important des appendices locomoteurs et de la présence/absence d'ailes au cours du cycle de vie de l'espèce considérée.

Facteurs extrinsèques : facteurs externes permettant des déplacements passifs des individus (grâce aux flux d'air, d'eau, de matériaux pédologiques et d'animaux).

Univers de vie : correspond à la surface et au volume prospectés au cours de la vie d'un individu ; la taille de ces univers de vie est dépendante de la classe de taille du taxon (micro-, méso-, & macro-faunes).

1.b. Détermination de la liste des taxons clés permettant d'évaluer l'état de la biodiversité, de la méso- et macrofaune du sol au sein de la Trame brune

1.b.1. Les taxons de la faune du sol utilisateurs de la Trame brune

Ce tableau est proposé afin de présenter les principaux taxons de la faune du sol qui sont utilisateurs obligés ou facultatifs de la Trame brune ; cette distinction entre utilisateurs se justifie à l'aide de différentes classifications écologiques reconnues par la bibliographie :

(i) leur taille,

(ii) leur localisation dans le profil de sol +/- endogée,

(iii) leur présence +/- continue dans le sol,

(iv) la taille de leur univers de vie,

(v) leurs capacités de déplacement (v1) intrinsèques (distance parcourue par an) et (v2) extrinsèques.

Classification écologique de la faune du sol			Taxons de la Faune du sol, utilisateurs obligés de la Trame Brune										
Taille des taxons de la faune du sol			Mésio-faune				Groupes de la macrofaune directement concernés par la TB						
Taxons			Acariens du sol	Collemboles			Lombriens			Gastéropodes	Isopodes	Myriapodes	
sous-Taxons			(global)							Escargot & Limace	Cloportes	Diplopodes	Chilopodes
Localisation dans le profil de sol				Endogé / euédaphic	Hémi-édaphic	Epigé / épiédaphic	Endogé	Epi-endogé	Epigé	Epigé	Epigé	Epigé	Epigé
Cycle de vie +/- continu dans le sol			Géobiontes (cycle complet)				Géobiontes (cycle complet)						
Univers de vie			Motte de sol ou horizon pédologique				Profil de sol		que l'Horizon organique				
Dist. Horiz. prospectée par 1 indiv.			décimètre à mètre				mètre à décimètre						
Capacités de déplacement	Facteurs intrinsèques	Soies ou rien											
		Pattes (sans aile)				+ furca							
		Pattes & Ailes											
		Synthèse	==> principaux utilisateurs de la TRAME BRUNE										
	Facteurs extrinsèques	Anémochorie	oui?	oui?	oui?	Oui	Non	Non	Non	Non	X	X	X
		Hydrochorie	oui?	oui?	oui?	oui?	oui?	oui?	Oui	Oui	oui?	oui?	oui?
Zoochorie		oui?	oui?	oui?	Oui	oui?	oui?	Oui	Oui	X	X	X	
Anthropochorie		Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	

Utilisateurs continus de la TBr	
Utilisateurs occasionnels de la TBr	
Utilisateurs de la TVB, très peu concernés par la TBr	
Oui	utilise ce facteur extrinsèque
oui?	utilise peut-être ce facteur extrinsèque
Non	N'utilise pas ce facteur extrinsèque
X	On ne sait pas

Classification écologique de la faune du sol			Taxons utilisateurs facultatifs de la Trame Brune							
Taille des taxons de la faune du sol			Groupes secondaires de la macrofaune							
Taxons			Fourmis	Staphylins	Carabidae, Elateridae, Curculionidae, Scarabaeidae	Opilions	Araignées	Hétéroptères	Dermaptères	
sous-Taxons								Punaises		
Localisation dans le profil de sol			terricole / endogée	Epigé	Epigé	Epigé	Epigée	Epigé	Epigé	
Cycle de vie +/- continu dans le sol			Géophiles actifs (partiel)				Géophiles inactifs			
Univers de vie			Profil de sol		que l'Horizon organique					
Dist. Horiz. prospectée par 1 indiv.			mètre à kilomètre							
Capacités de déplacement	Facteurs intrinsèques	Soies ou rien								
		Pattes (sans aile)								
		Pattes & Ailes								
		Synthèse	Utilisateurs facultatifs, en fonction de l'espèce							
	Facteurs extrinsèques	Anémochorie	X	X	X	oui?	ballooning	X	X	
		Hydrochorie	Non	Non	Non	Non	oui?	Non	Non	
Zoochorie		oui?	oui?	oui?	oui?	oui?	oui?	oui?		
Anthropochorie		oui?	oui?	oui?	oui?	oui?	oui?	oui?		

Tableau 1 : Principaux taxons de la faune du sol utilisateurs obligés ou facultatifs de la Trame brune

Il apparaît que les caractéristiques écologiques listées pour ces taxons invertébrés vivant dans le sol et à sa surface sont les éléments prioritaires à prendre en compte pour comprendre la différenciation entre utilisateurs de la Trame brune.

Ceci nous permet d'établir des listes taxonomiques des organismes à étudier en priorité lors des futurs inventaires de la phase 2 : selon les crédits disponibles, il sera peut-être nécessaire de se focaliser sur l'inventaire des taxons géobiontes, utilisateurs obligés de la TBr (1^{er} tableau).

Ces tableaux ont été illustrés ci-dessous en se limitant à quelques classifications écologiques.

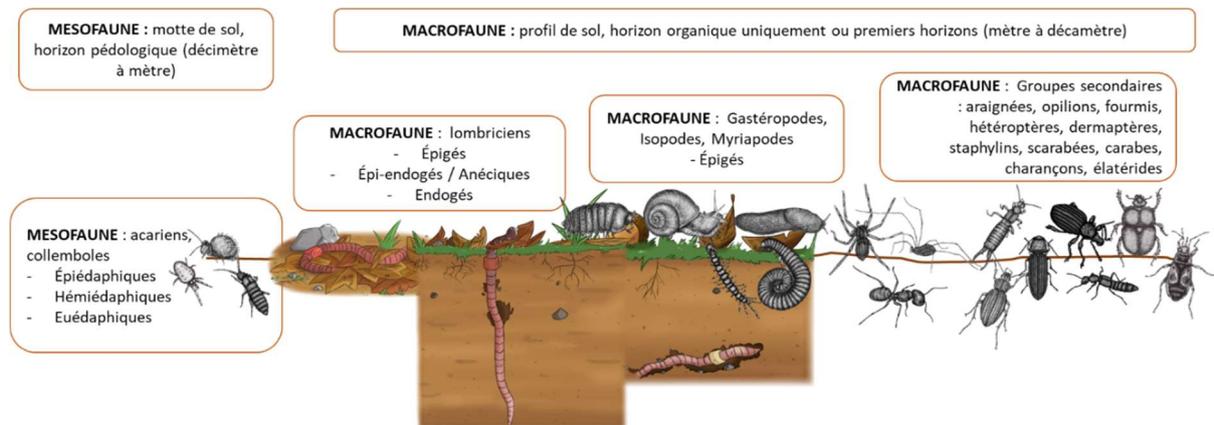


Illustration 1 : Classification écologique selon la taille et l'univers de vie des invertébrés utilisateurs de la Trame Brune

1.b.2. Méthodes d'inventaires faune et physico-chimiques

Pour un site donné, il s'agit de caractériser dans un même carré de 10m par 10m les invertébrés vivant dans le sol et à sa surface appartenant à la mésofaune (acariens, collemboles), et la macrofaune (principalement lombriciens, gastéropodes, isopodes, myriapodes, cf tableau dans note), ainsi que les paramètres physico-chimiques du sol (à partir du bloc réalisé pour les vers de terre + analyse densité apparente et humidité par sonde). Cette méthode est tirée de plusieurs projets dont l'ANR BISES <https://anr.fr/Projet-ANR-19-CE32-0012>. En complément, une description pédologique des sols représentatifs de chaque zone d'étude sera effectuée à la tarière.

Pour ce faire, il est nécessaire d'utiliser plusieurs protocoles listés et décrits ci-dessous qui sont adaptés en fonction du lieu de vie, de la taille et de l'activité des organismes étudiés.

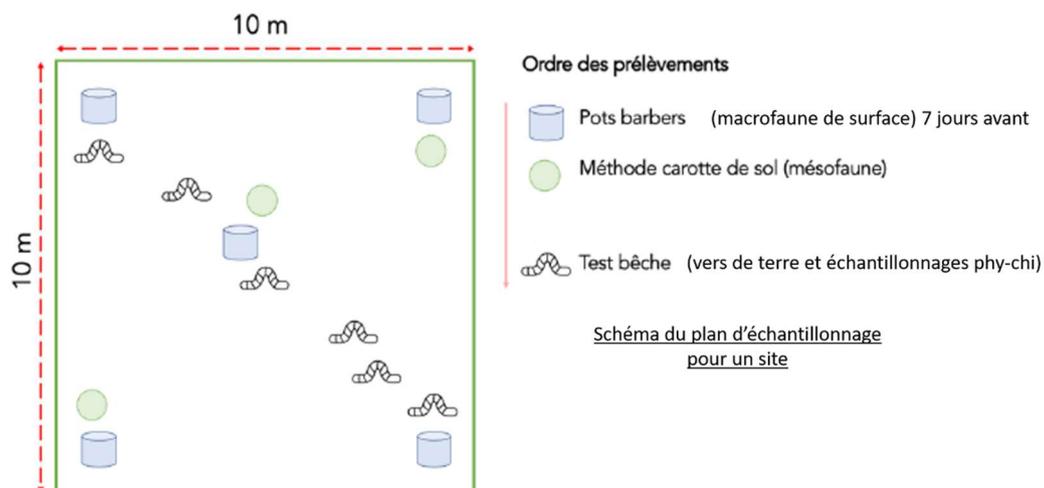


Illustration 2 : Schéma du plan d'échantillonnage pour un site

1.b.2.1. Technique du piège barber : capture des invertébrés du sol se déplaçant à la surface du sol

À l'aide de la tarière ou plante bulbe, un trou est creusé d'une profondeur et d'un diamètre légèrement supérieurs à ceux des pots en plastique. Un pot en plastique est inséré après étiquetage (comblant l'espace autour du pot avec de la terre pour éviter les trous ; le rebord du pot ne doit pas dépasser du sol pour ne pas gêner le passage des organismes). Le glycérol ou vinaigre est versé dans la moitié du pot. Un toit fait de la plaque cartonnée ou en plexiglass avec 4 piques est créé au-dessus du pot. Les pièges ainsi installés sont laissés 7 jours puis récupérés. Les pots sont fermés et conservés à + 4°C avant tri et identification dans l'éthanol.

5 pièges sont installés dans un carré de 10m par 10m

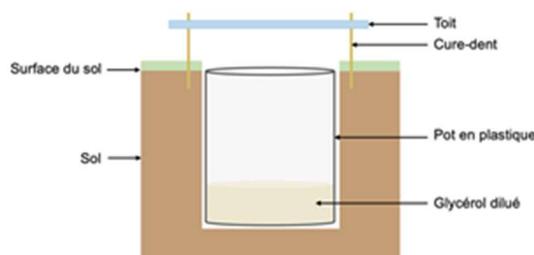


Illustration 3 : Schéma du piège Barber

1.b.2.2. Protocole Test Bêche pour échantillonner les vers de terre

La norme **ISO 23611-1** spécifie cette méthode. Ce protocole est décrit sur la page suivante : <https://ecobiosoil.univ-rennes1.fr/page/protocole-participatif-test-beche-vers-de-terre>

Sa mise en œuvre pas à pas est décrite dans le document en ligne :

<https://drive.google.com/file/d/1R70c0lei0xcD1MhRx9c5pHxuyHbltVn/view?usp=sharing>

Il s'agit de prélever un bloc de 20 cm de côté et de 25 cm de profondeur en plaçant la bêche à la verticale et en la basculant vers soi. Le bloc est prélevé et mis dans un bac ou sur une bâche pour rechercher les vers de terre présents en émiettant doucement le sol. Les vers peuvent être reconnus sur place puis relâchés et/ou mis dans des pots d'éthanol étiquetés. Du sol est échantillonné et placé dans des sacs pour analyses physico-chimiques plus tard. Le sol restant est remis dans le trou pour reboucher.

6 blocs sont triés dans un carré de 10m par 10m. 1 seul sac pour analyses physico-chimiques.



Illustration 3 : Test Bêche

1.b.2.3. Technique du carottier : capture des micro-arthropodes du sol

La norme **ISO 23611-2** spécifie la méthode utilisée dans ce projet.

Il s'agit d'enfoncer un carottier en plexiglass de 5 cm de profondeur dans le sol après avoir coupé la couverture végétale au sol si nécessaire. Le carottier est ensuite récupéré, étiqueté, puis bouché et mis au frais (glacière avec pains de glace puis +4°C) sans le retourner.



Illustration 4 : Technique du carottier

Les carottiers sont alors placés pendant 8 jours dans un extracteur à haut gradient de température de type « MacFadyen » où la température augmente de 35°C à 60°C. Cette extraction se réalise dans une solution d'acide benzoïque puis les organismes sont transférés dans de l'éthanol. Enfin, ils sont dénombrés sous une loupe binoculaire. L'identification des espèces est réalisée sous microscope à

contraste de phase après montage entre lame et lamelle suivant des caractères morphologiques précis.



Illustration 5 : Extracteur à haut gradient de température

1.b.2.4. Analyses des paramètres physico-chimiques du sol

Après échantillonnage du sol dans les blocs de sol réalisés pour déterminer les vers de terre, le sol est séché à l'air pendant plusieurs jours en prenant soin de casser les mottes pour les sols les plus argileux.

Paramètres physiques :

Granulométrie : La composition granulométrique du sol sera effectuée suivant la norme NF X31-107 (méthode par la pipette) avec la détermination de 5 classes granulométriques (les argiles, les limons fins, les limons grossiers, les sables fins et les sables grossiers).

Taux d'humidité et masse volumique : il s'agit de réaliser un échantillonnage avec un cylindre de volume connu dans le sol pour peser avant et après séchage à 105°C pendant 24h afin de déterminer la masse volumique apparente des sols étudiés.

Paramètres chimiques :

- Eléments liés à la fertilité (pH, C, N, P, K, CEC, bases échangeables), CaCO_3

La mesure de pH sera faite après mise en suspension du sol dans de l'eau avec un ratio masse/volume de 1/5 selon la norme NF ISO 10390. Les mesures de la capacité d'échange cationique (CEC) ainsi que les cations échangeables (Al, Ca, Mg, K, Na) associés seront réalisées selon la norme NF ISO 23 470 en utilisant soit la méthode Metson soit la méthode au chlorure de cobaltihexamine. Les concentrations en carbone organique et en azote total du sol seront déterminées par combustion sèche selon respectivement les normes NF ISO 14235 et NF ISO 13878. La teneur en CaCO_3 sera appréhendée par méthode volumétrique selon la norme NF ISO 10693.

- Eléments liés à des pollutions organiques type HAP et hydrocarbures totaux si nécessaire.

1.b.2.5. Description du site échantillonné

Des questionnaires d'enquête permettant de décrire la parcelle, son environnement et ses pratiques de gestion sont téléchargeables :

https://drive.google.com/drive/u/1/folders/1SF399fyL9L6ekEvLET5tVv_vudzLo11U

Chapitre 2 : Poser le cadre méthodologique d'identification, de localisation et d'évaluation de la Trame brune

2.a. Identifier les caractéristiques des éléments constitutifs de la Trame brune (Réservoirs et corridors)

Le paysage peut être défini comme « une portion de territoire hétérogène composé d'un ensemble d'écosystèmes en interactions » (Forman et Godron, 1986 in Burel et Baudry, 1999), ou encore résultant d'interactions complexes entre des « forces physiques, biologiques et sociales » (Turner et al. 1989). **L'étude de la structure d'un paysage allie donc composantes naturelles et anthropiques.** Limoges Métropole est un EPCI de taille importante, composé de 20 communes, à laquelle sont ajoutées 2 autres communes connexes (Nieul et Saint-Jouvent) afin d'obtenir une aire d'étude continue permettant d'observer les continuités écologiques de ce territoire.

L'analyse de la structure paysagère renvoie à un certain nombre de notions d'écologie du paysage : le niveau d'hétérogénéité, le niveau de fragmentation, la connectivité structurelle ou fonctionnelle, etc. La **fragmentation** et la **connectivité** sont des notions importantes dans le cadre des continuités écologiques, la connectivité étant vécue globalement comme une solution à privilégier quant aux problématiques de fragmentation des habitats et populations. La **connectivité structurelle** fait référence à une analyse de la connectivité fondée sur les éléments structurants du paysage (bosquets, cours d'eau, prairies, ...) alors que la **connectivité fonctionnelle** se base sur les déplacements réels des espèces considérées. Cette dernière alimente deux autres notions : **connectivités réelle et potentielle**, où la première utilise des données d'inventaires acquises, alors que la deuxième fait appel à des simulations spatiales (Bourgeois, 2015). La connectivité structurelle est plus facile à réaliser, car ne nécessitant que des données d'occupation du sol, elle est moins intéressante du point de vue écologique et biologique car elle ne prend pas en compte les caractéristiques des espèces cibles (Avon et al., 2014). La connectivité fonctionnelle, quant à elle, est plus exacte, mais demande des connaissances qui ne sont pas toujours disponibles (notamment biologiques). Les caractéristiques des éléments structurants sont également primordiales dans l'étude des continuités écologiques, où l'habitat est un élément structurant permettant ou non la viabilité de la biodiversité attenante. Ainsi, dans la connectivité potentielle, les caractéristiques d'un habitat, jugées favorables ou non selon l'espèce considérée, sont nécessairement à prendre en compte. La qualité des corridors est également importante (Henein et al., 1990). Au-delà des caractéristiques écologiques différenciant un réservoir d'un corridor pour la biodiversité des sols, la taille minimale de tels réservoirs sera à définir car la résolution spatiale d'observation de ces réservoirs sera très inférieure à celles utilisées dans la TVB.

En ce qui concerne les continuités écologiques de sols, de nouvelles questions se posent : Quelles sont les caractéristiques des habitats favorables des taxons considérés ? Que prendre en compte pour la caractérisation d'une trame brune : quels obstacles, comment définir les réservoirs ?

2.a.1. Identifier les caractéristiques favorables ou défavorables à l'accomplissement du cycle biologique des taxons-clés et les modalités de leurs déplacements au sein de la Trame brune

Les continuités écologiques de sols posent de nouvelles problématiques comparées aux trames vertes : **obstacles souterrains, pollution, absence d'espaces de pleine terre, zones non imperméabilisées, échelle réduite et variable selon le taxon** (micromètre à décamètre) (Sordello, 2017). De nombreuses études et articles scientifiques démontrent la sensibilité des lombriciens à la **pollution chimique et aux changements d'occupation du sol** (Amossé, 2014 ; Falco et al., 2015 ; Cluzeau et al., 2019). Les lombriciens sont fortement impactés par les divers facteurs qui influencent leur répartition, avec des prédispositions selon l'espèce : texture et acidité du substrat, aération et humidité, perturbations mécaniques, couvert végétal, et biodisponibilité de matière organique (Cluzeau et al., 2009). Il est observé en milieux agricoles et naturels qu'il existe une abondance plus importante en prairies (350 ind. m⁻²), intermédiaire en cultures (215 ind. m⁻²) et faible en forêts (50 ind. m⁻²) (Cluzeau et al., 2009). Ponge note également un gradient d'augmentation de l'abondance et de la biomasse des anéciques, et de la richesse spécifique et la biomasse de vers de terre selon un gradient d'utilisation des sols : cultures permanentes, cultures en rotation, prairies en rotation et prairies permanentes (Ponge et al., 2013). Peu de documents bibliographiques répertorient la répartition de la faune du sol en milieu urbain, néanmoins Vincent et al. (2022) identifient une **influence de certains paramètres stationnels, soit le type de milieu, le couvert végétal et la pierrosité, et pédologiques, avec la profondeur de l'horizon de surface, sur l'abondance et la richesse spécifique de la macrofaune épigée des sols urbains**, contrairement à d'autres facteurs physico-chimiques, pédologiques et stationnels qui n'ont pas ou peu d'incidence.

Le temps de déplacement dépend du taxon et de l'espèce, mais est de l'ordre de 10 à 15 m par an pour le Lombric commun (*Lumbricus terrestris*) d'après Daniel Cluzeau. Selon Jérôme Mathieu (2015), la dispersion peut être de l'ordre de 28 m par an. Leurs déplacements se font aussi bien à la verticale (au sein du profil du sol) qu'à l'horizontal (à la surface), d'où la nécessité de prendre en compte aussi bien l'épaisseur du sol que l'occupation du sol.

2.a.2. Etat de l'art et proposition de divers gradients pouvant influencer la qualité des réservoirs et des corridors à différentes échelles d'organisation des territoires d'étude

2.a.2.1. Gradient d'anthropisation du sol

Les perturbations au sein des sols causées par les actions anthropiques sont diverses et ont des impacts sur différents niveaux : elles peuvent modifier les propriétés bio-physico-chimiques des sols, mais aussi leur structure horizontale et verticale, dues au travail de la terre, le remaniement, l'extraction et/ou l'apport de matériaux exogènes (Bourguignon, 2015 ; Béchet et al., 2019 ; Maréchal, 2022). Cette modification des horizons peut être de degré différent, selon la nature de la modification, s'il s'agit de l'horizon de surface ou totalité du profil qui se voit modifié. La couverture du sol peut également être modifiée, notamment dans le cas d'une imperméabilisation totale qui "confiner" les sols. Ainsi, les sols urbains artificialisés sont nommés "Anthrosols" par le Référentiel Pédologique (Baize et Girard, 2009), et Technosols au sein de la classification internationale (IUSS, 2014 in Maréchal, 2022), où le deuxième degré de la nomenclature dépendra des moyens employés dans la (re)construction de ce sol (Maréchal, 2022). Une autre information importante concernant les

anthroposols est leur hétérogénéité spatiale, liée à la diversité des projets d’artificialisation que ce soit temporellement ou spatialement, parfois de simplement quelques mètres, ce qui complexifie énormément la répartition et l’analyse des sols urbains (Béchet et al., 2019).

Il est donc nécessaire de caractériser l’anthropisation des sols de la zone d’étude à l’aide d’un gradient allant des sols (1) non anthropisés, à (2) moyennement anthropisés ou (3) totalement anthropisés. Cette anthropisation est intrinsèquement liée à l’occupation du sol, cette anthropisation dépendant aussi des usages et des modes de gestion des sols (en tenant compte de la variable historique) (Tableau 2).

Type	Prof min N	Gradient	RRP	SUITMA
Naturel	0 cm	Sols non	Luvisol	
Modifié sur Naturel	< 50 cm	Sols moyennement modifiés	Luvisol anthropisé	Vegetated pseudo-natural
	> 50 cm		Anthroposol reconstitué ou construit	Vegetated engineered
Modifié	> 50 cm ou ? (refus)	Sols entièrement modifiés	Anthroposol artificiel	 
Modifié sur Artificiel				
Artificiel				
Artificiel sur Modifié				

Tableau 2. Gradient d’artificialisation du sol et correspondance selon les référentiels (à partir du sol naturel, par. ex. Luvisol) (J.Maréchal, 2022).

2.a.2.2. Gradient d’occupation du sol

En termes d’occupation du sol, **la densité des éléments anthropiques d’aménagement du territoire** (routes, ...) et **l’agencement des éléments urbains** (bâti, limites parcellaires, évolution historique, ...) **sont des éléments à prendre en compte**. Ces formes urbaines impactent nécessairement la proportion d’espaces libres (= non imperméabilisés), mais aussi la forme et l’isolement potentiel de ces derniers. Ainsi, les formes les plus denses abritent moins d’espaces libres végétalisés, et à l’inverse, ceux avec des maisons individuelles ou encore des grands ensembles possèdent des espaces végétalisés plus importants. Plus qu’un gradient rural – urbain, il est important et nécessaire de réfléchir selon l’hétérogénéité du milieu urbain en s’intéressant aux formes urbaines (Flégeau et al. 2020) où la biodiversité des vertébrés (en termes de richesse spécifique et d’abondance) peut varier de manière importante.

En ce qui concerne la faune invertébrée du sol, la fragmentation de cette trame brune par les éléments urbains est d’autant plus importante que certains taxons ont des capacités de dispersion très réduites (cf chapitre 1). Prendre en compte la diversité des formes urbaines va de pair avec leur date de construction, qui exercera une influence sur les techniques de remaniement des sols, mais aussi la perméabilité entre espaces construits, notamment pour le résidentiel individuel (les limites parcellaires pouvant être plus ou moins poreuses - murets, haies, clôtures, ...).

L'hétérogénéité des espaces végétalisés en milieu urbain et périurbain favorise une diversité d'habitats et micro-habitats pour les communautés de la faune du sol, et donc influence la composition taxonomique des communautés de ces divers milieux, et donc leur rôle fonctionnel. Vincent et al. (2022) préconisent l'intégration de cette diversité d'habitats et micro-habitats dans l'identification et la caractérisation de la trame brune, ce qui favoriserait sa prise en compte dans les projets d'aménagement.

2.a.3. Caractériser les obstacles perçus par la pédofaune à l'aide d'un gradient d'isolement défini selon la franchissabilité des obstacles

Un certain nombre d'obstacles, physiques mais aussi chimiques, peuvent contraindre le déplacement de la faune du sol. Selon les dires d'experts, un seuil de franchissabilité des **réseaux routier et ferré** est caractérisable mais dépendant du taxon et de ses capacités intrinsèques de déplacement ; ainsi, en ce qui concerne les lombriciens, un seuil de 6 mètres peut être utilisé (Tableau 3).

Routes infranchissables	"importance" = '1' OR "importance" = '2'	BD Topo (IGN)	Autoroutes, bretelles, nationales, ...	6 mètres
Routes quasi-infranchissables	"importance" = '3'		Départementales, avenues, boulevards, routes importantes, ...	6 mètres
Routes difficilement franchissables	"importance" = '4' OR "importance" = '5' OR "importance" = '6' PUIS "largeur" > '6'		Certaines routes	3 mètres
Routes sans problématique particulière	X		Ruelles, sentiers, chemins, routes < 6 mètres	

Tableau 3. Gradient de franchissabilité des routes par la faune du sol et données SIG correspondantes (Leprisé et Maréchal, 2022).

Les milieux urbanisés possèdent des obstacles très variés : **les murets autour du bâti** (qu'il soit privé ou public), **le bâti, les bords de voies avec trottoirs, les éléments anthropiques dans le sol** (canalisations, fondations, empierrement, sous-bassement de route, ...) ainsi que les **contaminations organiques ou minérales des sols**.

Néanmoins, il existe un manque de données historiques important qui ne permet pas, à ce stade, d'inclure divers obstacles dans la trame brune potentielle. Ainsi la contamination des sols et les obstacles physiques souterrains ne peuvent pas être pris en compte dans la trame brune potentielle de Limoges Métropole. En surface, seuls les réseaux routiers, les éléments imperméables et bâtis sont cartographiables correctement grâce aux données disponibles, ce qui n'est pas le cas des barrières verticales comme les murets ou les rebords de voies. Les limites parcellaires obtenues grâce au cadastre permettent de pallier partiellement ce manque, mais avec un taux d'erreur relativement assez important (environ 40%). De plus, les années de construction ne suffisent pas pour caractériser le type de barrières autour d'habitats résidentiels, car les tendances peuvent varier de façon locale, notamment après travaux. L'impact des murets est donc assez difficilement cartographiable, car il demanderait la création d'une base de données spécifique attachée à localiser et caractériser le type de barrières autour des habitats collectifs ou résidentiels à l'échelle d'un quartier (1/5000e maximum).

2.b. Cahier des charges méthodologique permettant la caractérisation et la cartographie de la Trame brune à l'échelle d'un EPCI de taille moyenne

2.b.1. Etape 1 : Définition et caractérisation de l'aire d'étude (Limoges Métropole et territoires voisins)

Limoges Métropole est une communauté urbaine d'une superficie de 523.19 km². Elle est découpée en deux par la Vienne, fleuve qui passe au sein de la ville de Limoges et qui reste l'élément hydrographique avec la plus grande largeur sur le territoire étudié, soit plus de 50 mètres (Illustration 6). Cependant, les cours d'eau, dans la mesure où les vers de terre peuvent "se déplacer" au gré de l'eau, du moment qu'elle est oxygénée, ne sont pas considérés comme un élément fragmentant pour les lombriciens.

Elle se caractérise par un cœur métropolitain urbanisé assez dense, mais très vite regagné par des territoires agricoles et naturels. Sur la totalité de la zone d'étude, les espaces agricoles, selon Corine Land Cover en 2018, occupent 58% du territoire. Les espaces naturels ou semi-naturels (« favorables »), représentent 24%, alors que le tissu urbain, comprenant les zones industrielles et autres milieux perturbés, représente 18% (Illustration 7). Une majeure partie du territoire étudié est donc occupée par des territoires agricoles, néanmoins caractérisés par des fonctions et usages différents, car une majeure partie de ces espaces agricoles sont en réalité des prairies, temporaires ou permanentes.

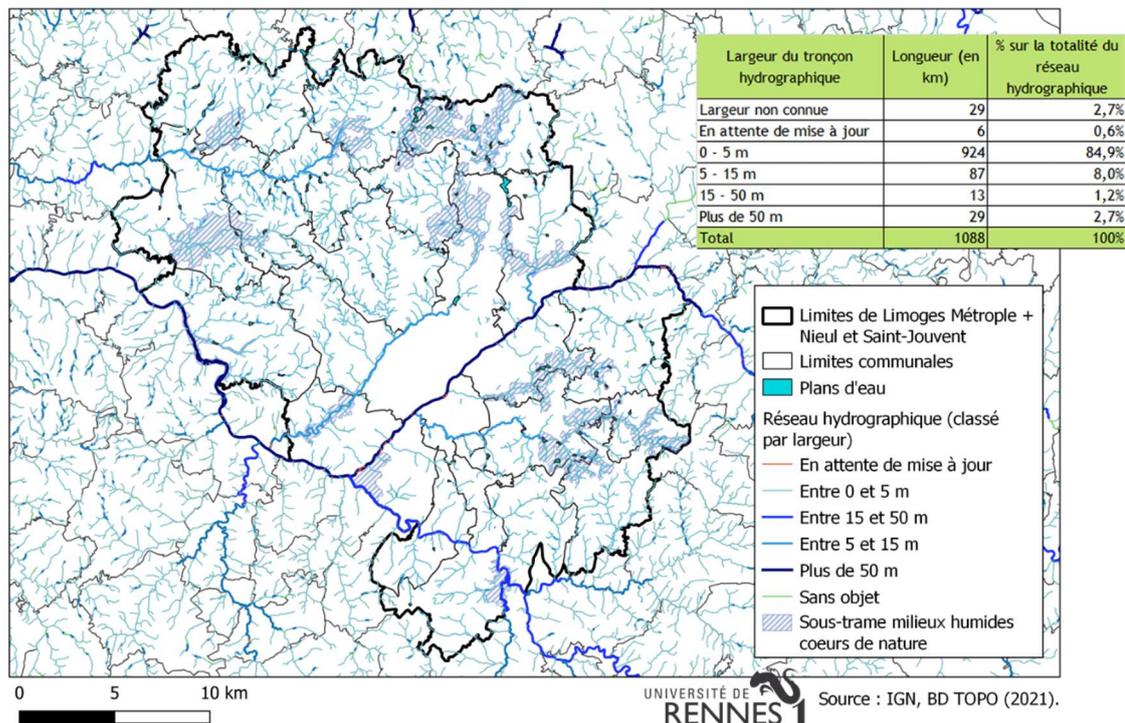


Illustration 6. Réseau hydrographique de Limoges Métropole et ses alentours.

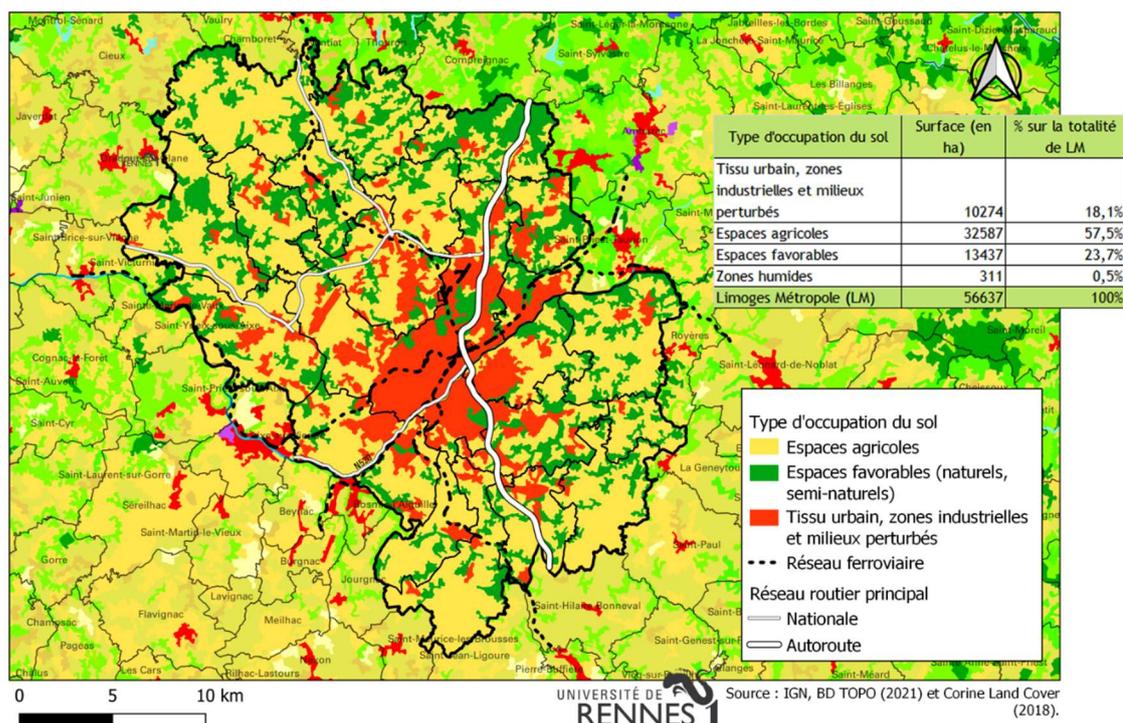


Illustration 7. Occupation du sol sur la zone d'étude selon la couche d'occupation du sol Corine Land Cover 2018.

Limoges Métropole est caractérisée par un centre urbain assez dense. En effet, la commune de Limoges est, très tôt dans l'histoire, un carrefour commercial important (Robert et al., 1970). C'est néanmoins à partir de l'industrialisation, notamment avec l'arrivée du train et l'ouverture de la gare de Limoges-Bénédictins en 1856 que le développement urbain de Limoges commence. De nombreux logements ouvriers sont créés autour des deux gares, et de nouveaux remembrements urbains ont lieu au 19ème siècle qui complexifient l'agencement urbain. Au 20ème siècle, des logements sociaux en périphérie des quartiers ouvriers voient le jour.

Suite à cela, notamment dans la seconde partie du 20ème siècle, le développement urbain commence à toucher les communes aux alentours de Limoges : Le-Palais-sur-Vienne, Panazol, voit une augmentation importante de l'emprise des territoires artificialisés des années 50 à 90, avec la construction d'habitats résidentiels individuels en majorité (Illustration 8).

Aujourd'hui, cette croissance est assez stagnante, cependant une tendance à la hausse est observable, notamment pour des villes à dominance rurale jusqu'ici, posant la question des tendances d'expansion urbaine des prochaines années (Illustration 9).

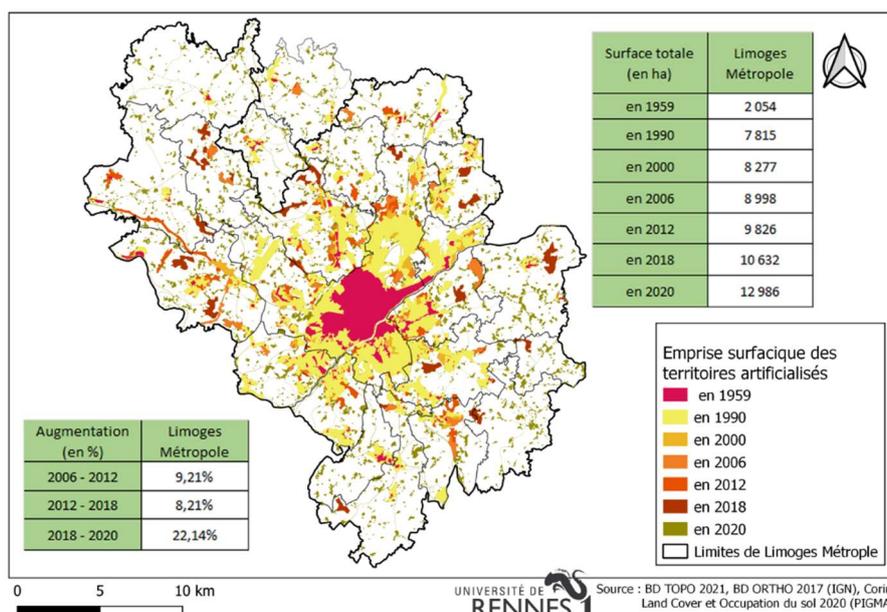


Illustration 7. Évolution de l’emprise des territoires artificialisés de 1959 à 2020. Emprise vectorielle à partir de la photographie aérienne de 1959, et utilisation des couches d’occupation du sol Corine Land Cover et PIGMA.

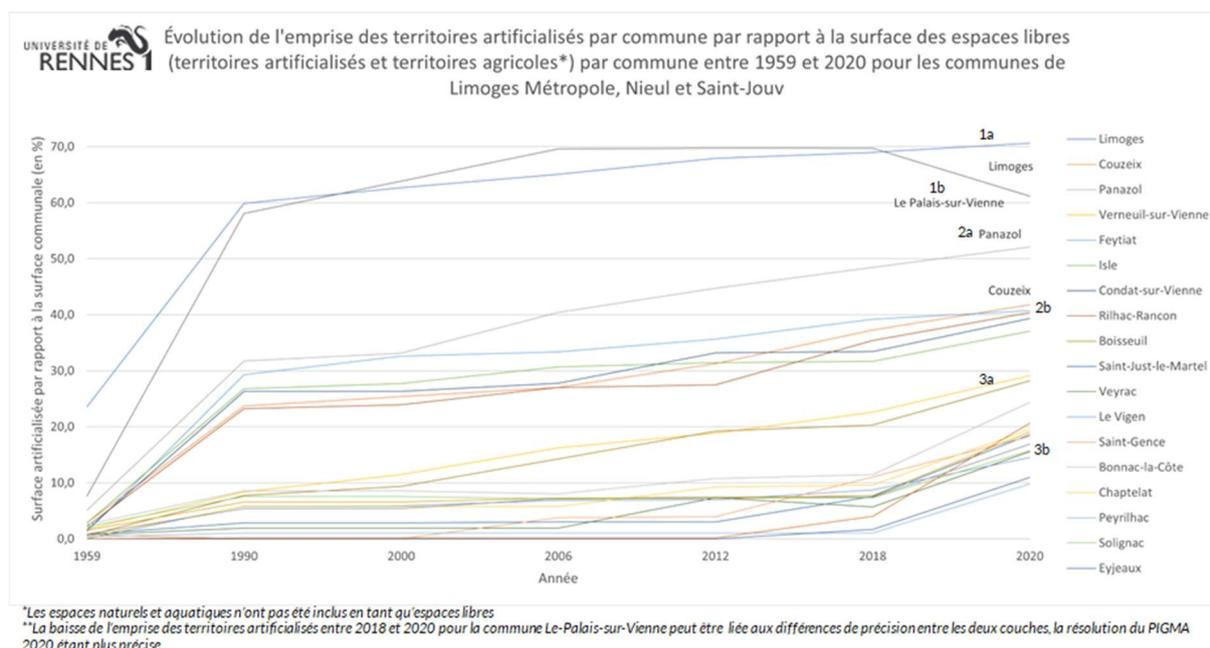


Illustration 9. Courbe cumulée de l’emprise des territoires artificialisés de 1959 à 2020 par commune par rapport aux espaces libres artificialisés et agricoles par commune. (L’expansion urbaine se produisant majoritairement à partir des surfaces agricoles plutôt que naturelles).

Au sein de la ville elle-même, l’hétérogénéité spatiale se traduit par une diversité de formes urbaines (Clergeau, 2007 ; Flégeau et al., 2021). Limoges, notamment, est caractérisé par un tissu urbain dense dans son centre avec des routes étroites et peu d’espaces libres, lié notamment à l’histoire médiévale de la ville. Au 19ème, la tendance est à la construction de grands immeubles le long d’artères importantes, avec une densité de bâti là encore importante. Les autres quartiers de la ville

se caractérisent majoritairement par un tissu urbain diffus, avec une part importante de maisons individuelles avec jardins et de grands ensembles avec des espaces végétalisés. Ce dernier constat est aussi valable pour les communes aux alentours, le plus souvent construites autour d'un centre-ville historique ou d'un petit bourg villageois, avec une majorité d'habitats individuels dispersés.

Les réseaux routiers et ferrés sont souvent considérés comme des éléments fragmentants le paysage, mais l'effet de barrière dépend néanmoins de l'usage, et de la largeur des routes. Limoges Métropole comporte un réseau routier assez dense. Sur la totalité du réseau routier (4 017 km), les éléments fragmentants (avenue, boulevard, nationale, autoroutes), sont en proportions assez faibles (19%). Si l'on prend en compte les largeurs, on voit qu'une majeure partie du réseau fait moins de 6 m (les routes où la largeur est "sans objet" étant en majorité des petites routes également), néanmoins les routes au-delà de 6 m découpent le paysage de manière significative, avec l'autoroute qui coupe le paysage du Nord au Sud (Illustrations 10 et 11).

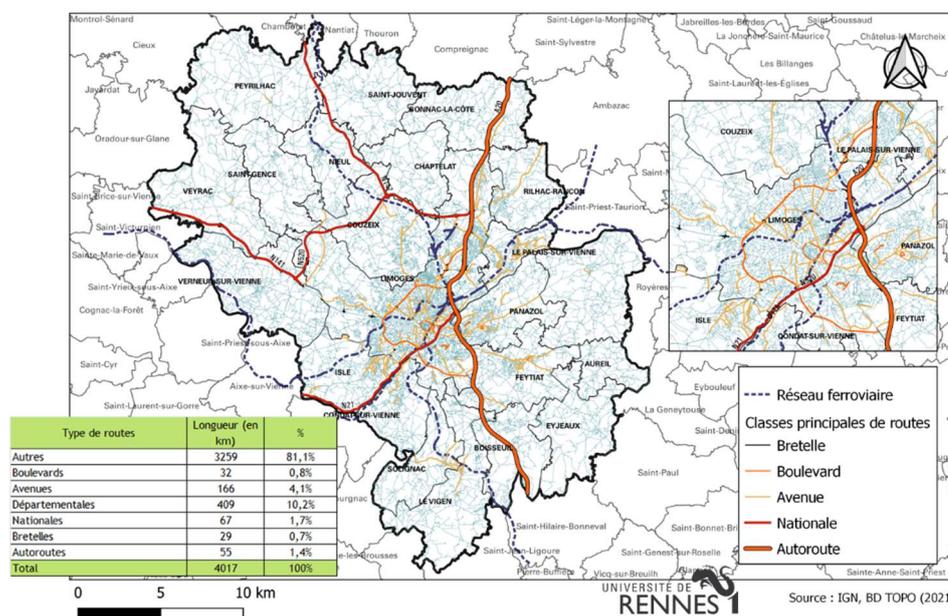


Illustration 10. Réseau routier de Limoges métropole selon les différentes classes principales de routes.

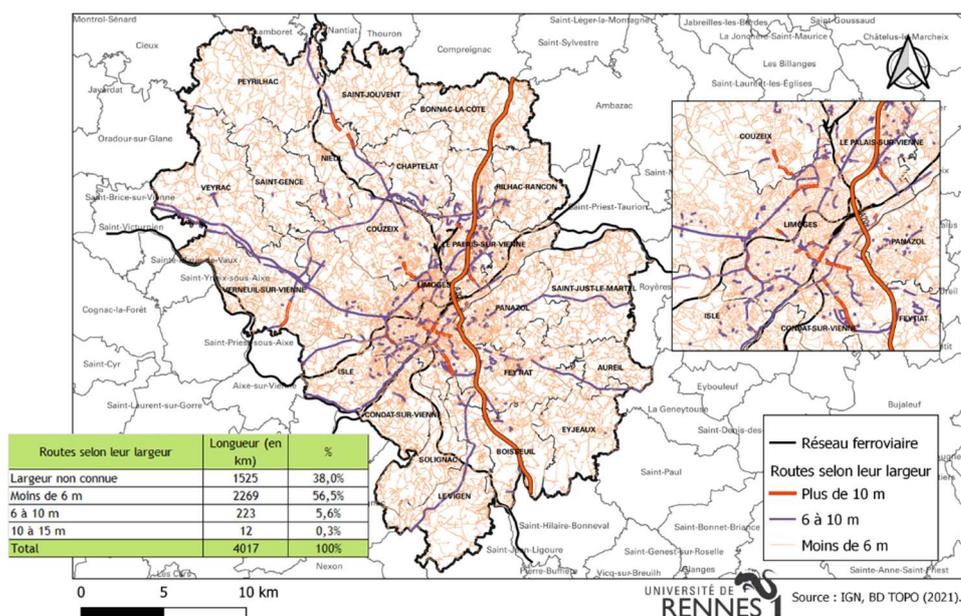


Illustration 11. Réseau routier de Limoges métropole selon sa largeur.

2.b.2. Etapes 2 et 3 : Délimitation des espaces bâtis ou des infrastructures (sols imperméabilisés) vis-à-vis des espaces non bâtis (sols perméables) et qualification

Dans un premier temps, il est nécessaire d’identifier et caractériser les divers espaces où la présence de la faune du sol est possible, soit les espaces de sols non imperméabilisés. Ces sols peuvent être artificialisés ou non artificialisés, dépendant notamment des usages et de l’historique du site.

Le bâti est considéré comme un espace forcément imperméable. Les espaces libres hors bâti sont caractérisés selon la nomenclature des couches d’occupation du sol. Cependant, ces couches d’occupation du sol ne renseignent pas précisément sur l’imperméabilité ou la perméabilité du sol. De plus, d’autres espaces sont plus ambivalents, comme les emprises hospitalières où certains espaces sont imperméables (parkings par exemple). Cela pose la question de la précision limitée des couches d’occupation du sol, qui ne permettent pas, pour les zones artificialisées, d’avoir des données avec une précision suffisante sur les espaces libres végétalisés... et nécessite la création d’une couche de végétation plus précise.

Pour y remédier, il est possible de calculer l’**Index de Végétation par Différence Normalisée (NDVI)**, qui est un indice permettant d’analyser des images de télédétection afin de qualifier la réflectance de la végétation. Cet indice est utilisé le plus souvent afin de juger de la bonne santé de la végétation.

En effet, pour effectuer leur photosynthèse, les feuilles absorbent les lumières visibles (de 400 à 700 nanomètres), néanmoins les rayonnements infrarouges sont rejetés par les cellules des feuilles, afin d’éviter de brûler les tissus, expliquant que la réflectance du rayonnement solaire des feuilles sera plus importante en infrarouge (de 700 à 1100 nm).

L’indice est la différence entre la réflectance en proche infrarouge et la réflectance en rouge, comme ci-dessous :

$$\text{NDVI} = (\text{PIR}-\text{R})/(\text{PIR}+\text{R})$$

Un seuil a également été appliqué afin de ne prendre en compte que les valeurs supérieures à -0.15, qui permettent de prendre en compte une majorité d'éléments végétalisés (pelouses, arbres...) :

$$(\text{B@1} - \text{B@2})/(\text{B@1} + \text{B@2}) > '-0.15'$$

Les espaces d'une surface importante étant déjà caractérisés au sein de la couche d'occupation du sol, la couche de végétation calculée par l'index de végétation ne sera utilisée que pour les territoires artificialisés.

Certaines corrections sont à réaliser sur la couche obtenue, dans la mesure où nous cherchons avant tout à caractériser les sols non imperméabilisés, et les surfaces de végétation obtenues peuvent ne pas correspondre aux limites des espaces non-imperméabilisés (par exemple, le feuillage d'un arbre peut recouvrir une route), ou il peut y avoir des erreurs (par exemple, certains bâtis peuvent avoir un indice de réflectance similaire à la végétation). Ces corrections concernent donc le bâti et les réseaux routier et ferré.

Pour pouvoir corriger ces erreurs, il est nécessaire de créer :

- une zone tampon de 6 à 3m autour des entités linéaires de routes selon la largeur et l'importance de ces entités (chemin et sentier non compris).
- une zone tampon de 3 m autour des voies ferrées en surface.

Les valeurs de 6m et 3 m étant basées sur une interprétation visuelle des photographies aériennes et donc potentiellement assez arbitraires et discriminantes pour certaines routes, voire insuffisantes pour d'autres entités.

Afin d'effectuer cette correction, il est possible d'utiliser l'outil SIG "Différence" qui permettra de supprimer les surfaces de la couche de végétation intersectant les zones tampons et la couche de bâti. Après observation, certaines entités ("artefacts") peuvent être créées après ces traitements, d'où une nécessité de supprimer les entités à minima de moins de 0.1 m². Enfin, l'intersection avec la couche d'occupation du sol permet d'attribuer la typologie d'occupation du sol à la couche de végétation calculée afin de caractériser l'usage des sites (Illustration 12). Cela permet d'obtenir alors une couche complète des surfaces végétalisées de la zone d'étude.

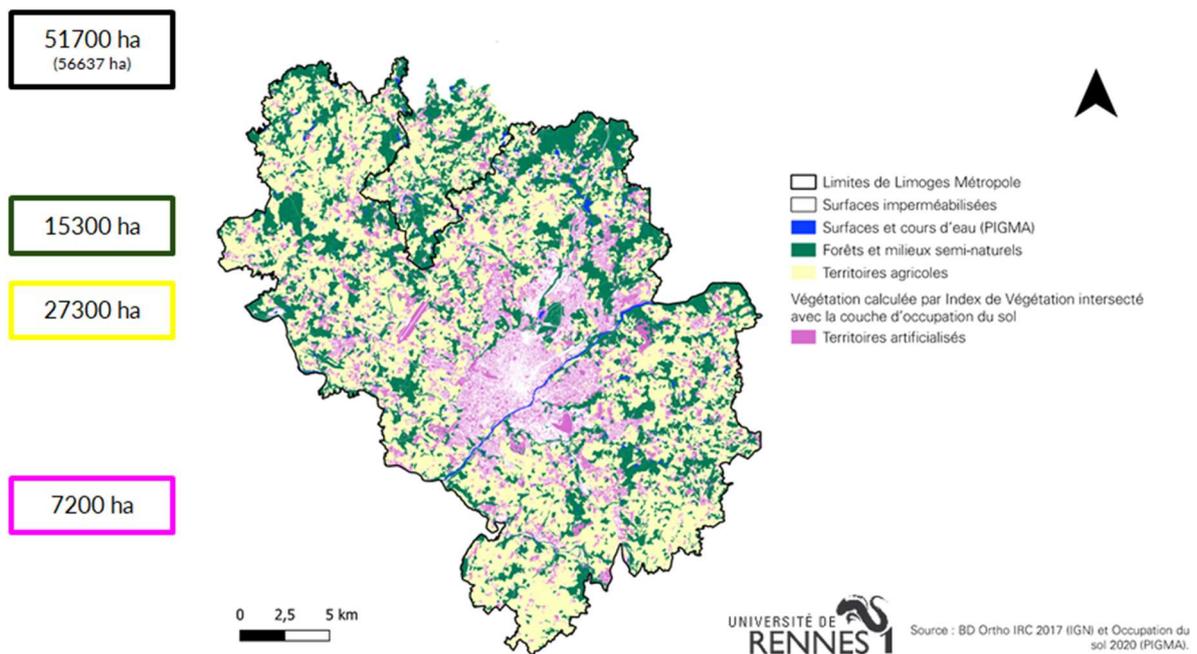


Illustration 12. Espaces libres végétalisés (en vert, jaune et rose) sur l'ensemble des communes de la zone d'étude. (La différence entre 56 637 ha et 51 700 ha correspond aux surfaces imperméabilisées et surfaces et cours d'eau)

2.b.3. Etape 4 : Caractérisation des éléments de la Trame brune

L'étape suivante consiste à qualifier la notion de réservoir et corridor pour la faune du sol. Dans le cadre des trames verte et bleue, plusieurs critères définis par les orientations nationales (décret 2014-45 du 20 janvier 2014) sont recommandés ou obligatoires ; néanmoins, la méthode employée n'est pas indiquée (Vanpeene-Bhuier et Ansallem, 2014). De nombreuses méthodologies différentes existent ; néanmoins, certains types d'informations utilisés pour la caractérisation des réservoirs ressortent d'une analyse des différents SRCE par Ansallem et al. (2010) : l'intégration des zonages et inventaires de protection et/ou de gestion, la présence de certaines espèces et/ou habitats, et la qualité des habitats. L'identification de corridors repose sur l'analyse de la connectivité, selon des méthodes diverses : l'interprétation visuelle, la méthode de la dilatation-érosion ou la méthode de la perméabilité des milieux. L'identification de corridors ne peut être établie qu'après identification des réservoirs.

Pour les réservoirs de la trame brune, **un seuil de taille minimale de 5m²** a été retenu selon les dires d'experts, et les surfaces supérieures à 1 hectare seraient quant à elles assez grandes pour que les communautés et populations puissent se renouveler (selon le type d'usage et gestion de cet espace). **Les espaces libres végétalisés à enjeux seraient donc les espaces inférieurs à 1 ha.**

Concernant l'usage et l'anthropisation des sols, un milieu favorable ou très favorable permettrait donc aux taxons considérés d'y réaliser l'entièreté de leur cycle de vie, et correspondrait potentiellement à un **réservoir**. À l'inverse, un espace où les sols seraient plus hétérogènes en lien avec une profondeur inférieure à 0,40m ou/et en lien avec des remaniements anthropiques, pourrait être qualifié de **corridors** en permettant le déplacement d'un réservoir à un autre.

Actuellement, la cartographie des sols artificialisés de la métropole n'est pas encore réalisée, ce qui ne permet donc pas d'identifier le degré d'anthropisation des sols de la zone d'étude. Ce manque de données empêche de considérer les caractéristiques bio-physicochimiques et structurales des sols urbains dans la qualification des réservoirs. Cela nous amène à ne pas s'attarder à la caractérisation de réservoirs à ce stade de réflexions et d'informations disponibles, et de considérer les espaces végétalisés dans leur ensemble. De toute manière, il existe peu de littérature sur l'impact des usages et des modes de gestion sur la biodiversité des sols urbains (Maréchal, 2022).

2.b.4. Etape 5 : Caractériser le degré d'isolement potentiel et la connectivité potentielle des sols végétalisés de Limoges Métropole

Après avoir caractérisé les espaces libres végétalisés, la connectivité potentielle et le degré d'isolement potentiel entre ces sols doivent être définis afin d'établir le bilan des espaces connectés ou déconnectés au sein de la zone d'étude. Une zone tampon autour des limites de Limoges Métropole de 500 mètres est également considéré.

La méthode de la dilatation-érosion (Illustration 13), malgré sa simplicité et donc l'absence de prise en compte des caractéristiques écologiques, a pour vocation d'identifier des corridors entre différents habitats (réservoir). Ici, elle permettra l'identification des espaces libres végétalisés connectés entre eux selon des seuils de distance/dispersion préétablis. Plusieurs seuils ont ainsi été testés (6m et 15m), correspondant à des capacités de dispersion différentes selon les taxons et espèces considérés ; néanmoins, nous n'avons conservé que le seuil de 6 mètres, qui est apparu suffisant pour estimer la connectivité entre les espaces considérés, capables d'héberger cette biodiversité des sols (Figure 9).

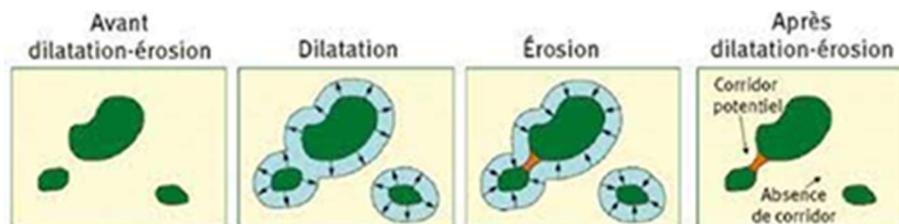


Illustration 13. Représentation schématique de la méthode de dilatation-érosion permettant d'observer les corridors potentiels (Ansalle, Deshayes et Bonneville, 2010)

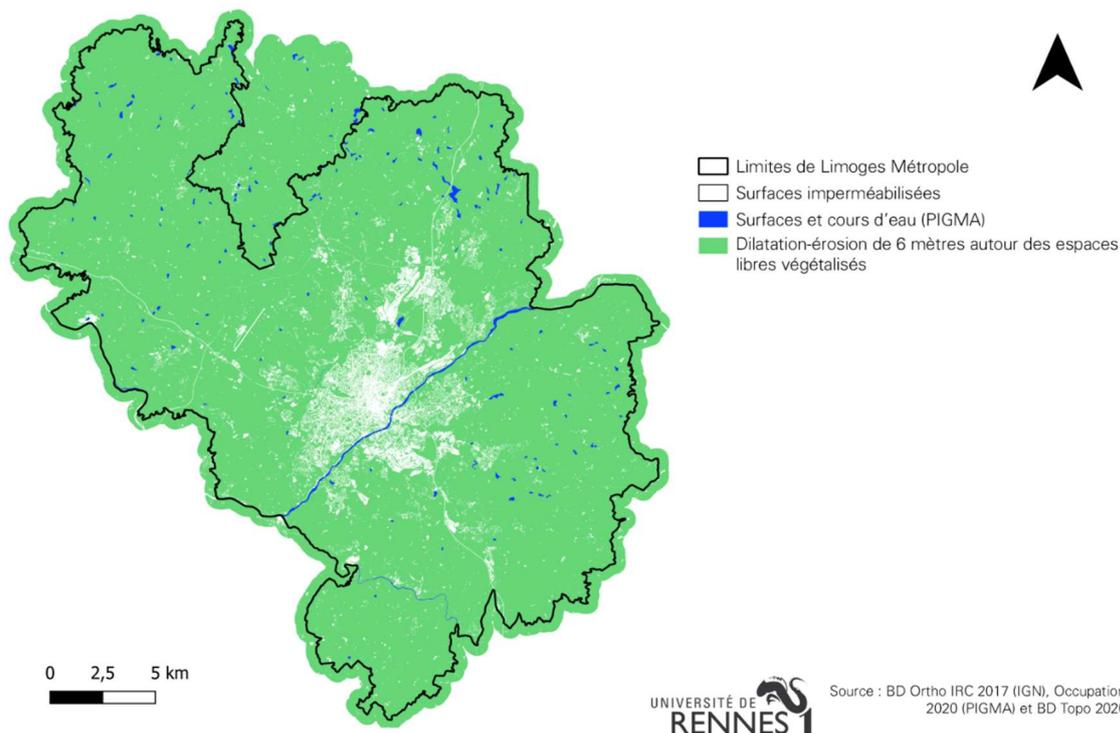


Illustration 14. Évolution des espaces libres végétalisés après dilatation-érosion de 6 mètres (soit une augmentation de 3% des espaces libres végétalisés, correspondant à la création de surfaces permettant la connexion entre espaces libres végétalisés (cf. Figure 11c)).

Une zone tampon de 6 mètres a été appliquée autour des espaces considérés, suivie d'une érosion de cette même distance, avant correction pour ne pas prendre en compte les éléments fragmentants comme précédemment :

- Le bâti a été supprimé
- Une zone tampon de 6 à 3 m autour des voies routières, selon le gradient de franchissabilité (Tableau 2), de 3,0 m autour des voies ferrées
- Une zone tampon de 0,5 m autour des limites parcellaires caractérisées comme potentiellement des « murets » selon la date de construction et la nomenclature de l'occupation du sol correspondant à la forme urbaine (dense, dispersé, individuel, collectif, ...) pour les parcelles ayant ces deux données disponibles.

Cette méthode permet d'identifier les ensembles de la trame brune supérieurs à 1 ha qui sont considérés comme inter-connectés. Ainsi, la majeure partie des sols de la trame brune seraient connectés (56 659 hectares soit 88% de la surface totale de Limoges Métropole et de sa zone tampon de 500m). À l'inverse, les espaces libres végétalisés inférieurs à 1 ha seraient considérés comme potentiellement **isolés** (541 hectares soit 0,8%) (Illustration 15).

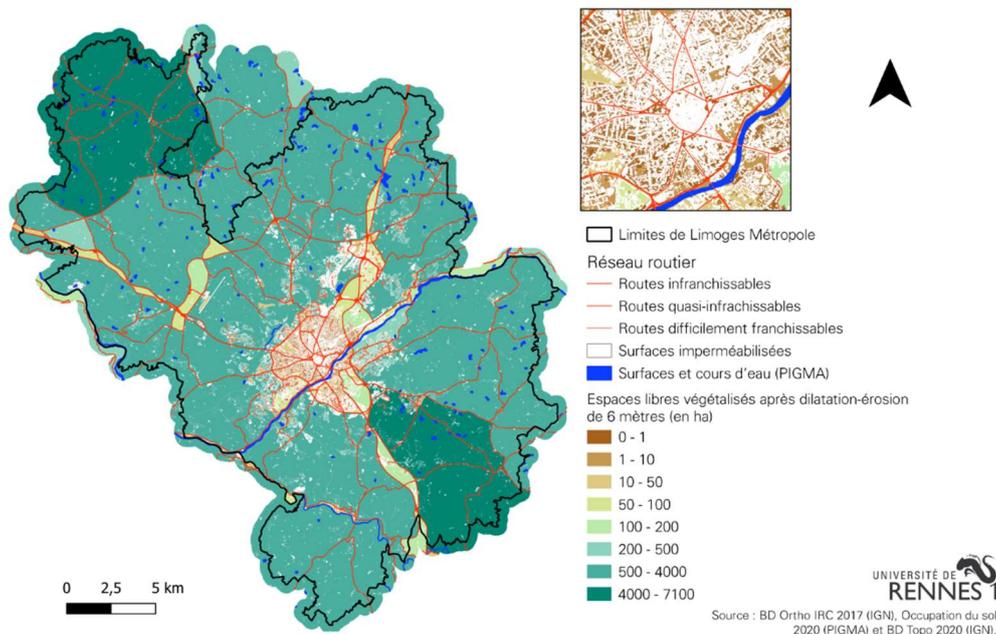


Illustration 15. Interconnexion et isolement au sein de Limoges Métropole, après la prise en compte les éléments fragmentants (routes, voies ferrées, bâti, murets).

Les espaces de moins de 1 hectare sont majoritairement situés au sein du tissu urbain, notamment le tissu dense et/ou dans les quartiers résidentiels anciens, où la présence de barrières parcellaires (murets) et les routes (nombreuses en centre-ville) vont impacter les possibilités de dispersion. Les communes rurales ont majoritairement des sols inter-connectés : les principales discontinuités sont liées aux réseaux routier et ferré qui fragmentent le paysage, sachant que la densité de ces réseaux et du bâti y est moins importante.

Ainsi, l'enjeu principal de la trame brune se trouverait donc en milieu urbain principalement, où, selon la densité d'urbanisation, y sont observées les fragmentations les plus importantes.

2.b.5. Cartographie de la Trame brune potentielle

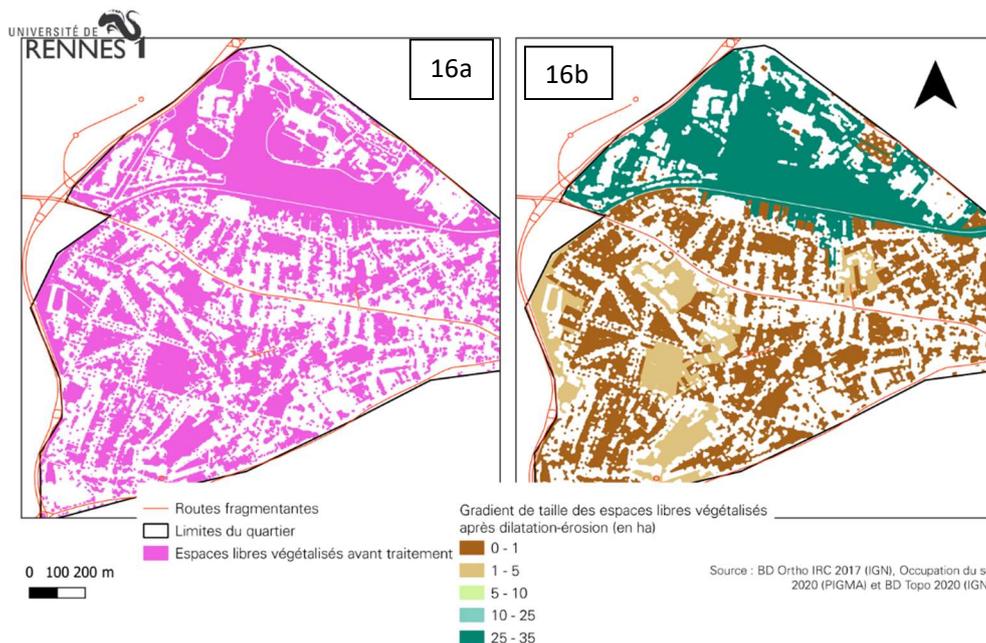
Si nous nous basons sur la définition la plus commune des continuités écologiques (soit des réservoirs reliés entre eux par des corridors), il est difficile, pour la trame brune, de distinguer les corridors des réservoirs à une résolution importante (1:250000, Limoges Métropole); cette difficulté est due au fait que la majeure partie du territoire est occupée par des réservoirs.

Par contre, à l'échelle du quartier, cette distinction est potentiellement plus facilement observable comme le montrent les cartes suivantes de l'illustration 16. À partir de l'inventaire des espaces libres végétalisés (16a), suivi à une dilatation-érosion, il est possible d'observer les surfaces végétalisées connectées entre elles selon un gradient de taille des polygones interconnectés (16b).

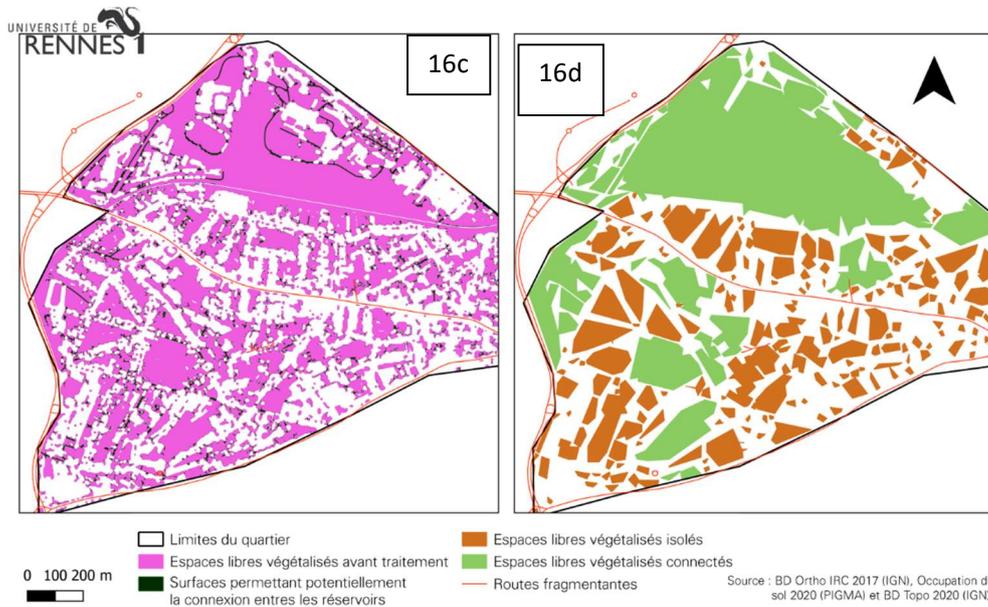
Les surfaces en noir sur la carte 16c sont des surfaces permettant potentiellement la migration de la faune du sol entre 2 "réservoirs". Ainsi, bien que ces espaces ne correspondent pas à des "corridors" comme l'entend la trame verte (soit des continuités végétales), ils peuvent être des points de connexion entre les différents réservoirs.

Dans la mesure où les formes des polygones d'espaces libres végétalisés sont assez complexes à analyser (de petits espaces ou ayant des formes très variées et complexes, le plus souvent dues aux limites parcellaires), il est possible **de simplifier ce paysage urbain végétalisé entre uniquement des espaces connectés et des espaces isolés (16d); ceci permettra d'analyser les continuités potentielles** sans perdre en cohérence du point de vue de la réalité-terrain.

Cette simplification pourrait en effet permettre une cartographie plus facile à « lire » ; néanmoins, elle engendre aussi une perte d'informations non négligeable : les espaces de moins de 200 m² ont été exclus de la cartographie, par souci de simplification. Supprimer les très nombreux polygones de petite taille n'entraîne pas une variation importante au niveau de la surface totale, mais supprime une partie des réservoirs potentiels de petite taille (<200m²) qui pourraient quand même avoir une utilité pour la faune du sol.



Illustrations 16a et 16b. Exemple d'un quartier résidentiel à l'ouest de Limoges (Puy-las-Rodas), avec les espaces libres végétalisés extraits de l'illustration 12 (16a) et la distribution des espaces libres végétalisés après dilatation-érosion de 6 mètres, selon un gradient de taille des polygones interconnectés (16b).



Illustrations 16c et 16d. Exemple d'un quartier résidentiel à l'ouest de Limoges (Puy-las-Rodas), avec les surfaces permettant potentiellement la connexion entre réservoirs (16c) et cartographie synthétique des espaces libres végétalisés, soit connectés soit isolés (16d).

De la même manière que nous avons simplifié l'information dans l'illustration 16b, il est possible de l'appliquer à la zone d'étude (illustration 17).

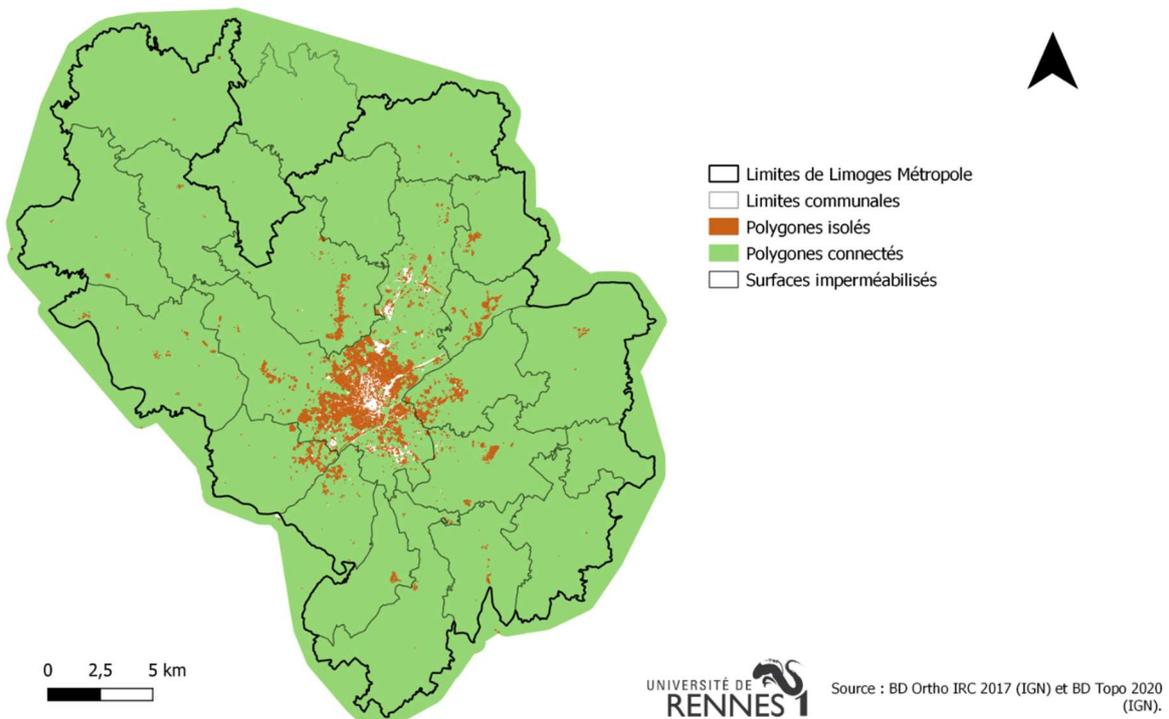


Illustration 17. Simplification des espaces connectés et isolés pour Limoges Métropole. (La surface totale des polygones isolés est de 658 ha, soit une augmentation de 117 ha par rapport aux espaces végétalisés de – de 1ha. Cela correspond à 1% de la surface de Limoges Métropole et sa zone tampon de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

Bien que ces polygones verts inter-connectés correspondent en surface totale à une majorité de l'espace de la zone d'étude (principalement les sols naturels et agricoles), ces polygones connectés et isolés représentent un mélange de réservoirs et de corridors, entre lesquels il est encore difficile de pouvoir distinguer un corridor d'un réservoir dans le sens de continuités écologiques au sein des sols.

La difficulté à établir une distinction précise entre les réservoirs et corridors pour la faune du sol, de manière aussi bien théorique que cartographique, empêche de proposer plus qu'une classification de l'isolement des espaces végétalisés inclus dans la trame brune potentielle. **Cette classification autour de l'isolement peut néanmoins servir de support pour de nouveaux questionnements dans la deuxième phase du projet.**

Ensuite, plus précisément, il s'agirait d'essayer d'établir ces continuités potentielles entre des espaces végétalisés, notamment en fonction de la fragmentation de la distribution des sols. Au sein d'une telle zone plus ou moins fragmentée, **plusieurs parcours pourront être possibles pour se déplacer d'un réservoir A à un autre réservoir B :**

- (1) celui du chemin le plus court
- (2) celui du chemin le plus optimal, correspondant à la traversée de milieux de qualité favorables
- (3) celui du chemin maximal sans discontinuités infranchissables.

Ces différents parcours peuvent être disponibles ou non pour les organismes du sol selon l'organisation spatiale des réservoirs et la présence de corridors disponibles. Au sein d'un espace urbain extrêmement fragmenté, les possibilités seront beaucoup plus réduites, ne permettant pas forcément l'existence d'un chemin le plus court (1), ou d'un chemin optimal (2).

Dans le cas de la périphérie de Limoges par exemple, cette discontinuité est plus nuancée, grâce notamment à la présence d'espaces naturels, semi-naturels ou agricoles, ou encore à des habitats résidentiels plus récents et donc potentiellement avec des barrières plus franchissables.

2.b.6. Synthèse de la méthode

Le tableau ci-dessous résume les principales étapes mises en œuvre pour identifier, localiser et cartographier les espaces végétalisés inter-connectés ou +/- isolés, qui constituent la trame brune potentielle à l'échelle d'un EPCI.

PHASE 1 - Etude préalable à partir des données SIG disponibles	
Méthodologie d'identification, de localisation et cartographie de la Trame Brune à l'échelle de Limoges Métropole par EcobioSoil - Univ.Rennes1	
Etape 1 - Délimitation de la zone d'étude & récupération des couches d'informations géoréférencées disponibles	
1.1	Définition de la zone d'étude
1.2	Récupération des données géoréférencées
1.3	Caractérisation de la zone d'étude
Etape 2 - Délimitation et Proportion d'espaces bâtis ou infrastructures (=Trame Grise) vis-à-vis des espaces non bâtis (=Trame Verte)	
2.1	Extraction d'une couche Bâti à l'échelle de Limoges Métropole
2.2	Extraction d'une couche Non-Bâti à l'échelle de Limoges Métropole
Etape 3 - Qualification du bâti (=Trame Grise) et du non-bâti (=Trame Verte) selon les occupations de sol	
3.1	Cartographie du bâti et du non-bâti à l'aide des données d'occupation de sol
3.2	Caractérisation de l'âge du bâti et des formes urbaines pour définir les obstacles
3.3	Calcul d'indices relatifs aux non-bâti (proportion d'espaces non-bâtis et d'espaces verts par ha, %/km ²)
Etape 4 - Caractérisation des éléments de la trame brune	
4.1	Identification des caractéristiques des réservoirs (taille et occupation du sol)
Etape 5 - Caractériser le degré d'isolement potentiel et la connectivité potentielle des sols de Limoges Métropole	
5.1	Identification d'entités spatiales avec des degrés d'isolement similaires
5.2	Réalisation d'une carte présentant des secteurs homogènes en terme d'isolement spatial potentiel
Etape 6 - Cartographie de la Trame Brune potentielle	
6.1	Schématisation des espaces isolés et espaces connectés

Tableau 4. Étapes réalisées pour l'identification, la localisation, et la cartographie de la trame brune potentielle

Le travail effectué nous permet de **prendre du recul par rapport à l'échelle de la zone d'étude** : l'échelle de l'EPCI permet d'effectuer un diagnostic territorial, et ensuite l'identification des zones à enjeux. Néanmoins, l'échelle de l'EPCI ne convient pas à une cartographie précise de la trame brune, qui devra être beaucoup plus fine (échelle de la commune, du quartier) : cela permettra de préciser la localisation et la qualification des obstacles (classification de franchissabilité à créer) afin de mettre en évidence sa fonctionnalité, c'est-à-dire sa capacité à permettre les déplacements de ces populations de la faune du sol.

Ensuite, il sera nécessaire d'**Identifier des actions ponctuelles ou planifiées pertinentes à une échelle parcellaire ou de quartier** : à partir du travail cartographique préalable, il est nécessaire d'identifier sur le terrain directement, le degré d'isolement d'espaces urbains ou en cours d'urbanisation. Il s'agit majoritairement de quartiers résidentiels, denses et/ou anciens, ou dans des espaces où les remaniements des sols ont été importants :

- Dans les **espaces urbanisés**, il s'agira de mettre en œuvre des actions techniques visant à favoriser la connectivité au sein de chacun de ces quartiers.
- Dans les **espaces en cours d'urbanisation** (en zones périurbaines majoritairement), il s'agira d'identifier et de localiser les trames brunes fonctionnelles actuelles afin de diagnostiquer, selon la démarche ERC, la nécessité ou non d'en conserver certaines et de

proposer de compenser par ailleurs pour assurer la pérennité des trames brunes dans ces sols qui auront été +/- artificialisés.

2.c. Proposer une démarche méthodologique de terrain pour caractériser la réalité de la trame brune à des échelles pertinentes, de la commune au quartier

À partir du travail cartographique réalisé au cours des étapes 1 à 6 (chapitres 2a & 2b), nous proposons de caractériser plus précisément la réalité de la trame brune en se focalisant dans les milieux urbains actuels ou en cours de le devenir.

Des milieux naturels (& semi-naturels) pourront/devront être inclus dans le futur échantillonnage comme milieux non-isolés constituant la ou les référence(s) territoriale(s). De plus, cette part importante donnée aux échantillonnages en milieu urbain vise à pallier au manque de données disponibles aux échelles nationale et européenne sur la faune du sol dans ces espaces artificialisés.

Il conviendra aussi de considérer les connaissances préalables acquises dans différentes occupations du sol (jardin individuel, parc public, espace vert de grand ensemble, terrains de sports, ...) afin de s'interroger sur la ou les occupations de sol les plus favorables à cette faune du sol.

Au préalable, Limoges Métropole pourra lister les quartiers et/ou communes qui leur paraîtraient les plus pertinentes (en fonction de la date d'urbanisation, des formes urbaines, des pressions actuelles de demande d'urbanisation, ...).

Avant de pouvoir positionner spatialement les points d'échantillonnage de la faune du sol, nous devons caractériser le degré d'anthropisation **potentiel** des sols de Limoges Métropole (étape 7) puis **réel** (étape 9), en réalisant une campagne de sondages pédologiques dans les zones artificialisées au sein de la zone d'étude ; une importante densité de points permettrait une meilleure analyse et cartographie de l'anthropisation des sols (méthodologie proposée par Christophe Ducommun).

Le degré de discontinuité de la Trame brune sera établi en lien avec la localisation, la caractérisation et le degré de franchissabilité des obstacles par la faune géobionte (étape 8).

Concernant la campagne d'échantillonnage de la faune du sol (étape 10), il faudra définir ou redéfinir le plan d'échantillonnage au regard de la campagne de sondages pédologiques et de qualification du degré de discontinuité de la Trame brune (= prise en compte de l'anthropisation et de l'isolement des sols).

La réalisation des prélèvements de faune se fera durant les périodes optimales pour chaque groupe d'organismes ciblés, nécessitant une succession d'équipes de préleveurs au cours de l'année. Des prélèvements de terre seront réalisés en parallèle pour la caractérisation physico-chimique du milieu (pH, MO, texture, ...).

Enfin, la synthèse consistera à réaliser un recoupement des données pédologiques et biologiques qui permettra de caractériser pédobiologiquement des éléments constitutifs de la Trame brune en termes de différenciation ou non entre des zones réservoirs et des zones corridors...

PHASE 2 - Etude de la trame brune au terrain	
Démarche méthodologique de terrain pour caractériser la réalité de la Trame Brune à des échelles pertinentes, de la commune au quartier par Univ. Rennes & Sol Paysage	
Etape 7 - Caractériser le degré d'anthropisation potentiel des sols de Limoges Métropole	
7.1	Rechercher et compiler les connaissances acquises sur le gradient d'anthropisation de ces sols (Sols naturels, Anthrosols)
7.2	Réalisation d'une carte présentant des secteurs homogènes en terme d'anthropisation potentielle des sols
Etape 8 - Caractériser les discontinuités de la TBr liées aux obstacles plus ou moins franchissables par les vers de terre	
8.1	Identification des différents types d'obstacles naturels et anthropiques présents sur la zone d'étude
8.2	Proposition d'un gradient de perméabilité/franchissabilité des obstacles identifiés (=élaboration d'hypothèses)
Etape 9 - Réalisation d'une campagne de sondages pédologiques couvrant l'ensemble de la zone d'étude	
9.1	Définition d'un plan d'implantation de sondages pédologiques dans l'espace public et dans l'espace privé pour couvrir la zone d'étude de
9.2	Demandes d'autorisations d'accès aux parcelles et de réalisation des sondages pédologiques
9.3	Réalisation de la campagne de terrain pédologique
9.4	Réalisation de cartes des sols de synthèse
Etape 10 - Réalisation d'une campagne d'échantillonnage des organismes du sol ciblés	
10.1	Redéfinition du plan d'échantillonnage (étape 8) au regard de la campagne de sondages pédologiques (= prise en compte de
10.2	Réalisation des prélèvements durant les périodes optimales pour les organismes ciblés
10.3	Prélèvements de terre en parallèle pour la caractérisation physico-chimique du milieu (pH, MO, texture)
10.4	Détermination spécifique en laboratoire et analyses de sol
10.5	Cartographie ponctuelle et surfacique des abondances, biomasses, richesses des organismes prélevés sur la zone d'étude
Etape 11 - Recoupement des données pédologiques et biologiques	
11.1	Tests de corrélation entre données physico-chimiques du sol et les données sur les organismes ciblés
11.2	Analyses statistiques pour tester l'effet des 2 gradients (anthropisation, isolement), des formes urbaines et de l'âge de l'anthropisation
Etape 12 - Cartographie de la Trame Brune à l'échelle de la commune	
12.1	Localisation des zones réservoirs et des zones corridors et comparaison avec les hypothèses proposées à l'étape 4
12.2	Schématisation des types de barrières plus ou moins franchissables et comparaison avec les hypothèses proposées à l'étape 8

Tableau 5. Prochaines étapes identifiées pour la phase 2 d'étude au terrain.

Chapitre 3 : Formaliser et valider la méthodologie au sein du groupe d'Experts

3.a. Budgétisation

La démarche méthodologique étant validée par le groupe d'experts, un estimatif budgétaire associé a été réalisé. Chaque groupe de spécialistes a alors élaboré un budget estimatif en fonction de sa thématique et un estimatif financier total est présenté à la fin de ce chapitre.

En amont de toute évaluation financière, il faut prendre en compte le fait qu'une **placette** correspond à une (ou plusieurs) parcelle cadastrale (ou partie de parcelle) qui possède la même occupation de sol et le même historique (processus d'artificialisation, pratiques de gestion des sols...).

Une telle placette peut être subdivisée en plusieurs modalités selon les problématiques étudiées (choisies) ou selon une variation au sein d'un des paramètres de l'historique.

Un site regroupe plusieurs placettes au sein d'une forêt ou d'une ferme ou d'une commune ou d'un quartier...

L'idéal statistique serait 50 placettes par an (avec des économies d'échelle possible) :

- 4 sites avec 10 placettes par sites
- 10 placettes de référence régionale

Les 50 points d'observations seront réalisés en une seule campagne entre le 15 février et fin mars pour les lombriciens et entre le 15 mars et fin avril pour les autres paramètres biologiques.

3.a.1. Inventaires Lombriciens

3.a.1.1. Organisation et durée de l'échantillonnage

Pour l'échantillonnage au terrain des vers de terre (espèces géobiontes), il est prévu une équipe de 4 personnes (1 coordinateur-préleveur et 3 personnes au tri, soit 2 blocs triés par personne et par parcelle-modalité).

Selon l'occupation du sol et sa texture, il y aura des écarts importants pour le temps passé à trier les 6 blocs de sol (20x20x25cm) prélevés par placettes :

Durée de tri manuel d'un bloc de sol (en minute)	Sableuse	Limoneuse	Argileuse	Compaction anthropique (% / Argil.)
Potager	25-30	40-50	55-90	100%
Pelouse urbaine	40-50	50-60	60-100	110%
...				
Prairie pâturée	45-55	85-90	90-120	120%

Le nombre de placettes échantillonnées par jour sera différent selon les paramètres présentés ci-dessus et cela peut varier aussi selon le nombre et la taille des vers de terre présents dans le bloc de sol et la période dans l'année...

Cet échantillonnage doit être effectué à la période optimale d'activités de ces organismes géobiontes : **entre janvier et mars** (selon la date de retour du drainage automnal des sols, la hauteur des précipitations entre septembre et décembre, la rigueur de l'hiver, ...).

Pour réaliser cet inventaire de la faune lombricienne sur un total de 50 placettes, il faut compter 4 à 5 placettes échantillonnées à 4 personnes par jour.

3.a.1.2. Estimatif – Lombriciens

Trame Brune Limoges Métropole							
PROPOSITION DEVIS							
Analyses taxonomiques avec biomasse fonctionnelle					50 Placettes sur 14-16 jours		
Réalisation des prélèvements (équipe de 4 personnes)					18 378,00 €		
Détail	unité	coût	quantité		coût / jour		
Frais de personnel (4 personnes)	jour	850 €	15	12 750,00 €	Ingénieur	400	
Frais de déplacement	km	0,40 €	2200	880,00 €	Technicien	250	
Frais de séjour (repas)	forfait	16,00 €	128	2 048,00 €	Adjoint Tech	150	
Frais de séjour (nuitée)	forfait	45,00 €	60	2 700,00 €	AJT ou Stagiaire	50	
Acquisition des données et analyses des échantillons					11 600,00 €		
Détail	unité	coût	quantité				
Récupération des donnés physico-chimiques disponibles et intégration dans la BDD	placette	10,00 €	50	500,00 €			
Analyses taxonomiques des échantillons au laboratoire avec biomasse	placette	150,00 €	50	7 500,00 €			
Réalisation et mise en forme des rapports par placette et de synthèse pour restitution des résultats	jour	450,00 €	8	3 600,00 €			
Dépenses supplémentaires					11 400,00 €		
Détail	unité	coût	quantité				
Réunions de travail (en présentiel) (2 à 2 personnes)	forfait	450,00 €	8	3 600,00 €			
Stagiaire 6 mois	mois	600,00 €	12	7 200,00 €			
Réunions en distanciel (4-6)	forfait	100,00 €	6	600,00 €			
				Total HT	41 378,00 €		
				Frais de gestion 2%	827,56 €		
				TVA 20%	8 275,60 €		
				Total TTC	50 481,16 €		
<i>Remarque : les frais de personnels peuvent être réajustés si mise à disposition d'un agent par Limoges Métropole</i>							

3.a.2. Inventaires Mésofaune et Macrofaune de surface

3.a.2.1. Organisation et durée de l'échantillonnage

Pour réaliser cet inventaire de la faune de surface sur un total de 50 placettes, il faut compter 5 placettes échantillonnées à 2 personnes par jour pour la Métropole de Limoges soit 25 placettes par semaine.

La pose des pièges devra être réalisée après l'échantillonnage et devront rester 7 jours en place.

3.a.2.2. Estimatif – Méso et macrofaune de surface

Actions réalisées par Sol & Co (Nancy	Prix « unitaire » (€ HT)	Pour 50 placettes (environ 2 semaines)
Intervention sur placettes (5 placettes /1 jour)	800€	8 000€
Identification labo macrofaune surface (5 placettes)	300€	3 000€
Identification labo mésofaune (5 placettes)	750€	7 500€
Interprétation des données	800€	800€
Écriture de livrable	750€	750€

Déplacement A-R / 1 personne	450€ pour 1 personne soit 900 pour 2 personnes	900€
Hébergement 1 nuit + 1 repas / 1 personne	80 + 16 soit 15 nuits pour 2 personnes : 2 400€ + 900€ de repas pour 2 personnes	3 300€
Total Méso et macrofaune de surface		24 250€

3.a.3. Analyses physico-chimiques du sol

3.a.3.1. Organisation et durée de l'échantillonnage

Dans un premier temps, pour caractériser le degré d'anthropisation potentiel des sols de Limoges Métropole, une équipe de 2 personnes minimum réalisera la campagne de sondages pédologiques dans les zones artificialisées au sein des zones d'étude.

Dans un second temps, l'équipe de l'Université de Limoges se chargera des prélèvements de terre en parallèle des prélèvements de faune pour la caractérisation physico-chimique du milieu (pH, MO, texture...

3.a.3.2. Estimatif – Analyses physico-chimiques

	Prix « unitaire » (€ HT)	Pour 50 placettes
Préparation sols avant analyse	15 euros par échantillon de sol	750€
Analyses physico-chimiques	<u>Par échantillon de sol :</u> Granulo + éléments de fertilité + composition chimique minérale = 150 euros HT Sous réserve : Analyses liées à la pollution organique: HAP 130 euros + Hydrocarbures totaux 130 euros HT	7 500€
Déplacement	200€	400€
Repas (6 jours / repas midi / 2 personnes)	16 euros/repas	384€
Campagne et description pédologique de terrain (lecture paysage, homogénéité, préparation amont)	800 euros par jour /sur 10 jours (50 placettes soit 100 profils représentatifs)	8 000€

Interprétation des données de propriétés physico-chimique	800€	800€
Interprétation de la campagne pédologique de terrain et cartographie associée	1 600€	3 200€
Ecriture de livrable	800€	800€
Réunions de travail (forfait)	800€	800€
Frais de gestion/coût structure 16 %		3 494€
Total Université de Limoges (HT)		25 328 Euros HT

3.a.4. Estimatif budgétaire général annuel

Thématique		Détails des actions	Prix (HT)
Mise en œuvre de la phase 2	Limoges Métropole : 0,25 ETP Technicien (10 000 € HT/an)	<ul style="list-style-type: none"> • Coordination générale • Présentation aux conseils municipaux et partenaires institutionnels • Suivi administratif et budgétaire • Porter à connaissance auprès d'EPCI et autres Collectivités 	10 000€
Lombriciens	Université de Rennes 1	<ul style="list-style-type: none"> • Réalisation des prélèvements • Acquisition des données et analyses des échantillons • Réunions, Rédaction et stagiaire • Frais de déplacement et de séjour 	41 378€
Méso et macrofaune de surface	Sols & Co (Nancy)	<ul style="list-style-type: none"> • Réalisation des prélèvements • Acquisition des données et analyses des échantillons • Réunions, Rédaction et stagiaire • Frais de déplacement et de séjour 	24 250€
Analyses physico-chimiques du sol	Université de Limoges	<ul style="list-style-type: none"> • Campagne et description pédologique de terrain • Interprétation des données de propriétés physico-chimique • Interprétation de la campagne pédologique de terrain et cartographie associée • Réunions, Rédaction 	25 328€
TOTAL			100 956 €

3.b. Réflexion distanciée sur la faisabilité du projet selon l'axe scientifique

Des biais potentiels peuvent apparaître dans l'approche scientifique de la trame brune en lien avec les difficultés de pouvoir analyser finement les communautés d'organismes du sol dans tous les espaces verts d'un EPCI tout au long de l'année, dans un monde urbain sans cesse en changement. En effet, l'analyse des organismes du sol à l'échelle spécifique demandant une expertise poussée représentée par un nombre très réduit de chercheurs à l'échelle nationale, il est difficile de développer/trouver les moyens humains et financiers pour établir une cartographie précise de la biodiversité des sols urbains. De même, les bureaux d'étude étant rares sur ce sujet (seulement 2 aujourd'hui à l'échelle de toute la France ont la capacité à déterminer les invertébrés du sol), cela limite les possibilités d'établir une cartographie fine de la trame brune. Dans une démarche de sciences participatives, il serait tout de même possible de développer des partenariats avec des associations ou experts intégrés dans les collectivités moyennant des formations plus poussées afin de collecter des données à l'échelle spécifique et ce à différentes saisons. Des méthodes comme le barcoding (technique de catalogage et d'identification moléculaire permettant la caractérisation génétique d'un individu ou d'un échantillon d'individu à partir d'une courte séquence d'ADN choisie en fonction du groupe étudié) en plein développement pourraient également aider à agréger les connaissances.

A cela s'ajoute un manque de connaissances en écologie fondamentale sur l'assemblage des espèces animales du sol au sein du paysage urbain en fonction des degrés d'anthropisation et d'isolement des sols ; il serait donc important de développer des travaux de recherche (masters & thèses) sur ces sujets pour répondre à ces problématiques d'actualité tout en avançant en co-construction avec les collectivités pour la prise en compte de la trame brune (selon séquence ERC) dans les programmes de gestion des espaces urbains en mutation aussi bien qu'en voie d'urbanisation.

Chapitre 4 : Veiller à sa reproductibilité à l'échelle moyenne des EPCI du territoire national

4.a. Reproductibilité de la méthode

La méthode élaborée est reproductible dans tous les EPCI car la plupart des données SIG utilisées sont disponibles en source libre à l'échelle du territoire national (Tableau 6). Ces données disponibles à l'échelle nationale permettent de réaliser les premières étapes décrites dans notre méthode (1 à 3).

Données	Fournisseur	Utilisation des données					
		Zones artificialisées	Végétation zones artificialisées	Surfaces agricoles	Forêts et milieux naturels	Cours et surfaces d'eau	Routes
Parcellaire Express (PCI)	IGN	X					X
BD TOPO (2018)	IGN	X				X	
BD Ortho IRC 2017	IGN	X					
BD Ortho 1959	IGN	X	X	X	X		
BD Forêt (2018)	IGN				X		
Corine Land Cover (1990 à 2018)	Ministère de la Transition Écologique	X	X	X	X	X	X
Référentiel d'Occupation du sol 2020	PIGMA	X	X	X	X	X	X
Années de construction des parcelles	Service d'urbanisme de Limoges Métropole	X					
TVB	Limoges Métropole				X	X	

Tableau 6. Utilisation des données et fournisseurs

Toutefois, Limoges Métropole, qui se situe en Nouvelle Aquitaine, possède une couche d'occupation du sol régionale plus précise (PIGMA 2020) : cette couche d'occupation du sol PIGMA possède une échelle de restitution plus fine et une nomenclature plus précise (1:25 000 et 64 postes) que la couche d'occupation du sol Corine Land Cover (1:100 000 et 44 postes). Ceci nous a permis d'effectuer une identification, localisation et qualification plus précise des espaces végétalisés dans les territoires artificialisés.

La précision de la couche d'occupation du sol dépendra des données disponibles sur la zone d'étude, et influencera la précision des traitements et rendus cartographiques. De plus, certains paramètres utilisés lors des traitements peuvent être amenés à changer, selon les caractéristiques temporelles de la photographie aérienne, la résolution disponible ou encore la réalité sur le terrain.

4.b. Perspectives d'utilisation de la Trame brune au sein d'un EPCI

Limoges Métropole s'est successivement doté d'une Trame Verte & Bleue en 2012 et d'une Trame Noire en 2018. Ces deux outils sont aujourd'hui très communément utilisés dans une grande variété de situation par les élus et les services techniques communautaires ou municipaux.

A titre d'exemple, on peut citer les cas de figure suivants :

- Elaboration du Schéma de Cohérence Territoriale (SCOT) de l'agglomération de Limoges ;
- Définition de schémas directeurs thématiques (implantation de futures zones d'activités commerciales et artisanales, assainissement, etc...) ;

- Elaboration des Plans Locaux d'Urbanisme (PLU) des Communes, puis du Plan Local d'Urbanisme Intercommunal ;
- Avis et recommandations techniques des services techniques communautaires dans le cadre de demandes de permis d'aménager et de demande de permis de construire ;
- Identification de sites de compensation écologique ;

Ce sont donc des outils d'aides à la décision pouvant être plus particulièrement adaptés à l'exercice des compétences « Aménagement du territoire », « Urbanisme » et « Préservation de la Biodiversité » des EPCI.

A l'appui de ses deux expériences antérieures en matière de définition des réseaux écologiques, Limoges Métropole a souhaité entreprendre la présente étude afin de compléter la palette des outils à sa disposition.

Au terme de ce travail de recherche appliquée, il s'avère en réalité que la méthodologie proposée pour la définition d'une Trame Brune va doter l'EPCI d'un nouvel outil sensiblement différent des deux premiers.

En effet, le protocole méthodologique de la Trame Brune va devoir s'appliquer à une échelle de territoire beaucoup plus fine que celui de la TVB et de la TN. Celle-ci sera de l'ordre de 1/500 à 1/2 500 au lieu de 1/25 000.

De plus, les moyens requis en termes d'ingénierie et de ressources financières ne permettent pas d'envisager l'élaboration d'une Trame Brune sur l'intégralité d'un territoire composé de 20 communes.

En définitive, la Trame Brune ne sera donc pas une couche d'information cartographique supplémentaire, venant s'ajouter au réseau écologique déjà constitué par la TVB et la TN. Elle constituera plutôt une couche d'information complémentaire, plus précise, à l'échelle de futurs projets d'urbanisme et/ou de développement économique. Dès lors que l'implantation des projets aura été déterminée en utilisant les TVB et TN pour préserver les continuités terrestres et aquatiques, la Trame Brune prendra le relais pour déterminer les continuités nécessaires à la fonctionnalité des écosystèmes pédologiques à l'échelle du parcellaire cadastral.

On comprend également que cette Trame Brune, ne pouvant être élaborée qu'à raison de 10 à 60 hectares par an, sera un outil en permanente évolution, contrairement aux autres Trames (TVB et TN) qui sont fixées pour une durée donnée (10 ans pour Limoges Métropole) et révisées à échéance afin de prendre en compte les évolutions du territoire.

L'utilisation du concept de Trame Brune paraît donc pertinente sur ce que l'on pourrait qualifier de « front d'urbanisation », c'est-à-dire sur les espaces péri-urbains et ruraux destinés à être urbanisés à court et moyen terme (entre 2 et 5 ans).

Chapitre 5 : Positionner Limoges Métropole comme EPCI de référence « Trame brune » au niveau national

5.a. Retour d'expérience proposées aux EPCI par Limoges Métropole

Limoges Métropole proposera aux EPCI intéressées de réaliser des échanges techniques avec ses agents et élus afin de présenter la méthode d'élaboration de la Trame brune mais aussi un retour d'expérience sur le montage administratif et financier d'un tel projet.

Ces sessions d'échanges pourront être réalisés à la demande en visio à la Direction des Espaces Naturels.

Les premiers échanges ont déjà eu lieu durant l'année 2022, à savoir :

- Échange avec étudiants d'Agro Paris Tech (via ARB Ile de France)
- Échange avec la Collectivité Européenne d'Alsace
- Echange avec Bordeaux Métropole (via Université de Rennes 1)

5.b. Proposition d'articles dans les revues techniques

Durant l'Automne et l'hiver 2022, des contacts seront pris avec différentes revues techniques afin de proposer des articles présentant le travail réalisé sur Limoges Métropole, notamment auprès de magazines spécialisés pour les techniciens territoriaux ou des élus comme Techni.Cités, Le Moniteur, ou la Gazettes des communes.

Enfin, en accord avec l'Office Français de la Biodiversité, un article dans la revue « Des clés pour agir » sera proposé.

5.c. Présentation du travail effectué par les universités dans des colloques de différentes portées.

A ce stade de la démarche, seule la méthode d'analyse cartographique pourra être présentée lors de colloques, sur démarche de l'université de Rennes, tels que la Journée Mondiale des Sols fin 2022 à Dunkerque ou les conférences « Soil Mapping for a Sustainable Future » à Orléans du 7 au 9 février 2023.

L'intégralité de la méthode pourra quant à elle être présentée une fois que la phase 2 du projet aura été réalisée et que des résultats sur l'élaboration de la Trame brune seront disponibles.

Bibliographie :

Amossé J. (2014). *La faune du sol comme indicateur de la qualité des sols urbains : Étude des communautés de vers de terre, d'enchytréides et de nématodes et de leurs relations avec des sols d'âges différents* [Université de Neuchâtel]. <https://doc.rero.ch/record/261249>

Amsallem, J., Deshayes, M. & Bonneville, M. (2010). *Analyse comparative de méthodes d'élaboration de trames vertes et bleues nationales et régionales*. Sciences Eaux & Territoires, 3, 40-45. <https://doi.org/10.3917/set.003.0040> : 10.3917/set.025.0032. <https://www.cairn.info/revue-sciences-eaux-et-territoires-2018-1-page-32.htm>

Avon, C., & Bergès, L. (2014). *Outils pour l'analyse de la connectivité des habitats*. In Irstea, Projet J Diacofor-Convention cadre Irstea-MEDDE DEB (2012-2014).

Baize, D., & Girard, M. C. (2009). *Référentiel pédologique 2008*. Editions Quae.

Béchet, B., Bissonais, Y. L., Ruas, A., Aguilera, A., André, M., Andrieu, H., Ay, J.-S., Baumont, C., Barbe, E., Beaudet, L. V., Belton-Chevallier, L., Berthier, E., Billet, P., Bonin, O., Cavailles, J., Chancibault, K., Cohen, M., Coisnon, T., Colas, R., ... Desrousseaux, M. (2017). *Sols artificialisés et processus d'artificialisation des sols : Déterminants, impacts et leviers d'action*. Rapport (p. 609 p.) [Report, INRA]. <https://doi.org/10.15454/731a-nn30>

Bourgeois, M. (2015). *Impacts écologiques des formes d'urbanisation : modélisations urbaines et paysagères*. Thèse de doctorat, Besançon, 2015. <https://www.theses.fr/2015BESA1029>.

Bourguignon, C., & Bourguignon, L. (2015). *Le sol, la terre et les champs : Pour retrouver une agriculture saine (Nouvelle éd)*. Sang de la Terre.

Burel, F., Baudry, J., & Le Flem, Y. (1999). *Écologie du paysage : Concepts, méthodes et applications*. Éd. Tec & doc.

Clergeau, P. (2007). Une écologie du paysage urbain. Apogée. Cluzeau, Daniel, Guénola Pérès, Muriel Guernion, Rémi Chaussod, Jérôme Cortet, Mireille Fargette, Fabrice Martin-Laurent, et al. 2009. *Intégration de la biodiversité des sols dans les réseaux de surveillance de la qualité des sols: exemple du programme pilote à l'échelle régionale, le RMQS BioDiv*. Étude et Gestion des Sols, 17.

Falco, L. B., Sandler, R., Momo, F., Ciocco, C. D., Saravia, L., & Coviella, C. (2015). *Earthworm assemblages in different intensity of agricultural uses and their relation to edaphic variables*. PeerJ, 3, e979. <https://doi.org/10.7717/peerj.979>

Flégeau, M., Soubelet, H., Carré, S. et al. *What evidence exists on the possible effects of urban forms on terrestrial biodiversity in western cities? A systematic map protocol*. Environ Evid 10, 28 (2021). <https://doi.org/10.1186/s13750-021-00243-x>

Henein, K., & Merriam, G. (1990). *The elements of connectivity where corridor quality is variable*. *Landscape Ecology*, 4(2), 157-170. <https://doi.org/10.1007/BF00132858> IFEN, 2003. L'artificialisation s'étend sur tout le territoire. *Les données de l'environnement*, n°80, 4p.

Lamandé, M, G Pérès, V Hallaire, et P Curmi. 2004. *Action combinée des pratiques culturelles et des lombriciens sur le sol*. *Étude et Gestion des Sols*, 10.

Locquet A., Clauzel C. (2018). *Identification et caractérisation de la trame verte et bleue du PNR des Ardennes : comparaison des approches par habitat et perméabilité des milieux*, Cybergeo: European Journal of Geography [online]. *Space, Society, Territory*, document 877.

Maréchal, J. s. d. (2022). *Contributions de la biodiversité des ANTHROPOSOLS aux services écosystémiques de régulation des eaux pluviales et d'approvisionnement en espaces paysagers*. Thèse. Université de Rennes 1.

Mathieu, J. (2015). *Biodiversité et syndrome de dispersion dans les communautés de macrofaune du sol* [Habilitation à diriger des recherches, Université Pierre et Marie Curie]. <https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-01342216>

Ponge, J-F. (2000). *Biodiversité et biomasse de la faune du sol sous climat tempéré*. *Comptes Rendus de l'Académie d'Agriculture de France*, Académie d'agriculture de France. 86 (8), pp.129-135.

Robert Jean. R. Lazzarotti. Limoges. *Notes et Études documentaires. [compte-rendu] In: Norois, n°68, Octobre-Décembre 1970. pp. 584-587.:* www.persee.fr/doc/noroi_0029_182x_1970_num_68_1_1721_t1_0584_0000_2

Sordello, R. (s. d.). *Trame verte, trame bleue et autres trames*. *sfecologie.org*. Consulté 27 janvier 2022. <https://www.sfecologie.org/regard/r72-mai-2017-r-sordello-corridors-ecologiques/>

Turner, M. G. (1989). *Landscape Ecology : The Effect of Pattern on Process*. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 20(1), 171-197. <https://doi.org/10.1146/annurev.es.20.110189.001131>

Vanpeene-Bruhier, S., & Amsallem, J. (2014). *Schémas régionaux de cohérence écologique: les questionnements, les méthodes d'identification utilisées, les lacunes*. *Sciences Eaux & Territoires pour tous*, (2), 2-5.

Vincent, Q. et al. (2022) *Étude de la biodiversité des sols (macrofaune épigée) urbains et péri-urbains dans le cadre de la création d'une trame brune*. *Étude et Gestion des Sols*. 29, 275-294.