



**HAL**  
open science

# Écologie urbaine du hérisson : contribution méthodologique pour la modélisation du réseau écologique du hérisson à Caen dans un contexte de fragmentation des habitats

Étienne Valognes

► **To cite this version:**

Étienne Valognes. Écologie urbaine du hérisson : contribution méthodologique pour la modélisation du réseau écologique du hérisson à Caen dans un contexte de fragmentation des habitats. Géographie. 2024. dumas-04801357

**HAL Id: dumas-04801357**

**<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-04801357v1>**

Submitted on 25 Nov 2024

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

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



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial 4.0 International License



UNIVERSITÉ  
CAEN  
NORMANDIE

ideas

Année 2023-2024

---

# ÉCOLOGIE URBAINE DU HÉRISSON : CONTRIBUTION MÉTHODOLOGIQUE POUR LA MODÉLISATION DU RÉSEAU ÉCOLOGIQUE DU HÉRISSON À CAEN DANS UN CONTEXTE DE FRAGMENTATION DES HABITATS



*sous la direction de Thierry Feuillet  
co-dirigé par Céline Clauzel, Benoit Pisanu, Pierre Sachot*

Réalisé par Étienne Valognes

---

Master 1 – Géographie, Aménagement, Environnement et  
Développement - Parcours Environnement / UFR SEGGAT



# REMERCIEMENTS

Je tiens à adresser mes remerciements aux personnes qui m'ont aidé dans la réalisation de ce mémoire. Tout d'abord, je remercie chaleureusement mon directeur de mémoire, Thierry Feuillet, pour son encadrement, sa confiance, et ses conseils précieux concernant mes analyses spatiales et ma modélisation statistique sur R. Je lui suis également reconnaissant de m'avoir mis en relation avec des professionnels, dont l'expertise a été essentielle pour approfondir ce travail.

Je tiens également à remercier Céline Clauzel, professeure des universités et spécialiste de la modélisation des réseaux écologiques, pour son aide inestimable avec le logiciel Graphab. Un grand merci aussi à Pierre Sachot, doctorant au Musée National d'Histoire Naturelle, ainsi qu'à Benoît Pisanu pour leurs précieuses informations sur l'écologie des hérissons en milieu urbain. Enfin, je remercie Olivier Cantat pour son soutien constant et son engagement envers la formation.

Un grand merci à mes amis, sans qui je n'aurais jamais pris cet itinéraire de vie pour arriver finalement en Master de géographie. Merci à Léonard Coutance que je connais depuis toujours. Il est le responsable de ma venue dans ce Master puisqu'il m'a incité à le rejoindre en m'affirmant que ce parcours est fait pour moi. J'ai donc suivi mon frère, mon capitaine, mon roi, dans cette aventure. Je vais finir par croire qu'il est omniscient puisqu'il, une fois de plus, ne s'est pas trompé. Toujours présent pour moi comme je le suis pour lui, il a pu me donner de précieux conseils pour la rédaction de ce mémoire ainsi qu'un œil avisé pour déceler des fautes ou des erreurs de compréhension dans sa lecture.

Merci à la personne que j'aime, mon Aphrodite, ma chère et tendre Célestine, qui a su trouver les mots et m'ouvrir ses bras pour me rassurer dans les moments de stress intense provoqués par les contraintes de temps pour finaliser ce mémoire. Elle a su m'aider à me reposer quand il le fallait et m'a permis de me déconnecter afin de reprendre des forces. Elle a su trouver les mots justes pour me motiver dans les moments où la procrastination était un vice sévère.

Merci à mon ami semblable à la fois à Apollon pour sa poésie, à Dionysos pour son caractère, et à Joyboy pour la joie qu'il procure. Merci à Louis Mahier, de m'avoir aidé à décompresser de multiples façons que ce soit durant notre lecture hebdomadaire ou bien avec nos aventures vidéoludiques.

Un grand merci à mes parents pour m'avoir transmis dès mon enfance des valeurs essentielles telles que l'écologie et le respect de l'environnement. La découverte de la faune sauvage autour de chez nous ainsi que l'enseignement précoce du naturalisme ont éveillé en moi une curiosité qui a alimenté ma passion et m'a permis de suivre le chemin qui m'a mené jusqu'ici.

Merci à Christian-François Paullini pour avoir découvert la guarana dans les années 1820, dont ses bienfaits et sa forte concentration en caféine a pu me maintenir éveillé de jour et principalement de nuit. La guarana n'aurait pas été si performante sans l'avoir mélangée avec les boissons énergisantes LevlUp à faire soi-même.

# SOMMAIRE

<b>REMERCIEMENTS.....</b>	<b>0</b>
<b>SOMMAIRE.....</b>	<b>1</b>
<b>INDEX DES TABLEAUX ET DES FIGURES.....</b>	<b>4</b>
<b>AVANT PROPOS.....</b>	<b>6</b>
<b>INTRODUCTION GENERALE.....</b>	<b>9</b>
A) Enjeux de l'écologie urbaine.....	9
1) Les défis environnementaux posés par l'urbanisation et le changement climatique.....	9
2) L'écologie urbaine : Comprendre pour agir face aux enjeux environnementaux urbains....	10
3) L'écologie du paysage : Vers une meilleure intégration des dynamiques écologiques et spatiales urbaines.....	12
B) L'écologie du hérisson.....	14
1) Le hérisson : une espèce parapluie au capital sympathie.....	14
2) Les espaces du hérisson.....	16
2.1) Répartition géographique du hérisson d'Europe : Un aperçu de sa présence en France.....	16
2.2) Préférences d'habitat du hérisson : Adaptations en milieu rural et urbain.....	17
3) Eléments sur la vie du hérisson.....	17
3.1) Le domaine vital du hérisson : Variations entre zones rurales et urbaines.....	17
3.2) Le mode de vie nocturne du hérisson : Comportements et adaptations évolutives....	18
3.3) Le régime alimentaire du hérisson : Diversité et importance écologique.....	19
4) Menaces pour le hérisson : Fragmentation de l'habitat et risques de mortalités.....	20
C) Restaurer la connectivité écologique urbaine.....	24
1) L'Importance de la connectivité écologique : Faciliter les mouvements de la faune urbaine..	24
2) La trame verte et bleue : Un outil clé pour la continuité écologique.....	24
3) Le projet Piqu'en Ville : Une initiative pour la restauration écologique.....	26
4) Optimisation du réseau écologique pour le hérisson à Caen : Problématiques et objectifs.	30
<b>MÉTHODOLOGIE.....</b>	<b>33</b>
A) Construction de la carte du paysage urbain de Caen.....	33
1) Sources et collecte des données spatiales : Contribution de l'AUCAME.....	34
1.1) Analyse du mode d'occupation des sols : Un pilier pour la cartographie du paysage urbain.....	34
1.2) Utilisation de la sous-trame agricole extensive pour identifier les habitats propices aux hérissons.....	35
2) Lacunes des données sur les barrières : Un défi pour la modélisation de la fragmentation urbaine.....	38
B) Collecte et classification des données sur les barrières pour créer un modèle prédictif.....	39
1) Pré-traitement des données sur les barrières à l'aide de QGIS.....	40
1.1) Identification des emplacements des barrières à partir des données cadastrales.....	40
a) Utilisation du plan cadastral pour délimiter les emplacements potentiels des barrières.....	40

b) Transformation des parcelles cadastrales en lignes pour l'analyse des barrières.....	40
1.2) Réduction de l'ensemble des barrières potentielles : Application d'un échantillonnage aléatoire stratifié.....	42
a) Sélection de la méthode d'échantillonnage aléatoire stratifié.....	42
b) Création de la carte de répartition des quartiers de Caen dans QGIS.....	44
c) Mise en œuvre de l'échantillonnage aléatoire des lignes cadastrales par quartier..	46
1.3) Validation de l'exactitude des lignes cadastrales par observation sur le terrain.....	48
1.4) Analyse de l'influence de l'environnement sur le type de barrières.....	49
a) Délimitation des zones tampon autour des barrières.....	49
b) Hiérarchisation des occupations du sol pour une analyse précise.....	50
c) Association des environnements des barrières avec les zones délimitées.....	52
d) Quantification des surfaces occupées dans les zones d'étude.....	52
2) Techniques d'observation des barrières pour une cartographie écologique précise.....	54
2.1) Utilisation des outils géospatiaux pour l'analyse des barrières en milieu urbain.....	54
2.2) Typologie des barrières : De l'observation à la catégorisation écologique.....	55
3) Développement d'un modèle prédictif pour la classification des barrières urbaines.....	56
3.1) Présentation du modèle de prédiction des barrières basé sur les forêts aléatoires.....	56
3.2) Entraînement et validation du modèle pour une classification précise des barrières..	57
3.3) Application du modèle prédictif sur l'intégralité des données cadastrales.....	58
C) Modélisation du déplacement du hérisson à l'aide de la théorie des graphes.....	59
1) Fondements théoriques et outils pour la modélisation des réseaux écologiques.....	60
1.1) Concepts clés : Fragmentation paysagère, réseau écologique et théorie des graphes.	60
1.2) Utilisation de Graphab pour la modélisation des réseaux écologiques.....	62
2) Optimisation de la modélisation des réseaux écologiques.....	63
2.1) Conception de la carte du paysage urbain : Intégration des barrières et optimisation des couches sous QGIS.....	63
2.2) Paramétrage des nœuds et des habitats dans Graphab : Focus sur le hérisson en milieu urbain.....	66
2.3) Établissement des connexions écologiques : Choix de la topologie et calcul des distances à moindre coût.....	66
a) Topologie des liens : Compromis entre réalisme et lisibilité du réseau.....	66
b) Analyse des déplacements en milieu urbain : De la distance euclidienne à la distance-coût.....	67
2.4) Simulation et évaluation du réseau écologique : De la modélisation aux métriques de connectivité.....	69
a) Conversion des distances : Intégration du coût de déplacement dans la modélisation.....	69
b) Identification des corridors écologiques : Cartographie des chemins potentiels pour le hérisson.....	71
c) Construction du graphe paysager : Représentation de la connectivité écologique..	71
d) Analyse des métriques de connectivité : Évaluation de la fragmentation et des corridors écologiques.....	72

<b>RÉSULTAT.....</b>	<b>76</b>
1) Analyse des barrières urbaines à Caen : Typologie, répartition et implications écologiques.....	76
2) Évaluation des barrières urbaines à Caen à l'aide d'un modèle prédictif : Performances et limites.....	78
3) Modélisation des réseaux écologiques du hérisson à Caen : Identification des points stratégiques pour la conservation.....	79
<b>DISCUSSION.....</b>	<b>84</b>
A) Analyse des résultats.....	84
1) Évaluation de l'efficacité des méthodes d'observation à distance des barrières urbaines.....	84
1.1) Dominance des barrières imperméables dans la ville de Caen : Impact sur la connectivité écologique.....	84
1.2) Disparités spatiales des types de barrières dans les quartiers de Caen : Conséquences pour les corridors écologiques.....	85
1.3) Analyse des surfaces urbaines et leur rôle dans la connectivité des habitats pour la faune.....	86
2) Performance et limites du modèle prédictif pour la classification des barrières urbaines.....	87
3) Analyse du réseau écologique du hérisson.....	88
B) Limites de l'étude :	92
1) Actualisation des données.....	92
1.1) Impact de l'actualisation des données AUCAME sur l'analyse écologique : Perspectives pour 2024.....	92
1.2) Correction d'un artefact de données dans le quartier Sainte-Thérèse Demi-Lune : Conséquences sur l'analyse écologique.....	92
1.3) Mise à jour du plan cadastral : Implications pour la modélisation écologique du hérisson.....	94
2) Lignes du plan cadastral.....	94
2.1) Limites de la classification des barrières dans le plan cadastral : Un impact sur la précision des modèles écologiques.....	94
2.2) Disparités dans la représentation des barrières physiques : Repenser la classification des lignes cadastrales.....	94
3) L'échantillonnage.....	95
3.1) Inclusion de données supplémentaires dans l'échantillonnage : Révisions et ajustements méthodologiques.....	95
4) Limitations des observations de terrain et adaptations méthodologiques.....	97
5) Optimisation et application d'un modèle prédictif des barrières urbaines.....	101
5.2) Assignment des classes de perméabilité aux barrières cadastrales via modélisation.....	102
6) Modélisation du réseau écologique du hérisson : Défis et solutions.....	102
<b>CONCLUSION.....</b>	<b>104</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE.....</b>	<b>106</b>
<b>ANNEXE.....</b>	<b>112</b>

# INDEX DES TABLEAUX ET DES FIGURES

Figure 1 : Les différentes approches possibles en écologie urbaine et leurs principales caractéristiques en termes d'hypothèses, d'importance des thèmes de recherche et de méthodologie, modifié par Maughan (2012) d'après Emelianof (2001).....	11
Figure 2 : Image provenant du dessin animé Sonic le hérisson.....	14
Figure 3 : Logos de projets associatifs utilisant l'image du hérisson.....	15
Figure 4 : Carte de répartition européenne de Erinaceus europaeus (Mennessier, 2013).....	16
Figure 5 : Hérisson d'Europe en train de manger du poisson. Source : Igor I Savin.....	19
Figure 6 : Perte d'habitat et fragmentation, deux processus à ne pas confondre.....	21
Figure 7 : Passages créés dans un grillage à gauche et dans un mur en pierre de Caen à droite pour le projet Piqu'Caen.....	26
Figure 8 : Choupiisson empruntant un passage de Piqu'Caen. Image issue du suivi par piège photographique.....	27
Figure 9 : Carte de l'évolution du programme Piqu'en ville, pour la ville de Caen.....	29
Figure 10 : Maisons d'un quartier reliées entre elles par les passages à hérisson créés par le projet Piqu'en ville.....	29
Figure 11 : Carte des haies de Caen-métropole.....	37
Figure 12 : Carte de la Sous-Trame agricole extensive.....	37
Figure 13 : Étapes permettant la création de lignes appartenant au plan cadastral.....	41
Figure 14 : Schéma explicatif des différentes méthodes d'échantillonnages.....	42
Figure 15 : Carte des quartiers de Caen réalisée sur QGIS.....	45
Figure 16 : Étapes de l'échantillonnage aléatoire stratifié.....	46
Figure 17 : Répartition des 1000 échantillons au sein de leur strate.....	47
Figure 18 : Différenciation des couches pour supprimer les superpositions.....	52
Figure 19 : Différents exemples de calcul de surface.....	53
Figure 20 : Vocabulaire relatif aux graphes paysagers Encadré n°2 (Clauzel, 2021).....	61
Figure 21 : Fiches méthodologiques pour la prise en main de Graphab. LADYSS-SNPN.....	62
Figure 22 : Carte du paysage de Caen avec une résolution spatiale de 2 mètres.....	65
Figure 23 : Modélisation des chemins à moindre coût entre les différents habitats potentiels.....	70
Figure 24 : Conversion d'une distance métrique en distance coût cumulé.....	71
Figure 25 : Niveaux de calcul des métriques de connectivité dans un graphe.....	72
Figure 26 : Paramétrage des métriques.....	73
Figure 27 : Principe des delta-métriques.....	74
Figure 28 : Histogramme de la démarche méthodologique adoptée.....	75
Figure 29 : Résultat de l'entraînement du modèle statistique prédictif avec le modèle des forêts aléatoires.....	78
Figure 30 : Carte des corridors empruntés par les hérissons dans la ville de Caen. Source : Etienne Valognes.....	80
Figure 31 : Les différentes étapes pour représenter le réseau écologique du hérisson dans la ville de Caen. Source : Etienne Valognes.....	81
Figure 32 : Les différentes étapes pour représenter le réseau écologique du hérisson dans le quartier sainte-thérèse demi-lune. Source : Etienne Valognes.....	83
Figure 33 : Artéfact dans les données de la sous-trame agricole extensive.....	93
Figure 34 : Barrière à observer entre le 21 et 23 Boulevard de Rethel.....	98

Figure 35 : Terrain herbacé au 21 Boulevard de Rethel suite à des travaux.....	98
Figure 36 : Maison floutée rendant l'observation impossible à réaliser avec cet outil.....	99
Figure 37 : Utilisation de Google Earth pour réaliser cette observation.....	99
Figure 38 : Partie du quartier de Beaulieu-Maladrerie Saint-Paul censuré par Google Earth.....	100

**Les tableaux :** .....

Tableau 1 : Tableau des codes des différentes couches d'occupation du sol.....	64
Tableau 2 : Matrice distance-coût.....	67
Tableau 3 : Nombre de barrières observables.....	76
Tableau 4 : Nombre de barrières présentes.....	76
Tableau 5 : Classification des 1150 barrières observées réparties selon leur type de perméabilité.....	76
Tableau 6 : Répartition en pourcentage des classes de barrières en fonction des différents quartiers de Caen.....	77
Tableau 7 : Moyenne des surfaces calculées dans les tampons en fonction de l'occupation du sol.....	78

**Les annexes :** .....

Annexe 1 : Lien du Github pour accéder aux codes pour le modèle statistique prédictif de barrière :.....	112
Annexe 2.1 : Tableau de donnée pour entraîner le modèle.....	113
Annexe 2.2 : Tableau de donnée pour tester le modèle.....	113

**Acronyme utilisé dans ce mémoire :**

TVB : Trame Verte et Bleue

PLU : Plan Local d'Urbanisme

AUCAME : Agence d'urbanisme de Caen Normandie Métropole

MOS : Mode d'Occupation du Sol

SIG : Système d'information géographique

**Mots-clés : Modélisation, Réseau écologique, Barrière, Hérisson, Milieu urbain**

**Keyword : Modeling, Ecological network, Barrier, Hedgehog, Urban environment**

# AVANT PROPOS

J'ai toujours eu un rapport privilégié avec la nature et l'écologie. Je proviens d'une petite commune de 580 habitants située au Sud-Est de Caen, anciennement appelée Chicheboville avant une fusion communale que je n'accepte toujours pas pour des raisons d'indépendantisme. Cette commune était plaisante à vivre avec ses 100 ha de zone humide d'intérêt floristique et faunistique classée par Natura 2000, dont les balades n'étaient jamais similaires grâce à la variété de la faune rencontrée.

Les souvenirs d'enfance de ces balades sont assez forts pour être gravés en moi pour le restant de mes jours. Lors des balades, il ne fallait guère faire de bruit pour espérer croiser une biche accompagnée de ses faons au détour d'un chemin. Lapins, canards et autres faisans étaient aussi de la partie. Si j'étais très chanceux, il était possible d'apercevoir un renard. Une fois enfouie dans la forêt, dont les cimes des arbres me plongeaient dans la pénombre, je ne pouvais voir que de nombreux terriers de blaireau sans en rencontrer les habitants. Rien de plus normal puisque ces bêtes ont un mode de vie nocturne et qu'il n'est pas propice de laisser un enfant faire une balade en forêt en pleine nuit. En revanche, le seul endroit où il m'arrivait de rencontrer des animaux nocturnes était dans mon jardin. Mes parents avaient une maison avec un grand jardin. Pratique pour stocker du bois et parfait pour servir d'abri à de nombreux petits mammifères, permettant au passage de faire ma première rencontre avec ce petit mammifère ébouriffé de piques qu'est le hérisson !

“Ne le touche pas” m'a ordonné mon père quand il m'aperçut me diriger vers l'animal, m'expliquant que le hérisson est un animal couvert de puces et qu'il n'en veut ni dans la maison, ni sur moi. Ces fausses affirmations sont encore répandues aujourd'hui, car la compréhension et la connaissance du hérisson ne sont pas assez connues. En réalité, les puces du hérisson sont inhérentes aux hérissons. Elles ne peuvent donc pas se transmettre ni sur l'homme ni sur d'autres animaux. Malgré tout, j'étais subjugué par ce petit animal nocturne qui continua sa balade tardive et disparut dans une haie. À mon plus grand regret, la majorité des autres rencontres avec des hérissons n'était pas aussi joyeuse, puisque quand je les apercevais, c'était sur des bords ou au milieu des routes, complètement écrasés.

La vie qui nous entoure, qu'elle soit animale ou bien végétale, est bien trop éphémère et donc précieuse. C'est cette prise de conscience qui a fait naître en moi une passion et une soif de connaissance dans les sciences de la vie. Bien sûr, les excellents professeurs que j'ai eu dans ces domaines tout au long de mon cursus, ont aussi une part de responsabilité.

J'ai donc mené mes études en licence de science de la vie, dans un parcours de biologie et écologie. Au cours de ce cursus, j'ai fait connaissance de personnes dont je partage encore aujourd'hui des valeurs communes, notamment des valeurs politiques et écologiques. Ces valeurs sont, à mon sens, étroitement liées et sont importantes pour faire naître une amitié avec moi, ainsi que pour former un excellent binôme pour les différents travaux demandés. Une de ces personnes était le président de l'Association Caennaise des Etudiants Naturalistes (ACEN). J'ai donc rejoint cette association et ce fut ma première porte d'entrée dans le milieu associatif.

Les personnes occupant le local de l'association n'étaient que des gens comme moi. C'était des gens provenant majoritairement de la même licence et deux raisons peuvent principalement nous mettre en état de stress : les résultats des partiels de Biochimie et l'avenir incertain dans un monde où les problématiques environnementales ne sont pas écoutées à leur juste valeur. L'éco-anxiété est un néologisme qui désigne l'ensemble des émotions liées au sentiment de fatalité vis-à-vis des diverses crises écologiques. C'est une nouvelle forme d'anxiété qui se développe de plus en plus dans ma génération. Pour ma part, j'ai commencé à devenir éco-anxieux en 2021, lorsque les rapports du GIEC sont sortis et ont été alarmistes sur la situation actuelle en vue des prochaines crises climatiques. Les scientifiques sont sans appel : pour assurer un futur soutenable et viable, il faut agir rapidement, car la fenêtre d'opportunité est étroite. Les rapports du GIEC sont très denses et sont donc résumés à l'intention des décideurs. Cependant, un sentiment global se fait ressentir par ma génération, celui de ne pas être écouté par les décideurs, ce qui provoque une certaine rage, que nous avons tous au sein du local.

C'est pour cette raison que pour commencer, il faut changer les choses nous-mêmes à notre échelle. L'ACEN a donc fait intervenir des professionnels et des associations locales en rapport avec l'environnement et l'écologie pour former et sensibiliser davantage les étudiants de l'université de Caen.

Une des interventions m'avait particulièrement intéressé. C'était la présentation de Piqu'en ville, un projet porté par l'association du Groupe Mammalogique Normand (GMN). Ce projet permet de créer des passages entre les jardins pour favoriser les déplacements de la petite faune terrestre, dont le Hérisson d'Europe qui est l'animal emblématique de ce projet. Je suis donc devenu bénévole de ce projet pour aider les petites bêtes hirsutes de mon enfance. J'ai découvert par la même occasion que la fragmentation de son habitat, principalement causée par les routes, est la première cause de mortalité chez le hérisson. Je comprends donc mieux la raison pour laquelle j'ai croisé par le passé autant de hérissons écrasés sur les bords de routes.

Je suis actuellement en Master de Géographie, Aménagement, Environnement et Développement (GAED), parcours Environnement, Risques et Diagnostics Territoriaux. Cette année, j'ai pris conscience de l'importance des collectivités territoriales dans les aménagements urbains pour répondre aux problématiques environnementales de demain. Le choix de mon sujet de mémoire s'est donc imposé naturellement : utiliser ma passion pour les sciences et mes compétences, à la fois en tant qu'ancien biologiste et nouveau géographe, pour réaliser un mémoire dans le domaine de la biogéographie. L'objectif à la suite de ce mémoire, est d'apporter une aide à la décision et une perspective opérationnelle bénéfique au projet "Piqu'en Ville", aux hérissons et à la micro-faune, ainsi qu'à la biodiversité de ma ville.

# INTRODUCTION GENERALE

## A) Enjeux de l'écologie urbaine

### 1) Les défis environnementaux posés par l'urbanisation et le changement climatique

Le réchauffement climatique est un phénomène planétaire, étudié et documenté par de nombreux scientifiques depuis de nombreuses années, nous alertant d'une crise climatique sans précédent causée par l'activité humaine (GIEC, 2021). Les systèmes urbains sont responsables en grande partie de cette crise écologique puisqu'ils représentent à eux seuls entre 67 et 76 % de la consommation mondiale d'énergie (United Nations, 2018).

Des répercussions sont déjà présentes dans les milieux urbains, notamment avec l'apparition d'îlots de chaleur. Comme le décrit Cantat (2004), les effets d'« îlot de chaleur urbain » (ICU) désigne une « sorte de dôme d'air plus chaud couvrant la ville » qui est la « manifestation climatique la plus concrète de la présence et des activités de la ville ». L'intensité de ce phénomène est liée à la densité de population des villes (Oke, 1973), mais aussi à l'expansion urbaine. Il ne s'agit que d'une répercussion parmi d'autres.

Ces répercussions ne sont pas près de s'arrêter avec l'augmentation de la population mondiale qui devrait continuer à croître au cours des cinquante ou soixante prochaines années, atteignant ainsi un pic d'environ 10,3 milliards d'habitants vers 2080, contre 8,2 milliards en 2024. (United Nations, 2024). Ceci représente un défi d'autant plus complexe à résoudre lorsque l'on sait que la population mondiale se concentre davantage dans les zones urbaines (United Nations, 2018).

Face à ces enjeux, des nouveaux domaines et concepts sont apparus permettant d'étudier tous les problèmes liés à l'urbanisation, pour pouvoir ensuite apporter des solutions.

Il faut comprendre pour mieux agir.

## **2) L'écologie urbaine : Comprendre pour agir face aux enjeux environnementaux urbains**

L'écologie urbaine est une discipline qui rassemble les problématiques environnementales liées au milieu urbain et à l'urbanisation, pour pouvoir ensuite limiter et réparer leurs conséquences négatives. C'est à la fin des années 1990 que cette discipline prend plus d'ampleur en étudiant le rapport des villes avec leurs environnements (Collins, 2000). Ceci s'explique justement par le contexte de crise écologique mondiale récente qui a entraîné un mouvement de pensée international cherchant à comprendre les liens entre le milieu urbain et l'écologie au sens large. Maughan (2012) explique que « les systèmes urbains y sont appréhendés de manière globale » puisqu'il étudie à la fois « l'écologie *dans* la ville (l'étude des organismes vivants dans les zones urbaines) » et « l'écologie *de* la ville (l'étude des systèmes urbains dans une perspective écologique) ».

L'étude de l'écologie était auparavant principalement un domaine d'étude réservé aux biologistes, naturalistes, botanistes, étudiant donc les milieux naturels et ruraux. Cependant, pour comprendre le fonctionnement d'une ville ainsi que le système urbain, il est nécessaire de faire appel à d'autres disciplines. L'écologie urbaine est donc un objet d'étude pluridisciplinaire, intégrant les géographes, historiens, sociologues, écologues ainsi que des gestionnaires et citoyens. Cette pluridisciplinarité se transforme avec le temps, devenant donc un objet d'étude interdisciplinaire. (Maughan, 2012). La complexité d'étudier l'écologie urbaine et le besoin d'experts de discipline de milieu divergeant changent l'approche de cette étude. Comme l'explique Maughan (2012), « L'étude des zones urbaines peut donc s'orienter vers un champ de recherche transdisciplinaire tout en dépassant la notion d'écosystème urbain pour parvenir à une écologie des paysages urbains » (Figure 1)

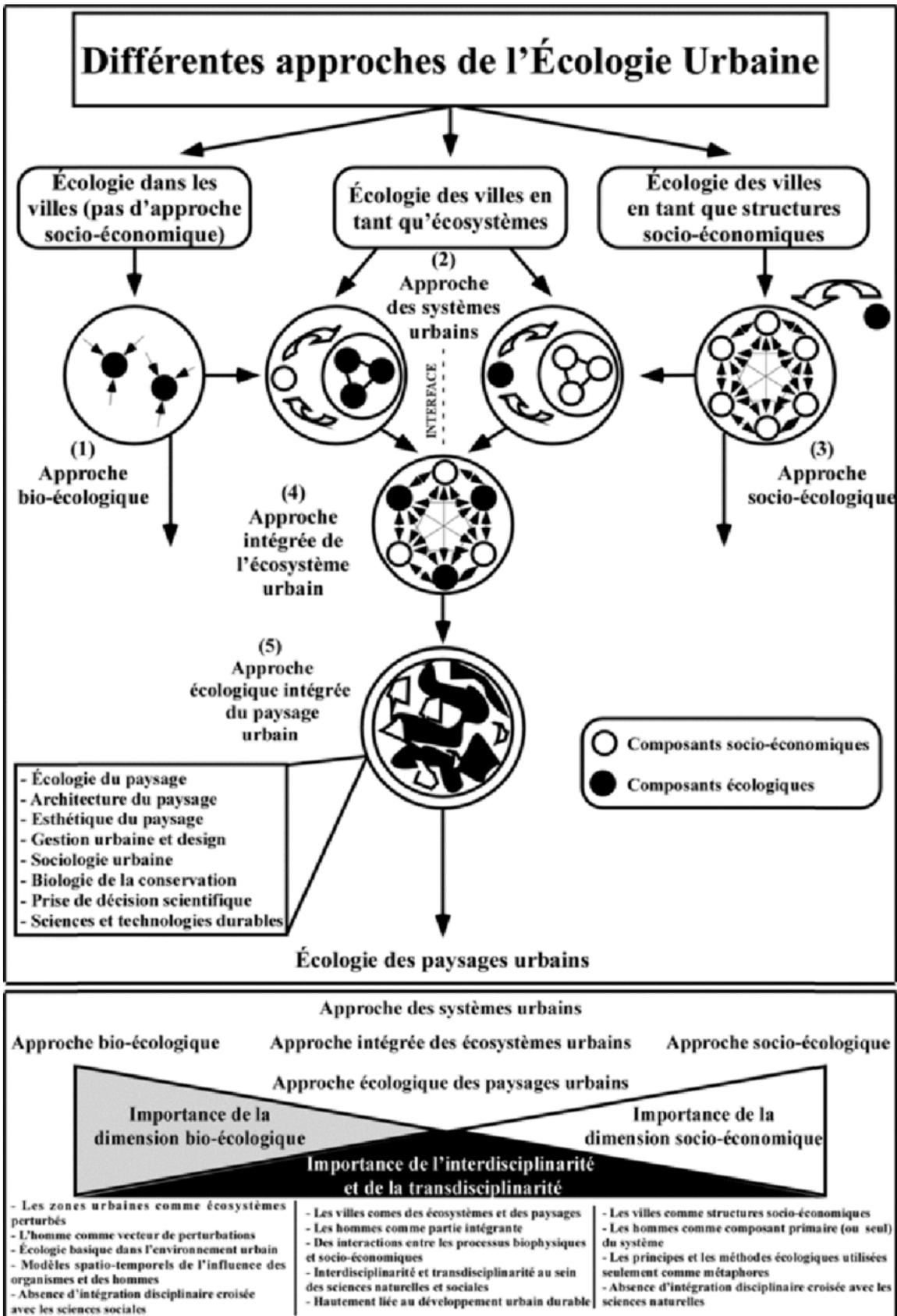


Figure 1 : Les différentes approches possibles en écologie urbaine et leurs principales caractéristiques en termes d'hypothèses, d'importance des thèmes de recherche et de méthodologie, modifié par Maughan (2012) d'après Emelianof (2001)

### **3) L'écologie du paysage : Vers une meilleure intégration des dynamiques écologiques et spatiales urbaines**

L'écologie du paysage est un domaine plus précis que l'écologie urbaine puisqu'il cherche à expliquer les interactions entre l'organisation de l'espace (les structures paysagères) et les processus écologiques.

Ce domaine reconnaît le rôle de l'hétérogénéité paysagère dans les processus écologiques, permettant d'identifier les motifs paysagers qui se répètent. Cela permet d'étudier les interactions écologiques, notamment les flux d'organismes vivants, présents dans un motif paysager (Clauzel, 2020).

Il reconnaît aussi le paysage en tant que niveau hiérarchique supérieur et prend en compte explicitement l'anthropisation des territoires. Cela permet d'étudier les paysages et les interactions écologiques à différentes échelles, qu'elles soient grandes ou petites afin de s'adapter à une problématique précise.

L'écologie du paysage, comme expliqué auparavant, est un champ d'étude transdisciplinaire, Clauzel explique d'ailleurs que « la prise en compte explicite de l'espace et des acteurs pour analyser la complexité des territoires, sont autant d'atouts de la géographie pour répondre aux enjeux de biodiversité. » Cela montre bien le besoin de travailler avec les gens qui connaissent le terrain pour sortir du cadre théorique afin d'apporter des variables de terrain inestimables pour les études de ce domaine.

Les enjeux climatiques induits par l'urbanisation peuvent donc être étudiés et solutionnés en partie par l'écologie du paysage urbain en proposant des projets d'aménagements urbains avec différents acteurs afin de réaliser une transition écologique.

La transition écologique s'est imposée ces dernières années comme une réponse incontournable et s'inscrit dans cette logique de transformation. Ce concept, popularisé par Rob Hopkins (2010) avec son travail sur les villes en transition, s'inscrit dans une démarche écocitoyenne basée sur des initiatives locales pour faire face aux défis environnementaux. La transition écologique invite à repenser nos modes de vie et d'urbanisation en mobilisant à la

fois les politiques publiques ainsi que les acteurs locaux. Cependant, cette transition ne propose pas de modèle urbain. Elle nous interroge sur notre capacité à construire notre futur de manière collective et délibérée, en proposant des alternatives qui se veulent à la fois radicales et concrètes. (Krauz , 2014).

Dans cette démarche, les collectivités locales jouent un rôle crucial en mettant en place la Trame Verte et Bleue. En termes d'écologie du paysage, une Trame Verte est la somme des zones de connexion biologique et des habitats naturels connectés. La Trame Verte a donc pour objectif d'améliorer la connectivité écologique des paysages urbains en améliorant les réseaux écologiques de la faune et de la flore, garantissant alors des zones de connectivité entre les habitats essentiels à la biodiversité.

Parmi les espèces affectées par l'urbanisation, le hérisson se distingue comme une espèce emblématique de la faune urbaine. Étudier le réseau écologique de cette espèce dans le domaine de l'écologie du paysage urbain semble alors très pertinent pour évaluer l'état de santé des écosystèmes urbains. Présent dans de nombreuses villes, il est un indicateur de la biodiversité par la protection d'espèces sous-jacentes présentes dans son domaine vital.

Ainsi, l'analyse de la fragmentation de son habitat à travers l'étude de son réseau écologique permet d'identifier les zones les plus fragmentées. Cela permet alors de mettre en place, avec les différents acteurs locaux, des interventions opérationnelles ou des projets d'aménagement ciblés pour y remédier.

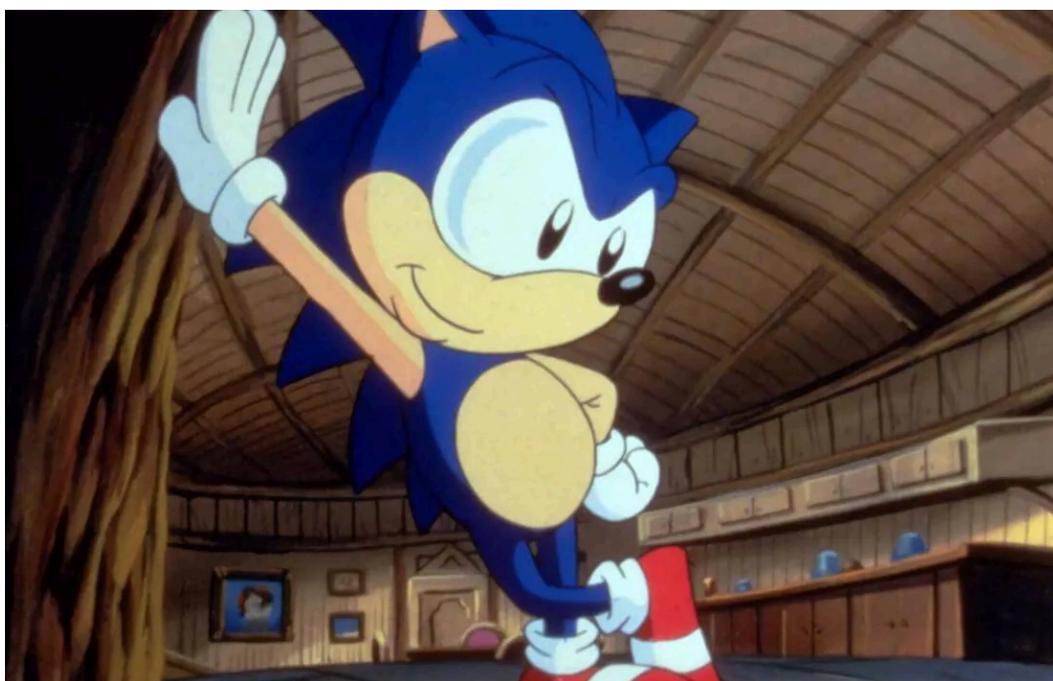
Il est donc essentiel de connaître l'écologie de cette espèce pour comprendre le fonctionnement et l'état de son réseau écologique en milieu urbain. Il faut comprendre pour mieux agir.

## B) L'écologie du hérisson

### 1) Le hérisson : une espèce parapluie au capital sympathie

Le hérisson a été choisi pour cette étude, car il s'agit d'une espèce "parapluie", c'est-à-dire qu'elle possède un domaine vital assez large pour que sa protection assure celle des autres espèces animales peuplant le même territoire grâce à ses interactions écologiques (Macdonald & Newman, 2002; Rautio *et al.*, 2013). De plus, le hérisson possède un capital sympathie dans l'imaginaire collectif, atout particulièrement crucial dans sa protection.

L'exemple le plus frappant de l'influence culturelle du hérisson est Sonic, un personnage emblématique de jeux vidéo, qui incarne les traits d'un hérisson bleu et qui a marqué plusieurs générations. Depuis sa création, Sonic est devenu le protagoniste de plus de 65 jeux vidéo, ainsi que de plusieurs séries d'animation et films (Figure 2). C'est incontestablement le hérisson le plus connu au monde, ce qui permet de renforcer l'image positive du hérisson à travers le monde. Au-delà de Sonic, le hérisson apparaît également en tant que héros de nombreuses histoires pour enfants, ainsi que de publicité.



*Figure 2 : Image provenant du dessin animé Sonic le hérisson*

En raison de sa popularité, de la même manière que la WWF a mobilisé le capital sympathie autour du panda géant pour engager une action de protection plus globale de l'environnement, le hérisson apparaît comme un symbole fédérateur. C'est pour cela que le hérisson est aussi le symbole de nombreuses associations luttant pour la protection de la nature et de l'environnement (Figure 3).



*Figure 3 : Logo de projets associatifs utilisant l'image du hérisson*

Le choix du hérisson pour cette étude s'est donc naturellement fait, puisqu'il s'inscrit dans cette même logique. En voulant l'étudier et le protéger dans le milieu urbain, cela permet aux autres espèces de ce milieu de bénéficier de cette même protection grâce au statut d'espèce parapluie que le hérisson possède. De plus, puisque le domaine de cette étude s'inscrit dans l'écologie du paysage urbain, il est alors nécessaire de travailler en collaboration avec des acteurs locaux et le capital sympathie du hérisson permet de faciliter la mobilisation de ces acteurs pour des initiatives de conservation impactantes.

## 2) Les espaces du hérisson

### 2.1) Répartition géographique du hérisson d'Europe : Un aperçu de sa présence en France

Il existe une quinzaine d'espèces de hérisson dans le monde, mais la seule espèce présente en France est *Erinaceus europaeus*, le hérisson d'Europe. Cette espèce porte bien son nom puisqu'elle est répartie dans l'ensemble de l'Europe occidentale, nordique et balte (Figure 4).

Bien qu'il possède une grande aire de répartition géographique, le hérisson montre des préférences en termes d'habitats.

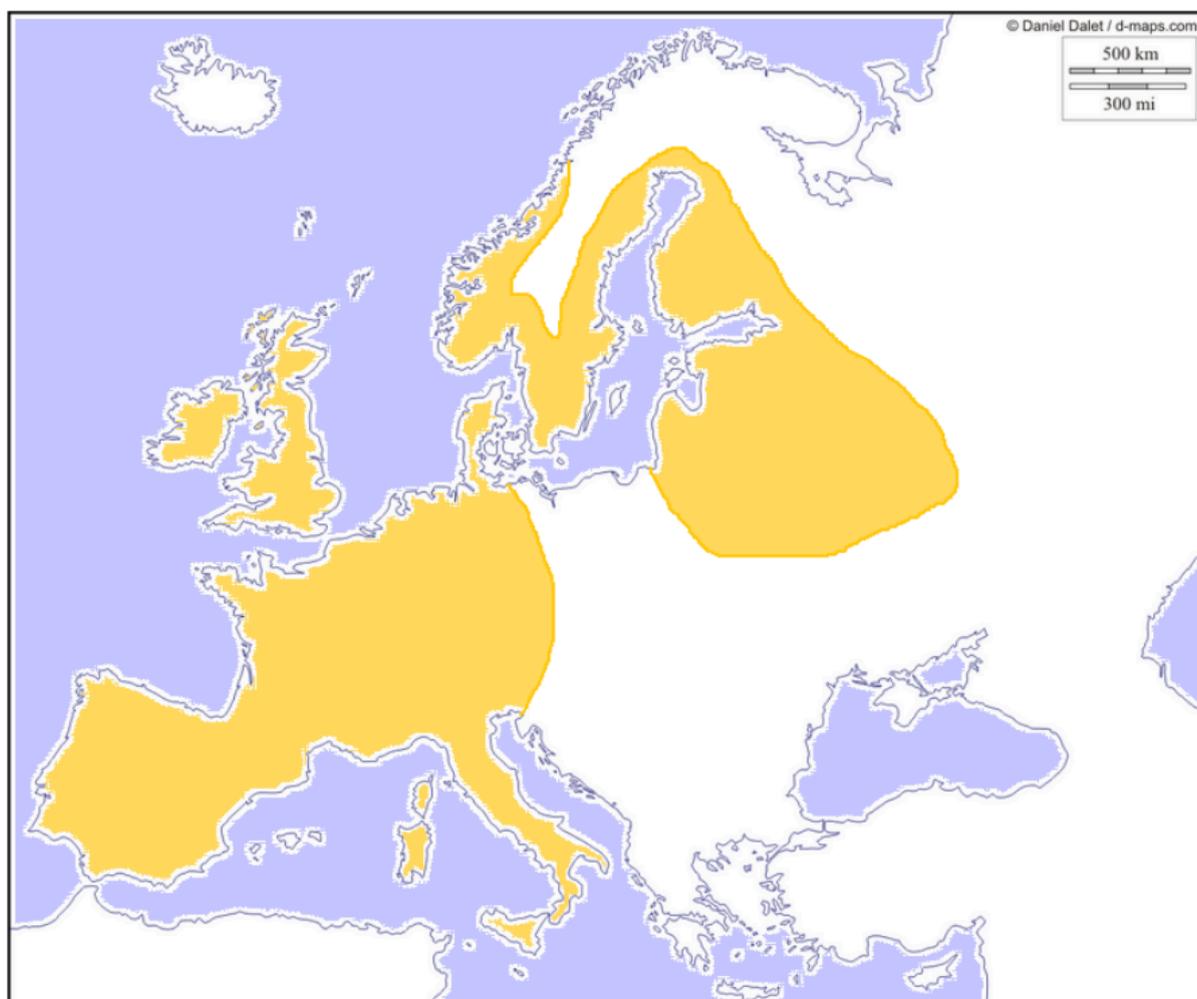


Figure 4 : Carte de répartition européenne de *Erinaceus europaeus* (Menessier, 2013)

## **2.2) Préférences d'habitat du hérisson : Adaptations en milieu rural et urbain**

Le hérisson est présent à la fois en milieu rural et en milieu urbain. Quand il est en zone rurale, le hérisson occupe divers types d'habitats, mais principalement ceux riches en haies (Huijser, 2000).

Cependant, il peut également être considéré comme un « *urban adapter* » puisqu'il semble s'accommoder particulièrement à des conditions environnementales urbaines (Hubert, 2008). En effet, la densité de population du hérisson est 9 fois plus importante dans le milieu urbain que dans le milieu rural (Hubert, 2008). Le hérisson n'est pas le seul animal couramment présent aux aires urbaines, il y a une large variété de la faune sauvage se trouvant plus en abondance en milieu urbain qu'en milieu rural (Luniak, 2004).

La présence du hérisson dans les milieux urbains et périurbains est favorisée par les parcs, les grands espaces verts ainsi que des nombreux jardins, riches en ressources et en cachettes, qui lui offrent des habitats favorables (Hubert *et al.*, 2011). Le nombre d'habitats est un facteur important pour le hérisson puisqu'il ne reste pas dans un même habitat toute sa vie. En effet, il se déplace tout au long de sa vie dans son domaine vital.

## **3) Eléments sur la vie du hérisson**

### **3.1) Le domaine vital du hérisson : Variations entre zones rurales et urbaines**

Le hérisson possède un domaine vital, cela correspond à l'aire où il vit ordinairement et qui suffit à répondre à ses besoins primaires. Contrairement à un territoire (dans son acception biologique et éthologique), les domaines vitaux des hérissons peuvent se superposer. Il n'y est donc pas question d'y défendre son exclusivité contrairement aux territoires d'autres espèces. Ce domaine vital, s'il se trouve en zone rurale, peut s'étendre entre 32 et 105 ha pour un mâle et 10 à 50 ha pour une femelle (Jourde, 2020). Cependant, en zone urbaine, il semble significativement réduit. L'étude de Rondinini et Doncaster de 2002 montre l'étendue des domaines vitaux en ville à 5 ha tandis qu'il est estimé à 17 ha dans l'étude de Braaker, *et al.* de 2014.

Bien que ces domaines vitaux soient considérablement réduits dans le milieu urbain, leur taille reste relativement importante. Il convient de préciser que 1 hectare est l'équivalent de la superficie d'environ 20 jardins en France, soit autant de barrières artificielles pouvant fragmenter l'habitat de ce petit mammifère.

### **3.2) Le mode de vie nocturne du hérisson : Comportements et adaptations évolutives**

Le hérisson est un animal nocturne, profitant alors de cet avantage évolutif pour parcourir, dans son domaine vital, de grandes distances la nuit puisque le danger est moindre durant cette période. En milieu rural, les femelles parcourent 2 km par nuit et les mâles en parcourent 4. Cette distance est également grandement réduite lorsque le hérisson se trouve en milieu urbain. Une étude conduite à Nantes montre une distance parcourue de 150 m en moyenne la nuit avec un maximum de 456 m qui a été réalisé par une femelle (Verry et Marianne, 2012).

Le comportement nocturne chez le hérisson est probablement lié au phénomène évolutif appelé le "goulot d'étranglement nocturne" chez les mammifères placentaires décrit par Walls en 1942.

Le hérisson fait partie de l'infra-classe des Eutheria, dont les ancêtres ont évolué pendant l'ère Mésozoïque pour adopter un mode de vie nocturne. Des adaptations se sont manifestées durant cette ère par des changements de leur système visuel, favorisant alors la vision nocturne (Gerkema, 2013). Cette évolution à travers le temps a favorisé le mode de vie nocturne chez les hérissons. Cette faculté évolutive étant ancienne, elle n'est pas propre au hérisson. Ses très lointains cousins ont aussi cette faculté, permettant d'avoir une variété de mammifères sauvages nocturnes en ville.

L'activité nocturne du hérisson est triphasique (Herter, 1934). La première phase d'activité se passe entre 18 h et 20 h 30, c'est la phase la plus importante puisqu'elle est consacrée à la recherche de nourriture. La deuxième phase d'activité se déroule entre 0 h et 2 h, l'exploration et les contacts sociaux se font majoritairement durant cette période. Enfin, la troisième phase d'activité se passe entre 4 h et 5 h 30 où l'activité est la moins importante, mais il continue sa recherche d'alimentation. (Berthoud, 1982)

### **3.3) Le régime alimentaire du hérisson : Diversité et importance écologique**

Le hérisson appartient à l'ordre des insectivores (Eulipotyphla), comprenant aussi la taupe (*Talpa europaea*) et la musaraigne carrelet (*Sorex araneus*). Il se nourrit donc d'insectes et d'invertébrés, notamment de limaces et d'escargots, ce qui peut être particulièrement bénéfique pour les jardins et les cultures en réduisant le besoin de pesticides chimiques (Hof & Bright, 2010). Il se nourrit aussi de vers de terre, d'arthropodes, de larves d'insectes et de petits mollusques (Yalden, 1976; Wroot, 1984). Comme le montre la figure 5, le hérisson a une alimentation très variée puisqu'il est avant tout opportuniste (Jones *et al.*, 2005).



*Figure 5 : Hérisson d'Europe en train de manger du poisson. Source : Igor I Savin*

#### **4) Menaces pour le hérisson : Fragmentation de l'habitat et risques de mortalités**

Afin de s'alimenter et d'explorer, il est préférable que le hérisson se trouve dans un milieu pas trop fragmenté. En effet, comme mentionné auparavant, les milieux fortement anthropisés apportent leur lot de contraintes. Les infrastructures de transport fragmentent le réseau écologique et les habitats du hérisson, limitant ainsi leurs déplacements et leur accès aux ressources (Huijser & Bergers, 2000). Les routes constituent leur principale source de mortalité (Rondinini & Doncaster, 2002). En effet, le hérisson doit traverser les routes pour se déplacer de jardin en jardin dans sa quête de nourriture, le rendant alors vulnérable à la circulation routière. De plus, la tranche horaire de sa première phase d'activité, la plus active de toutes, correspond à l'heure de pointe du soir, soit le moment où le flux de trafic est le plus important.

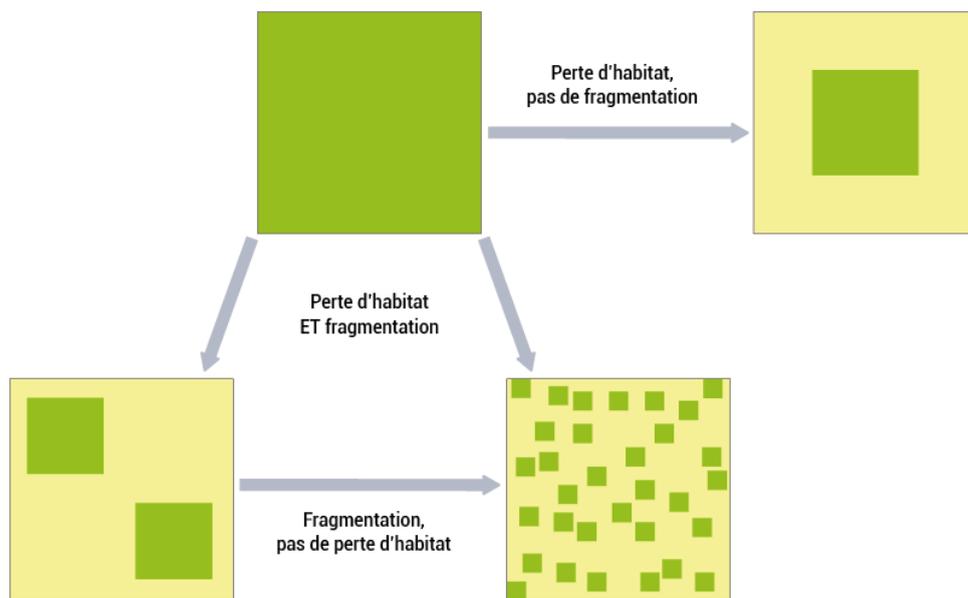
Les routes sont ainsi un facteur significatif de déclin de ses populations (Dowding *et al.*, 2010; Valerio *et al.*, 2020). Bien qu'il soit considéré comme une espèce protégée en Europe par la Convention de Berne et en France, par l'arrêté du 23 avril 2007, il n'est cependant pas officiellement considéré comme menacé. Un consensus tacite existe, basé sur de nombreux articles scientifiques, sur le fait que les hérissons semblaient menacés en Europe (y compris en France), sans que cela soit confirmé à cause d'un manque de données nationales (Defosseux, 2023).

L'engrillagement est aussi un facteur significatif dans la fragmentation des habitats. Il désigne l'opération consistant à enclore un espace (public ou privé) par un grillage formant un obstacle linéaire, constant ou non, empêchant le passage de tout ou une partie des animaux (Wikimonde). L'exemple le plus documenté de fragmentation du paysage par l'engrillagement est le cas de la Sologne.

La Sologne couvre 500 000 ha et elle se distingue par un couvert forestier étendu contenant une forte population de gibier. Cependant, une grande partie des forêts, principalement des terrains privés utilisés pour la chasse, sont cloisonnés par des grillages non conformes en matière de droit de l'environnement, de droit de l'urbanisme, ou de droit rural (Stevens & Refay, 2019). Plusieurs inventaires de clôtures ont donc été réalisés et il est

estimé qu'à minima, il y aurait 3 000 km de linéaire de clôture (Stevens & Refay, 2019). La faune ne peut pas traverser ce type de barrière, fragmentant et réduisant alors leurs habitats de façon considérable.

La fragmentation des habitats transforme une surface continue d'habitat en plusieurs fragments de taille variable, entraînant alors une diminution de la quantité totale d'habitat dans le paysage, sans que cela soit toutefois systématique (Clauzel 2022), (Figure 6).



Céline Clauzel, 2022, d'après Fahrig (2017)  
 Licence C.C. : attribution de l'auteur, usage non commercial, partage sous la même licence  
 Géoconfluences, 2022

**Figure 6 : Perte d'habitat et fragmentation, deux processus à ne pas confondre.**

Le cas de la Sologne a été très médiatisé grâce à de nombreuses associations luttant contre cet engrillagement de masse. Cela a permis d'adopter une nouvelle législation. L'article L. 372-1 du Code de l'environnement datant de 2023 vise à diminuer les effets de fragmentation écopaysagère induits par l'engrillagement excessif d'espaces naturels. Ainsi, les clôtures, devront désormais permettre « en tout temps » la libre circulation de la faune sauvage et pour cela être posées 30 cm au-dessus du sol, ne pas dépasser 1,20 mètre de hauteur, et ne pas être « vulnérante, ni constituer des pièges pour la faune » pour permettre la libre circulation de certains animaux sauvages, rétablissant ainsi les continuités écologiques, sauf exceptions qui seront définies par décret.

La documentation scientifique de l'engrillagement se limite malheureusement à ce cas précis. Il y a donc des données sur la fragmentation des habitats liée à l'engrillagement dans les milieux ruraux, mais pas dans les milieux urbains, alors que l'engrillagement est très présent dans celui-ci. Si les hérissons sont obligés de traverser les routes pour aller dans un autre jardin, c'est aussi parce qu'ils ne peuvent pas traverser les clôtures qui les séparent.

Pour lutter contre la fragmentation des habitats et ainsi améliorer la connectivité écologique en ville, les trames vertes et bleues et d'autres projets ont vu le jour.



## C) Restaurer la connectivité écologique urbaine

### 1) L'Importance de la connectivité écologique : Faciliter les mouvements de la faune urbaine

La connectivité écologique fait opposition à la fragmentation. Elle fait référence aux mouvements sans entrave de la faune et de la flore à travers l'environnement. Une connectivité écologique forte permet à certaines espèces une dispersion pour mieux se reproduire.

Les corridors sont des éléments constituant de la connectivité écologique. Ce sont des chemins linéaires trop étroits pour être un habitat, mais assez grands pour assurer des connexions entre des réservoirs de biodiversité. La création de corridors augmente la connectivité écologique et permet donc de réduire les effets de la fragmentation. Cependant, les corridors ne résolvent en rien le manque d'habitat pouvant entraîner le déclin d'une espèce (Clauzel, 2021).

Comme le souligne Clauzel (2021), la notion de connectivité écologique pourrait avoir son équivalent dans le domaine scientifique avec la notion de "réseau écologique" (*ecological network*) mais ce dernier est bien plus large. La connectivité écologique est plutôt un concept français assimilé dans le domaine politique et opérationnel. Elle se traduit par des actions concrètes sur le terrain, telles que celles mises en œuvre dans le cadre de la Trame Verte et Bleue (TVB), pour restaurer et maintenir la continuité écologique à travers le territoire.

### 2) La trame verte et bleue : Un outil clé pour la continuité écologique

Les prémices de la trame verte et bleue prennent origine au sommet de la Terre de Rio en 1992. Cette conférence a permis de mettre en place un projet de Réseau écologique paneuropéen. Ce projet permet donc de protéger la diversité biologique et paysagère en établissant des réseaux écologiques qui dépassent les frontières européennes.

Ce projet est repris en France avec la loi Grenelle I en 2009 qui est issue des travaux du Grenelle de l'Environnement de 2007. Cette loi définit l'amélioration de la trame écologique comme une des priorités de la Stratégie nationale pour améliorer la biodiversité. (Bergès, 2010). L'article 23 de cette loi indique alors que la trame verte et bleue est « un outil d'aménagement du territoire qui permettra de créer des continuités écologiques. »

La trame verte et bleue devient l'une des deux priorités environnementales du Schéma Régional d'Aménagement, de Développement Durable et d'Égalité des Territoires (SRADDET). Cela oblige alors les collectivités territoriales, par l'article L4251-3 du code général des collectivités territoriales, de prendre compte de cette nouvelle priorité nationale dans les divers documents d'urbanisme, tel que les Plans Locaux d'Urbanisme (PLU), les cartes communales ou bien des chartes des parcs naturels régionaux.

Cependant, la trame verte et bleue reste encore un concept récent et son application légale l'est d'autant plus, créant ainsi un certain manque de connaissances scientifiques pouvant servir d'aide pour des recommandations pratiques aux aménagistes (Bergès, 2010).

La trame verte et bleue se limite à des projets d'aménagement, sensibilisant alors seulement les personnes qui participent à ces projets d'aménagement. Cependant, la sensibilisation des populations vivant en milieu urbain doit être aussi d'une grande priorité afin qu'elles puissent elles-mêmes améliorer leur comportement pour la biodiversité locale.

La trame verte et bleue se doit donc d'être accompagnée par des initiatives citoyennes qui sensibilisent la population locale et accélèrent la transition écologique. Les initiatives locales réalisées par des associations sont de très bons exemples pour améliorer cela.

Un exemple concret de ce type d'initiative est le projet Piqu'en Ville, qui réalise des passages à faune dans la métropole de Caen et aux alentours. Ce projet de collaboration citoyenne permet de sensibiliser la population à la protection de la biodiversité locale en améliorant la connectivité écologique dans un contexte urbain.

### 3) Le projet Piqu'en Ville : Une initiative pour la restauration écologique

Caen, choisie comme zone d'étude pour cette recherche, est au cœur du projet Piqu'en Ville, anciennement appelé Piqu'Caen. Ce projet caennais a été créé en 2021 par l'association Groupe Mammalogique Normand (GMN), proposant alors de mettre en place un programme participatif de reconnexion des jardins et autres espaces verts en faveur de la petite faune terrestre. L'objectif principal de ce programme est donc de recréer, avec l'aide des habitants de Caen, des passages entre les propriétés privées et publiques pour permettre le déplacement de diverses espèces, dont le hérisson d'Europe. Ces passages sont soit réalisés à l'aide de pinces coupantes dans des grillages, créant alors une ouverture de 15 x 15 cm dans celui-ci, ou bien au pied des murs (briques, agglos, béton ou pierre de Caen) à l'aide d'une carotteuse avec une ouverture de 15 cm de diamètre (Fig 7). Cette taille d'ouverture permet au hérisson, ainsi qu'aux petits mammifères, de traverser ces barrières normalement infranchissables.



Figure 7 : Passages créés dans un grillage à gauche et dans un mur en pierre de Caen à droite pour le projet Piqu'Caen.

Source : GMN

L'utilisation du hérisson pour ce projet est doublement bénéfique. Premièrement et comme expliqué auparavant, l'image du hérisson est positive dans l'imaginaire collectif, ce qui permet de favoriser un accord avec les habitants pour participer à ce projet afin de réaliser des trous dans leurs grillages. Une fois le passage créé, la continuité du réseau écologique du hérisson est améliorée, mais par son caractère d'espèce parapluie, le deuxième bénéfice est donc l'amélioration des réseaux écologiques sous-jacents des petits mammifères présents en ville.

Ce projet permet également de faire un suivi des passages des hérissons grâce à des pièges photos. Cela permet de vérifier la fonctionnalité de ces passages, rassurant les jardins participants en voyant qu'il y a eu un passage de hérisson dans leur propre jardin.

Au total, ce sont 40 passages suivis à Caen entre 2022 et 2024, dont 31 qui ont montré une fréquentation du hérisson d'Europe, dont une femelle accompagnée de ses deux petits choupissons (Figure 8). Ces pièges photos montrent aussi une fréquentation de ces passages par d'autres petits mammifères, prouvant le bénéfice du caractère d'espèce parapluie du hérisson. Ces passages sont donc utilisés par des fouines, des martres des pins, des rats surmulots, des musaraignes, ainsi que des mulots.



*Figure 8 : Choupisson empruntant un passage de Piqu'Caen. Image issue du suivi par piège photographique*

**Source : Chaîne youtube de piquenville**

La collectivité de Caen a inscrit dans son Plan Local d'Urbanisme (PLU) de 2018 que la conception des clôtures en limite séparative « doit permettre le passage d'animaux terrestres de petite taille (hérissons, fouines...). Dans le cas de murs de clôture de pierre, ces derniers doivent être, si possible, préservés et mis en valeur. Toutefois, ils peuvent être réduits en hauteur pour permettre d'offrir des vues vers des cœurs d'îlot ou sur des perspectives, ou partiellement démolis pour créer un accès ». Cette réglementation est aussi utilisée par ce projet en tant qu'énième argument pour encourager les particuliers à réaliser des passages dans leur propriété.

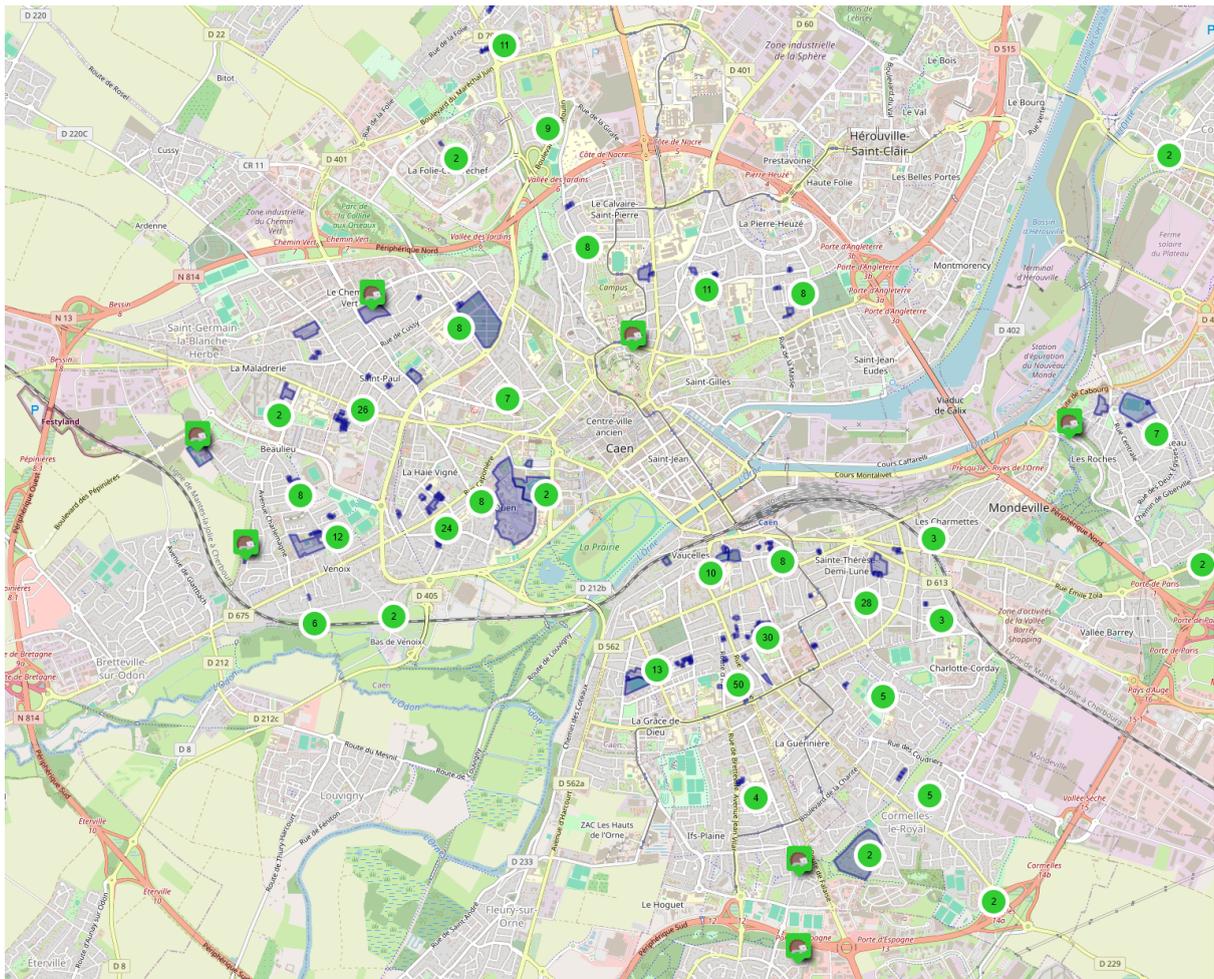
Le projet de Piqu'Caen est inspiré du projet Hedgehog Street, un projet d'envergure nationale au Royaume-Uni. Hedgehog Street a été lancé en 2011 par deux organisations charitables, British Hedgehog Preservation Society (BHPS) et People's Trust for Endangered Species (PTES) en réponse au déclin du hérisson en Angleterre. Ils sont à l'origine du travail participatif permettant la création de routes à hérisson dans les barrières pour connecter les jardins. En 2022, il y avait plus de 100 000 "champions du hérisson", nom donné aux participants de ce projet. (Wembridge, 2022)

Hedgehog Street est d'envergure nationale puisqu'il fait partie du regroupement d'organisations de protection de la nature, travaillant ensemble dans le projet "*Species Champion Project*" (Projet champion des espèces). Ce projet associe des membres du Parlement anglais à une espèce liée à une association de protection de la nature pour qu'ils puissent la défendre au Parlement. En 2017, le champion de l'espèce du hérisson était le secrétaire d'État aux transports, Chris Grayling. (Hedgehog Street)

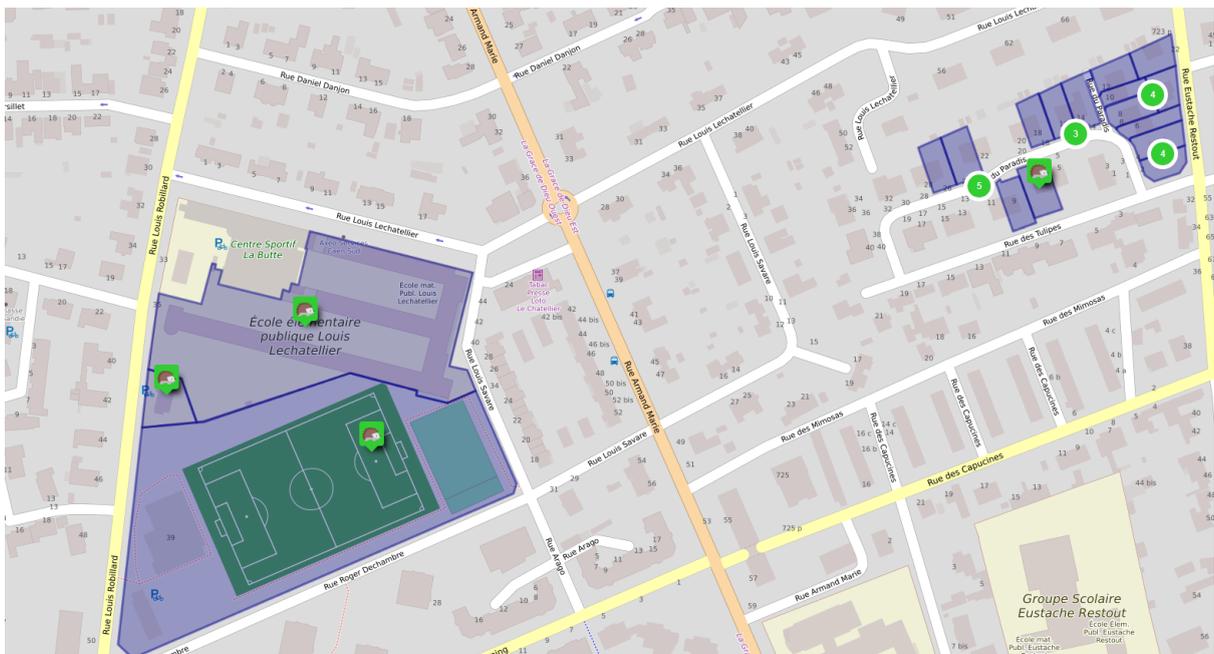
Le projet Hedgehog Street prenant de l'ampleur et étant très populaire, il a traversé la Manche, atteignant alors la Normandie et les oreilles des membres du GMN, créant alors leur propre projet, Piqu'Caen.

Ce projet normand, dirigé par Nicolas Klatka (chargé de mission mobilisation citoyenne au GMN), s'est aussi bien développé depuis 2021, en s'étendant dans d'autres villes normandes, ce qui l'a amené à se renommer "Piqu'en Ville." Le bilan de ce projet en 2024 est de 491 propriétés privées et publiques participantes, plus de 262 passages créés, 329 jardins et espaces publics "connectés". (Piqu'en Ville, 2024)

Une carte interactive est mise en place pour suivre l'évolution du projet à travers le temps (Figure 9), ainsi que pour voir les agencements de maison reliés entre elles par les passages créés (Figure 10).



**Figure 9 : Carte de l'évolution du programme Piqu'en ville, pour la ville de Caen**



**Figure 10 : Maisons d'un quartier reliées entre elles par les passages à hérisson créés par le projet Piqu'en ville.**

#### **4) Optimisation du réseau écologique pour le hérisson à Caen : Problématiques et objectifs**

L'urbanisation a détruit et fragmenté les milieux naturels depuis des années en s'élargissant toujours plus loin. Cependant, dans un contexte d'urgence face à la crise écologique actuelle, la transition écologique pousse divers acteurs à changer les systèmes urbains en essayant de renaturer ces espaces. L'amélioration de la connectivité écologique dans les paysages urbains est devenue un objectif capital. La méthode la plus répandue pour atteindre cet objectif est l'amélioration des réseaux écologiques, garantissant ainsi des corridors entre habitats essentiels pour la faune et la flore.

Les initiatives opérationnelles, qu'elles passent par la trame verte et bleue, le projet Hedgehog Street au Royaume-Uni, ou encore par le programme "Piqu'en Ville" à Caen, répondent toutes à cet objectif en créant et en rétablissant des corridors afin d'améliorer les réseaux écologiques de la faune en ville et limite la fragmentation des habitats.

Cependant, Hedgehog Street et Piqu'en Ville prennent en compte l'engrillagement comme facteur majeur de la fragmentation des habitats du hérisson en milieu urbain. Les barrières qui cloisonnent les jardins de particuliers ainsi que d'autres milieux naturels sont des obstacles impossibles à franchir, entravant alors le déplacement de la faune, dont celui du hérisson.

Le hérisson, par son vaste domaine vital, son rôle d'espèce parapluie, son capital sympathie et sa présence fréquente en milieu urbain font de lui une espèce parfaite à étudier pour évaluer la fragmentation du paysage urbain.

Pour limiter la fragmentation et améliorer le réseau écologique du hérisson en milieu urbain, la meilleure méthode est la création de passages à faune dans les barrières, permettant alors d'augmenter à la fois ses déplacements et les accès à de nouveaux habitats. Cela lui permet alors d'éviter d'emprunter les routes qui lui sont mortelles, en empruntant d'autres corridors nouvellement créés.

Cependant, les jardins et les espaces verts sont nombreux à Caen, tout comme les barrières qui les cloisonnent. Les grillages, les murs, les clôtures, les portails, sont des éléments qui composent le milieu urbain. Leur nombre est considérable et cela peut poser un problème pour la création de passages à faune. En effet, tous les passages créés n'ont pas le même niveau de connectivité, alors face aux nombres de passages potentiels, il serait préférable d'identifier la localisation optimale des passages à hérissons dans la ville de Caen afin d'optimiser son réseau écologique en milieu urbain. La problématique centrale de ce mémoire est ainsi formulée : **Comment déterminer la localisation optimale des passages à hérissons dans la ville de Caen ?**

Pour résoudre cette problématique, il convient de mettre en place une démarche méthodologique se structurant en 3 étapes.

- 1) Établir une cartographie fine de l'occupation du sol à Caen en y intégrant les barrières.
- 2) Modéliser le déplacement du hérisson à l'aide de la théorie des graphes
- 3) Localiser les passages potentiels de manière à optimiser l'ensemble du réseau écologique.



# MÉTHODOLOGIE

## A) Construction de la carte du paysage urbain de Caen

Diverses étapes ont permis d'obtenir une première modélisation du réseau écologique du hérisson à Caen. Pour ce faire, il a fallu utiliser le logiciel de modélisation spatiale Graphab qui permet de modéliser les réseaux écologiques à partir de la théorie des graphes. De plus, c'est le seul outil intégré réunissant à la fois la construction et la visualisation des graphes, les analyses de connectivité ainsi que les liens avec des données externes (Site de Graphab). Ainsi, avant de pouvoir s'intéresser pleinement à la construction d'un premier modèle, il a été nécessaire de procéder à la création d'une carte du paysage qui a été importée par la suite dans Graphab.

Avant d'aller plus loin, il convient d'abord de préciser que la cartographie du paysage qui a été créée correspond aux éléments paysagers importants pour l'écologie de l'espèce spécifiquement étudiée ici : *Erinaceus europaeus*, le Hérisson d'Europe. Les éléments mis en avant dans la constitution de la carte de paysage lui sont ainsi particuliers et ne peuvent prétendre à la réalisation d'une carte paysagère universelle, pour peu que cela soit d'ailleurs possible.

Ainsi, à l'aide du logiciel de géomatique QGIS, ont été rassemblés un ensemble de ces éléments essentiels à la compréhension de l'écologie du hérisson à partir de différents jeux de données disponibles qui seront expliqués plus en détail. Ces différentes données ont subi un prétraitement puis ont été rasterisées de manière à pouvoir ensuite les superposer.

## **1) Sources et collecte des données spatiales : Contribution de l'AUCAME**

Les données utilisées pour la création de la carte du paysage proviennent principalement de l'Agence d'Urbanisme de Caen Normandie Métropole (AUCAME), « un organisme parapublic, doté de la personnalité morale, financé conjointement par des collectivités locales et le Ministère chargé de l'urbanisme, en vue de réaliser des études d'urbanisme, d'aménagement et de développement territorial » (AUCAME, 2020). L'AUCAME est ainsi une agence parapublique majeure de la région caennaise, contribuant à la réalisation de nombreux documents d'urbanismes et mettant à disposition un grand nombre de ses données au grand public.

### **1.1) Analyse du mode d'occupation des sols : Un pilier pour la cartographie du paysage urbain**

Le premier jeu de données qui a été utilisé, provenant de l'AUCAME, est le MOS (Mode d'Occupation du Sol) de Caen Normandie métropole datant de 2020. Il s'agit des données les plus récentes à la date de ce mémoire. Le MOS est une base de données géospatiale détaillant les catégories d'utilisation des sols.

Parmi les données du MOS 2020 de la métropole caennaise, les catégories de surface ont été remobilisées en fonction de leur bâti, de la surface en eau, de la présence ou non de grandes cultures, ainsi que de la perméabilité des sols et de la présence de routes.

#### **Définitions des différentes occupations des sols utilisées (AUCAME, 2018) :**

##### **Bâti :**

Les surfaces bâties sont des surfaces artificialisées et imperméables. L'occupation des sols bâtis est destinée à abriter ou loger des personnes, des animaux, du matériel, des marchandises. Ces zones regroupent uniquement des constructions à caractère permanent, recouvertes d'un toit.

**Non-bâti :**

Les surfaces non bâties sont des surfaces artificialisées et imperméables. L'occupation du sol représente les terrains rendus imperméables par un revêtement artificiel asphalté, bétonné, bâché, couvert de pavés ou de dalles.

**Surfaces perméables :**

Les surfaces perméables sont des surfaces artificialisées. L'occupation du sol de ces surfaces représente les terrains stabilisés et compactés, partiellement ou totalement perméables et recouverts de matériaux minéraux (pierres, terre, graviers, enrochement...).

**Surfaces en eau :**

Les surfaces en eau sont des surfaces naturelles sans végétation. L'occupation du sol de ces surfaces représente les voies d'eau de rivières, fleuves, canaux, ainsi que maritimes.

**Grandes cultures :**

Les grandes cultures sont des surfaces végétales anthropiques.. L'occupation du sol des grandes cultures représente la surface de terre qui est labourée ou cultivée. Les terres arables, donc labourées, comprennent les terrains en jachère, les grandes cultures, les cultures céréalières.

**Routes :**

Les routes sont des infrastructures de déplacement. Il s'agit de tout le réseau routier d'une largeur supérieure à 5 mètres permettant le transport de véhicules motorisés. Les espaces associés à l'infrastructure routière sont intégrés à cette occupation du sol (bord de route, pelouse de rond-point ou d'échangeurs autoroutiers).

**1.2) Utilisation de la sous-trame agricole extensive pour identifier les habitats propices aux hérissons**

Le deuxième jeu de données qui a été utilisé pour la création de la carte du paysage provient également de l'AUCAME. Il s'agit des données de la trame verte et bleue de Caen Métropole. Plus précisément, c'étaient les données datant des sous-trames ayant contribué à l'élaboration de la trame verte et bleue, datant aussi de 2020. Ces sous-trames sont constituées

de réservoirs de biodiversité, de corridors et de secteurs fréquentés et traversés par les espèces caractéristiques de chacune d'entre elles (AUCAME, 2020).

Parmi les différentes sous-trames réalisées par l'AUCAME, c'est la sous-trame des milieux agricoles extensifs qui a été utilisée, en complément du MOS. Cette sous-trame comporte les différentes surfaces en herbe du MOS, ainsi que des différents linéaires de haies présents dans Caen-Métropole (Figure 11). Cela en fait donc la sous-trame la plus représentative des environnements propices aux hérissons.

Cette sous-trame est catégorisée en quatre types de milieu: Structurants, Attractifs, Peu fréquentés et Répulsifs pour les micro-mammifères. (Figure 12)

#### **Définitions des nouvelles occupations des sols utilisées :**

**Structurants** : Les milieux structurants incluent les éléments de l'occupation du sol qui participent le plus à la définition de la sous-trame. Lors de l'élaboration de cette sous-trame, ce sont les prairies et les haies qui sont principalement prises en compte par l'AUCAME. Les milieux structurants sont donc des réservoirs de population pour les invertébrés, les petits mammifères, et les oiseaux.

**Attractifs** : milieux favorables à la présence d'espèces, avec une perméabilité de déplacement forte.

**Peu fréquentés** : milieux peu favorables à la présence d'espèces, perméabilité faible, milieux anthropisés.

**Répulsifs** : milieux non fréquentés par les espèces cibles de cette sous-trame, obstacle aux déplacements.

Cette sous-trame a donc permis d'obtenir des éléments sur les habitats potentiels du hérisson. En effet, les milieux structurants sont majoritairement des prairies permanentes, ainsi que des grandes zones riches en biodiversité telles que les jardins botaniques et les parcs. Les milieux attractifs, quant à eux, correspondent majoritairement aux haies bocagères et aux jardins des particuliers dans l'aire urbaine de Caen. Ce sont ces quatre catégories qui ont été utilisées comme occupation du sol lors de la création de la carte paysagère. Ce deuxième jeu de données complète donc les occupations du sol du MOS de l'AUCAME avec quatre nouvelles occupations du sol.

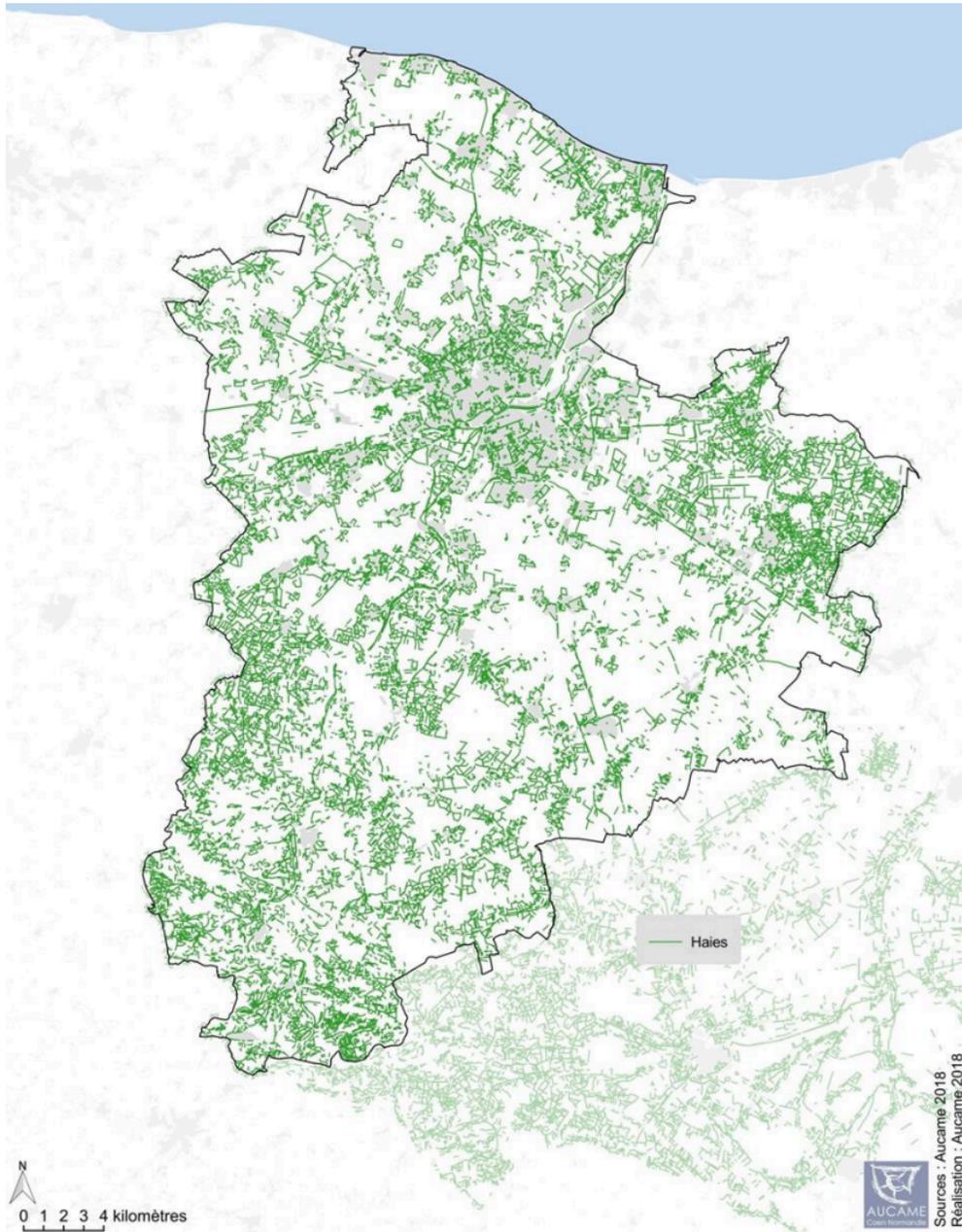


Figure 11 : Carte des haies de Caen-métropole

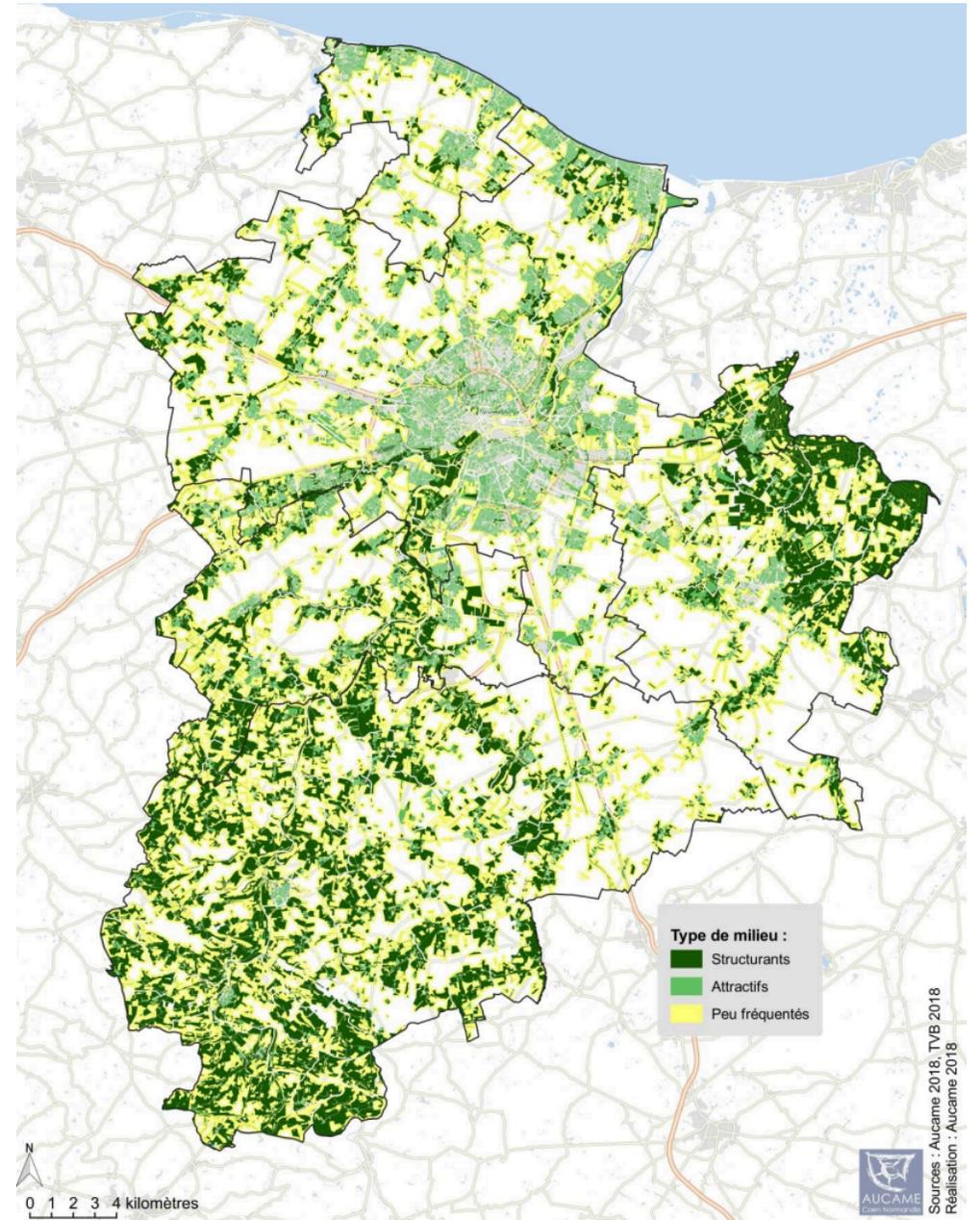


Figure 12 : Carte de la Sous-Trame agricole extensive

## **2) Lacunes des données sur les barrières : Un défi pour la modélisation de la fragmentation urbaine**

Le cœur de la réflexion de ce mémoire est que l'habitat urbain du hérisson souffre de sa fragmentation. En cela, les données de l'AUCAME ont déjà pu recenser un certain nombre d'obstacles contribuant à cette fragmentation : espaces bâtis, réseaux routiers, espaces en eaux.

À ce stade, il manque cependant des données sur les obstacles majeurs au déplacement du hérisson : les barrières, clôtures et murs. Il n'existe pas de données qui recensent les emplacements de ces types de barrières. Comme expliqué dans l'introduction, ces données sont pourtant primordiales et pas assez exploitées pour une analyse précise sur la fragmentation des habitats. C'est pour cette raison qu'il est important de les prendre en compte dans cette étude et de les intégrer lors de la création de la carte du paysage. À défaut de pouvoir mobiliser des données préexistantes, une manière d'estimer leur probabilité d'occurrence a dû être trouvée.

## B) Collecte et classification des données sur les barrières pour créer un modèle prédictif

Dans un premier temps, avant même de devoir commencer quelconque traitement informatique dans le but d'obtenir ces données de recensement de barrières, il a été nécessaire de se poser la question suivante : **Quels sont les objectifs nécessaires pour obtenir des données précises sur l'emplacement et la classification des barrières ?**

Le premier objectif était de connaître l'emplacement de l'ensemble des barrières de la zone d'étude. Cela a permis, lors de la modélisation du réseau écologique de l'espèce étudiée, de prendre en compte ses manœuvres d'évitement dans ses déplacements en milieu urbain. Dans le cas où les barrières ne sont pas intégrées dans la modélisation, un hérisson pourrait traverser en ligne droite l'ensemble des jardins d'un quartier. Malheureusement pour eux, les hérissons ne possèdent pas encore la capacité de traverser les murs.

Cependant, il convient de préciser que les manœuvres d'évitements sont différentes en fonction du type de barrière rencontrée. Un hérisson est dans l'obligation de contourner un mur devant lui, mais en revanche, il a plus de facilité à trouver un trou dans un grillage ou dans une haie.

Le second objectif a donc été de classer les barrières en fonction de leur type afin d'intégrer l'aspect de perméabilité aux déplacements. Cette perméabilité a été un facteur supplémentaire dans l'augmentation de précision de la modélisation du réseau écologique.

La résolution de ces objectifs a permis d'ajouter des données sur les barrières lors de la création de la carte du paysage. Ces données ont été séparées en différentes couches, chacune correspondant à une classe de type de barrière. Cela a permis, lors de la modélisation du réseau écologique, de prendre en compte la perméabilité des barrières en attribuant une valeur de résistance/coût à franchir à chacune des couches.

## 1) Pré-traitement des données sur les barrières à l'aide de QGIS

La création de ces données a exigé divers traitements informatiques, utilisant divers logiciels tels que le logiciel de SIG (Système d'Information Géographique) QGIS, le logiciel Graphab ainsi que le logiciel de programmation R. Cette méthodologie a nécessité en premier lieu, un pré-traitement de données sur le logiciel de SIG QGIS.

### 1.1) Identification des emplacements des barrières à partir des données cadastrales

#### a) Utilisation du plan cadastral pour délimiter les emplacements potentiels des barrières

Le premier objectif étant l'identification des emplacements de l'ensemble des barrières, la première question à se poser a été : **Existe-t-il des emplacements spécifiques des barrières ?**

L'humain a pris l'habitude de placer des barrières pour délimiter ses possessions, et donc ses propres terrains. À défaut d'avoir accès à des données de recensement de barrières, existent t-il des données accessibles sur la délimitation des terrains ?

Il existe bien une donnée accessible en libre service sur la délimitation des terrains, celle du plan cadastral. De par son centralisme politique et administratif historique, le territoire français dispose de cadastres parcellaires depuis l'ère napoléonienne. Depuis le cadastre de 1807, les parcelles du territoire français sont ainsi largement documentées et nous offrent une description précise de leur structure. Les données du cadastre pour la ville de Caen ont pu être mobilisées, de manière à identifier la délimitation des terrains.

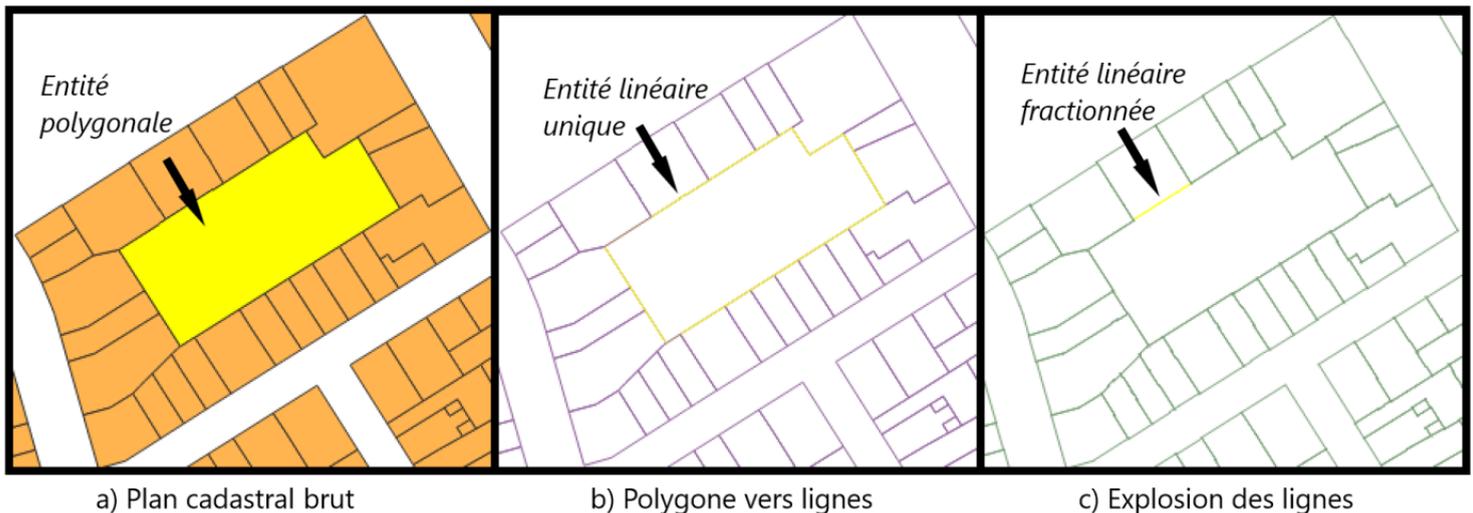
#### b) Transformation des parcelles cadastrales en lignes pour l'analyse des barrières

Dans un premier temps, les entités des parcelles cadastrales ont subi un changement. En effet, une parcelle est considérée comme une entité entière et représente donc la surface de cette parcelle. C'est une entité dite polygonale (Figure 13.a). Le but n'était pas de travailler sur la surface, mais de travailler sur les bordures des parcelles.

L'outil "polygone vers lignes" de QGIS a été utilisé pour convertir les parcelles polygonales en lignes (Figure 13.b). Ce premier traitement a enlevé le caractère plein pour que les bordures deviennent des entités linéaires uniques.

Une ligne de cadastre doit correspondre à une arête unique composant la face d'une parcelle cadastrale. C'est pour cette raison qu'il a fallu fragmenter l'entité linéaire unique en différentes arêtes.

L'outil "exploder les lignes" de QGIS a permis de réaliser cette fragmentation (Figure 13.c). Cet outil remplace chaque ligne par un ensemble de lignes représentant les segments de la ligne d'origine. Cette étape a permis de créer 637 000 entités linéaires dans la zone d'étude.



**Figure 13 : Étapes permettant la création de lignes appartenant au plan cadastral.**

*Source : Etienne Valognes*

Chaque arête, donc chaque ligne du plan cadastral qui a été créée, correspond à l'emplacement d'une potentielle barrière. L'étape de fragmentation a permis de travailler et d'analyser chaque barrière indépendamment des autres et a donc permis de pouvoir les classer en différents types de barrières. Cela représente une réalité de terrain puisqu'un particulier peut utiliser différents types de barrière pour délimiter son terrain avec celui de ses différents voisins. Il peut par exemple avoir une haie comme séparation pour l'un de ses voisins et un mur pour un autre.

## 1.2) Réduction de l'ensemble des barrières potentielles : Application d'un échantillonnage aléatoire stratifié

### a) Sélection de la méthode d'échantillonnage aléatoire stratifié

Au vu du nombre de lignes du plan cadastral créées, il était impossible d'observer et d'analyser l'ensemble de ces lignes individuellement. Il a donc été nécessaire de réaliser un échantillonnage des lignes du plan cadastral représentatif de l'ensemble de ces lignes.

Il existe plusieurs méthodes d'échantillonnage ; la méthode probabiliste et la méthode empirique. Pour l'obtention de résultat représentatif, la méthode probabiliste d'un échantillonnage aléatoire a été préférentiellement choisie. Il existe aussi diverses façons de procéder à un échantillonnage aléatoire. (Figure 14)

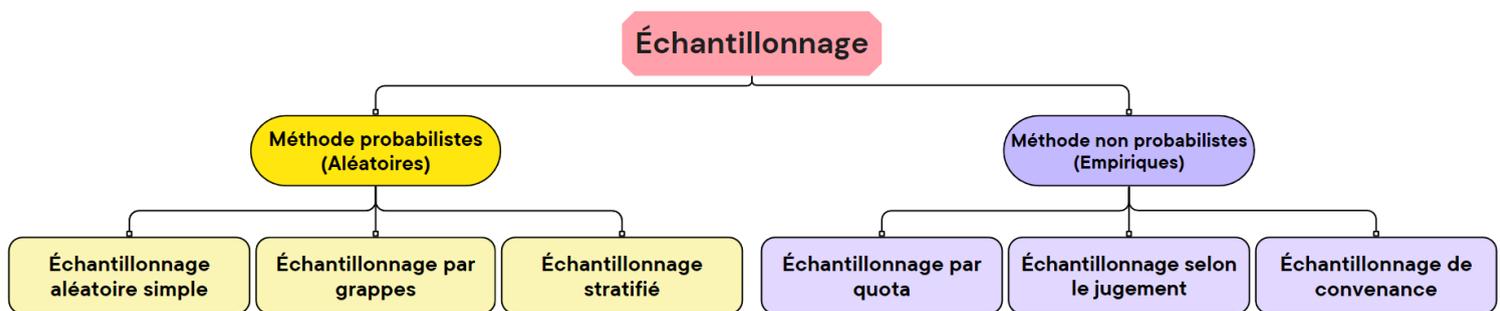


Figure 14 : Schéma explicatif des différentes méthodes d'échantillonnage.

Source: Etienne Valognes

L'objectif étant de réaliser une classification des lignes du plan cadastral, il a fallu réfléchir à la répartition des lignes du plan cadastral dans notre zone d'étude avant de choisir la méthode d'échantillonnage aléatoire.

La zone d'étude comprend la ville de Caen dans son intégralité. Caen étant une métropole, sa composition urbanistique est donc variée. La ville possède des formes urbaines différentes. Le centre-ville est majoritairement composé de grands bâtiments, avec très peu de jardins. Le tissu pavillonnaire est une forme urbaine qu'il est possible de retrouver en s'éloignant du centre ville. Dans ces quartiers pavillonnaires, les jardins se font plus nombreux et les bâtiments d'habitation sont plus petits et plus espacés. En s'éloignant davantage, il est possible de trouver les tissus d'activités.

Les types de barrières sont liés aux formes urbaines. Il est donc évident que le type de barrières “Mur” est surreprésenté dans un centre-ville puisque c’est ce type de barrière qui est utilisé pour séparer chaque bâtiment entre eux. C’est différent dans un quartier pavillonnaire, où les haies et les grillages vont permettre de séparer son jardin de celui de son voisin.

Les types de barrières n’étant pas également répartis au sein de la zone d’étude, il n’était donc pas raisonnable de réaliser un échantillonnage aléatoire simple. Pour que l’échantillonnage soit représentatif de l’ensemble des lignes du plan cadastral, il a fallu réaliser un échantillonnage aléatoire stratifié sur la base de critères géographiques.

Une ville est subdivisée en une multitude de quartiers. Un quartier, en tant qu’ensemble urbain avec des caractéristiques spécifiques ou une certaine homogénéité, présente donc une variation limitée des différents tissus urbains. L’utilisation des quartiers comme strate a permis de pallier le manque d’homogénéité d’un échantillonnage aléatoire simple.

Les vingt quartiers de la ville de Caen correspondent aux différentes strates qui ont été utilisées pour l’échantillonnage. Au sein de chaque strate, donc de chaque quartier, un échantillonnage aléatoire a été réalisé. Il a fallu à la fois obtenir un nombre d’échantillons assez important pour que ce soit représentatif de l’ensemble des lignes du plan cadastral tout en prenant compte de la durée limitée de cette étude pour réaliser cette observation. C’est pour ces raisons, que le nombre d’échantillons à observer par strate, donc par quartier, a été défini à 50 échantillons, soit un total de 1000 échantillons.

La délimitation des quartiers de Caen n’est pas une donnée existante possible à importer dans le logiciel de SIG QGIS. Il a donc fallu créer cette donnée.

## b) Création de la carte de répartition des quartiers de Caen dans QGIS

La création de la carte de répartition des quartiers de Caen a été faite sur le logiciel QGIS. Pour aider à la réalisation de cette carte, il a fallu dans un premier temps, utiliser un modèle comme exemple. À disposition, il y a différentes cartes de répartition représentant les différents quartiers de Caen. La carte de Ursutraide de 2017 a été choisie pour être le modèle à reproduire.

En second lieu, dans le logiciel QGIS, il a fallu importer un fond de carte OpenStreetMap afin de distinguer en détail, les routes et autres éléments formant le tracé des différents quartiers de Caen.

Pour délimiter un quartier, une nouvelle couche Shapefile a été créée, puis nommée par le nom du quartier à délimiter. Les polygones ont été choisis comme type de géométrie pour créer la délimitation des quartiers (Figure 16.a). Une fois cette nouvelle couche sélectionnée, il a fallu basculer en mode édition afin d'utiliser l'outil "Ajouter une entité polygonale". Les différentes entités - quartiers - ont donc été manuellement délimitées.

# Quartiers de Caen

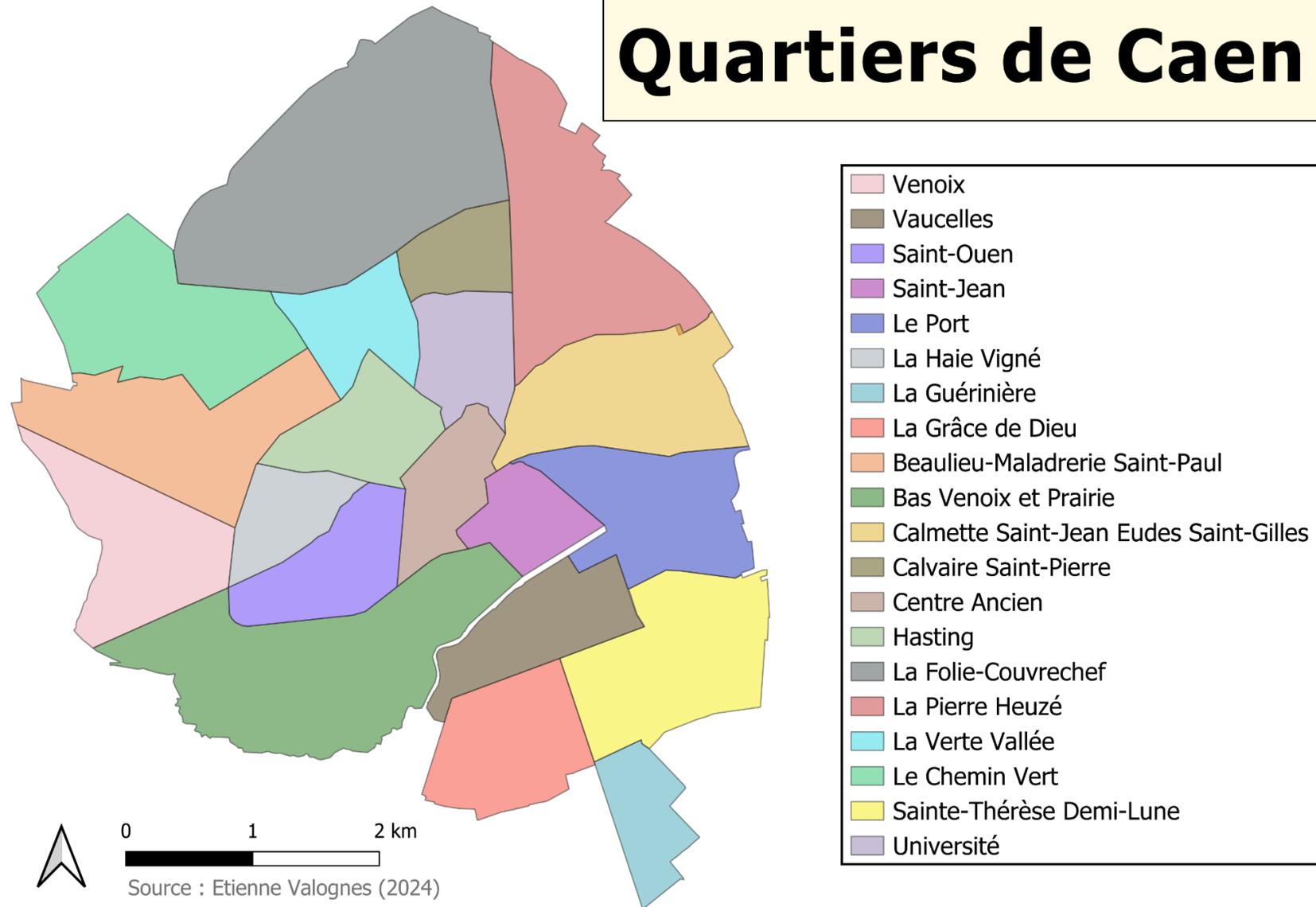
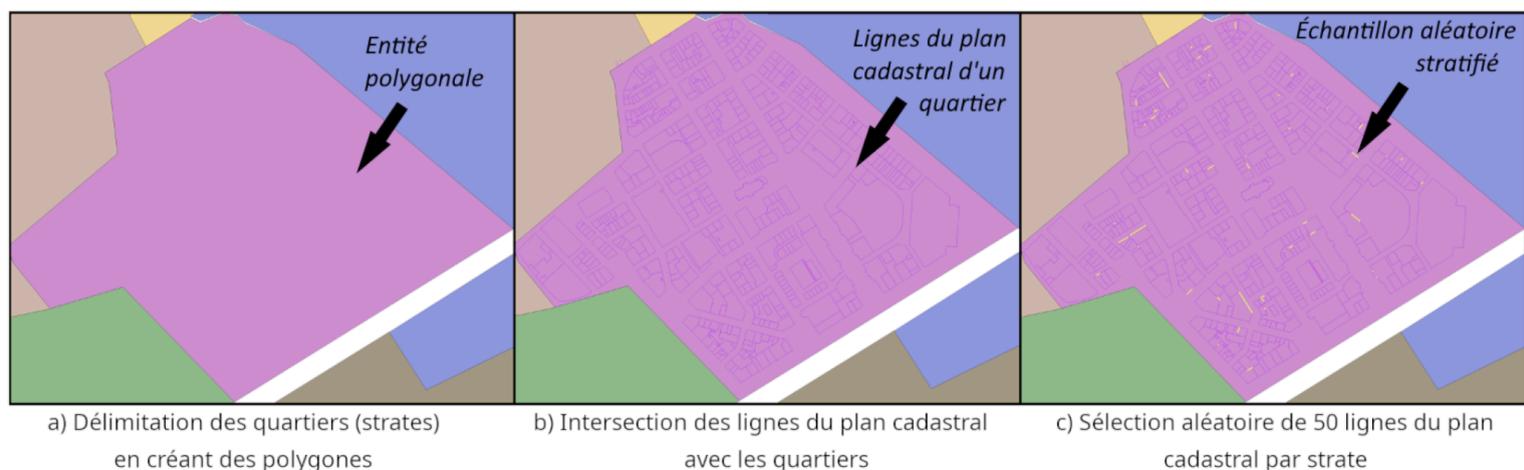


Figure 15 : Carte des quartiers de Caen réalisée sur QGIS

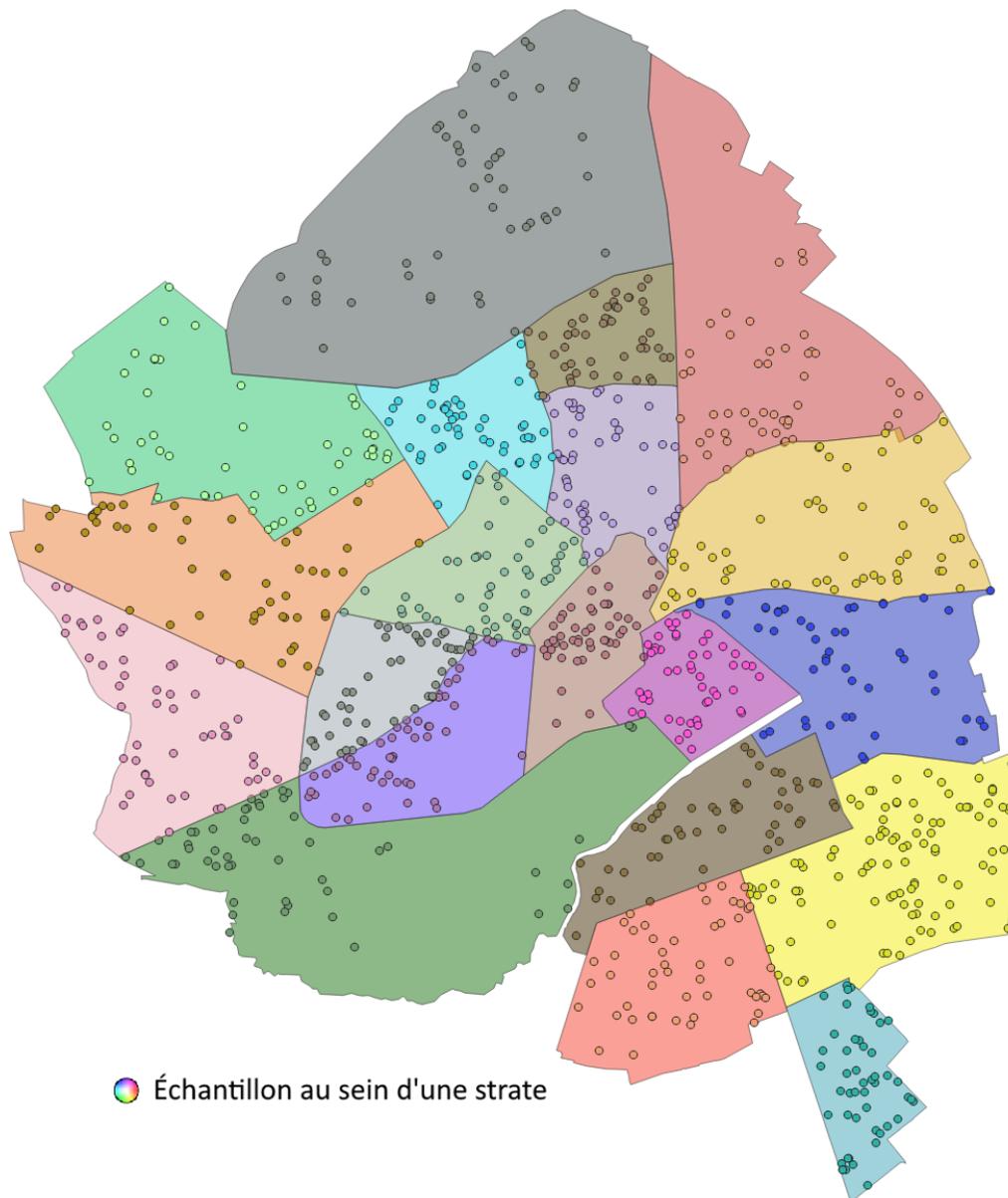
### c) Mise en œuvre de l'échantillonnage aléatoire des lignes cadastrales par quartier

Les différentes strates ont donc été délimitées et créées. L'étape suivante a été de faire un échantillonnage aléatoire de 50 lignes du plan cadastral dans chacune de ces strates. Pour commencer, l'outil "intersection", a été utilisé avec en couche d'entrée, l'ensemble des lignes du plan cadastral créé auparavant et en couche de superposition, la couche polygonale d'un quartier. Cette étape a permis de sélectionner l'ensemble des lignes du plan cadastral se trouvant uniquement au sein du périmètre du quartier choisi (Figure 16.b). Cette étape a été répétée pour chacun des quartiers, en n'oubliant pas la renommation des couches intersectées en "Ligne du plan cadastral [nom du quartier]".

Il a fallu ensuite utiliser l'outil "Sélection aléatoire" pour chacune des intersections créées à l'étape précédente et indiquer le nombre d'entités à sélectionner. Pour cet échantillonnage il s'agissait de 50 entités à sélectionner (Figure 16.c). Après avoir réalisé la sélection aléatoire, les entités aléatoirement sélectionnées ont été exportées en format Shapefile en les nommant "Échantillonnage [nom du quartier]".



**Figure 16 : Étapes de l'échantillonnage aléatoire stratifié**



**Figure 17 : Répartition des 1000 échantillons au sein de leur strate**

*Source : Etienne Valognes*

La réalisation des différentes étapes expliquées précédemment a permis l’aboutissement de l’échantillonnage aléatoire stratifié. Les échantillons ont été regroupés en un seul ensemble pour faciliter les prochains traitements nécessaires pour cette étude. L’outil “Fusionner des couches vecteurs” a permis de regrouper tous les échantillons en mettant en couche d’entrée l’ensemble des échantillonnages par quartiers. La couche de fusion a été renommée “Ensemble des échantillons”

### **1.3) Validation de l'exactitude des lignes cadastrales par observation sur le terrain**

Une observation de terrain a été nécessaire pour confirmer que l'emplacement des lignes du plan cadastral correspondait bien à celui des barrières. Une observation représentative de l'ensemble des lignes du plan cadastral a été réalisée en observant les lignes de l'échantillon qui ont été créées.

Avant de procéder à cette observation, il a fallu mettre en forme le tableau de données qui a été utilisé et complété durant la phase d'observation. Ce tableau de données est la table attributaire de la couche fusion de l'ensemble des échantillons. Quelles informations ont été importées lors des observations ?

Tout d'abord, il a été mentionné si les échantillons ont été observables ou non. Cette information a permis de connaître le nombre d'échantillons exploitables. Avant l'observation, il n'était pas certain qu'il serait possible d'observer chaque ligne du plan cadastral en raison de divers obstacles pouvant être présents entre l'observateur et la ligne du plan cadastral, rendant certaines données non exploitables. Une colonne nommée "Observable" a donc été ajoutée à la table attributaire et complétée par 'oui' ou 'non' en fonction de ces critères.

De plus, une colonne "Présence" a été ajoutée à la table attributaire pour indiquer par "oui" ou "non" si la ligne du plan cadastral correspondait bien à la présence d'une barrière. Cela a permis d'analyser le ratio de présence de barrières sur le plan cadastral et de valider ou non cette méthodologie.

L'objectif secondaire de l'observation a été de catégoriser les différents types de barrières de l'ensemble de l'échantillonnage. Le type de barrière est une donnée qui ne peut être attribuée que par une observation. La catégorisation de l'échantillonnage a permis d'entraîner un modèle statistique prédictif dans le but de classer, dans un second temps, l'ensemble des lignes du plan cadastral de la zone d'étude. La catégorisation des différents types de barrières observées a été inscrite dans la table attributaire, dans une nouvelle colonne nommée "Type de barrière".

#### **1.4) Analyse de l'influence de l'environnement sur le type de barrières**

Comme expliqué précédemment, la catégorisation des différents types de barrières lors de l'observation a permis la classification de l'ensemble des barrières de la zone d'étude grâce à un modèle statistique prédictif. Cependant, le modèle statistique prédictif a nécessité une variable dépendante (ou réponse) et plusieurs variables explicatives. La classification des types de barrières correspond donc à la variable dépendante.

Les variables explicatives qui ont été intégrées au modèle sont l'environnement ambiant autour de chaque barrière. Par exemple, une ligne du plan cadastral se trouvant entourée de jardins, a plus de chance d'être une barrière de type grillage ou haie qu'un mur. De même, une ligne du plan cadastral se trouvant au milieu d'un bâti, est probablement un mur. Le périmètre environnant de la barrière est donc une variable à ne pas négliger.

Afin d'analyser le milieu ambiant d'où se trouvent les barrières, les différentes occupations du sol ont été utilisées. Ces occupations du sol sont représentatives de l'environnement des barrières. Cette étape a permis d'apporter des données sur la répartition de surface des différentes occupations du sol, dans un rayon de 10 m autour de chaque barrière de l'échantillon.

##### **a) Délimitation des zones tampon autour des barrières**

Pour obtenir cette donnée, il a d'abord fallu créer des centroïdes pour chaque barrière de l'échantillon, afin d'obtenir le placement exact du centre de l'aire d'étude. Pour la création des centroïdes, l'outil "Centroïdes" a été utilisé sur la couche fusionnée de l'ensemble des échantillons.

Ensuite, pour définir la zone d'étude des environnements des barrières, l'outil "Tampon" a été utilisé sur la couche des centroïdes pour créer des disques ayant pour centre, les centroïdes. La distance du rayon des disques créés a été définie à 10 m. L'aire d'un disque de rayons  $R$  est égale à :  $\pi \times R^2$ . La surface des tampons qui ont été créés est donc égale à  $3.14 \times 10^2 = 314 \text{ m}^2$ . Cependant, les disques créés par QGIS ne sont pas parfaits, ce qui fait descendre l'aire totale des disques à  $309 \text{ m}^2$ . À la fin de cette étape, un tampon de  $309 \text{ m}^2$  de surface a donc été généré autour de chacune des barrières.

## b) Hiérarchisation des occupations du sol pour une analyse précise

L'objectif était de calculer la surface de chaque occupation du sol se trouvant dans la zone du tampon mais deux occupations du sol peuvent être en superposition l'une de l'autre. Lors du calcul des différentes surfaces d'occupation du sol, les surfaces superposées vont être doublées lors du calcul. Dans ce cas-là il aurait été possible d'obtenir une valeur de surface supérieure à la surface totale des tampons créés.

Pour ne pas rencontrer le problème des superpositions, il a fallu dans un premier temps hiérarchiser l'ordre des différentes couches d'occupation du sol. La hiérarchisation a permis de créer un ordre de priorité au sein des couches. Voici l'ordre qui a été établi, allant de la moins prioritaire à la plus prioritaire : Grande culture < Non bâti < Surfaces perméables < Routes < Répulsif < Attractif < structurant < Bâti < Surface en eau.

Pour résoudre le problème de superposition, l'outil "Différence" a été utilisé sur chaque couche, en suivant cet ordre de priorité. Cet algorithme extrait les entités de la couche source qui sont à l'extérieur, ou chevauchent partiellement, les entités de la couche de superposition. Les entités de la couche source qui chevauchent partiellement les entités de la couche de superposition sont coupées le long de la frontière et seules les parties situées à l'extérieur des entités de la couche de superposition sont conservées.

Il a fallu commencer par prendre la couche la moins prioritaire (Grande culture) et utiliser l'outil "Différence" pour comparer cette couche avec la couche suivante dans l'ordre de priorité (Non bâti). L'outil "Différence" a été appliqué pour extraire les entités de la couche "Grande culture" qui étaient à l'extérieur ou chevauchaient partiellement les entités de la couche "Non bâti". Les parties chevauchantes ont été coupées et seules les parties situées à l'extérieur ont été conservées.

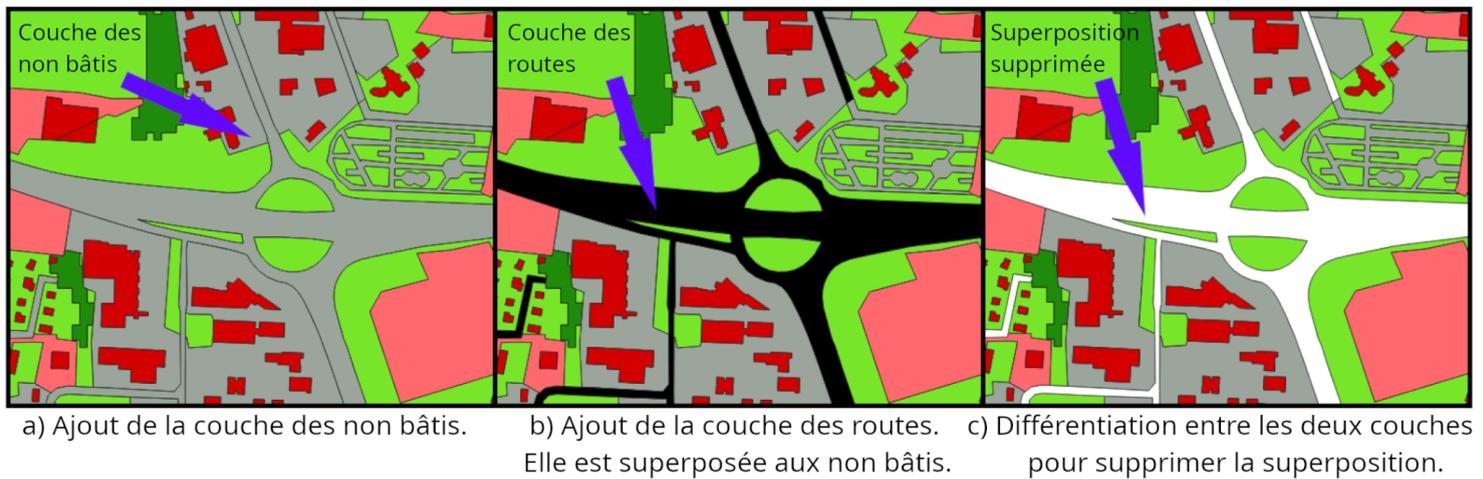
Une nouvelle couche "Grande culture" sans superpositions avec "Non bâti" a donc été créée et elle remplace l'ancienne couche "Grande culture" qui pouvait avoir des problèmes de superposition.

Il a fallu répéter cette étape en utilisant la nouvelle couche de "Grande culture" (sans superpositions) en la comparant avec la couche suivante dans l'ordre de priorité (Surfaces perméables). Une nouvelle application de l'outil "Différence" a été réalisée pour obtenir une couche de "Grande culture" différenciée des deux autres couches ("Non bâti" et "Surfaces perméables").

Ce processus a continué en répétant ces étapes successives pour chaque couche suivante dans l'ordre de priorité, jusqu'à atteindre la couche la plus prioritaire (Surface en eau). Ainsi la dernière couche "Grande culture" est différenciée de toutes les autres couches et cela empêche toute superposition avec les autres couches.

Pour finir, il a fallu répéter l'ensemble de ces étapes pour chacune des couches d'occupation du sol, en s'assurant de toujours respecter l'ordre de priorité. C'est en respectant méticuleusement cette méthodologie, qu'il a été possible d'obtenir un renouvellement des couches différentes d'occupations du sol qui ne sont plus superposées entre eux.

L'exemple le plus frappant de superposition était entre la couche des non bâtis et des routes. Ce n'est pas étonnant puisque la couche des routes (Figure 18.b) a été extraite depuis la couche des non bâtis (Figure 18.a). Cependant, les routes ont une priorité plus importante que les non bâtis et se trouvent donc par dessus la couche des non bâtis. La figure 18 ci-dessous montre bien l'utilité d'avoir différencié la couche des non bâtis avec celle des routes. La figure 18.c montre la nouvelle couche des non bâtis quand la couche des routes est cachée. Cela permet de montrer la suppression des surfaces de la couche originale des non bâtis superposées précédemment avec la couche des routes.



**Figure 18 : Différenciation des couches pour supprimer les superpositions**

*Source : Etienne Valognes*

**c) Association des environnements des barrières avec les zones délimitées**

La couche contenant les tampons a ensuite dû être intersectée avec chaque couche d'occupation du sol préalablement différenciée. L'outil "Intersection" a été utilisé en mettant en couche d'entrée celle des tampons et en couche de superposition une des différentes occupations du sol. Une nouvelle couche est créée lors de chaque intersection faite, qu'il a fallu renommer "Intersection [Nom de l'occupation du sol]".

**d) Quantification des surfaces occupées dans les zones d'étude**

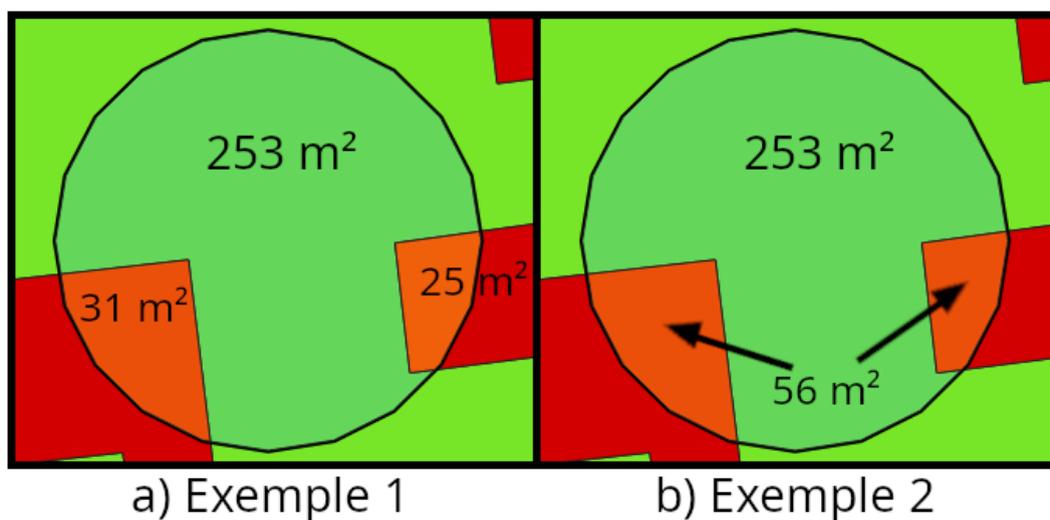
Les intersections avec les différentes couches d'occupation du sol ont été réalisées. L'étape suivante a été de calculer la surface d'occupation du sol de chacune de ces intersections.

Un point important à noter est qu'il était nécessaire de calculer les surfaces par groupe et non de calculer les surfaces individuellement. Pour cela, une nouvelle colonne a été créée dans la table attributaire en utilisant la calculatrice de champs. Un champ virtuel a été créé et nommé "[Nom de l'occupation du sol]". C'est dans cette calculatrice que la commande de calcul de surface a été insérée.

La figure 19 ci-dessous illustre cette différence. L'exemple 1 de la figure 19 correspond à un calcul de la totalité des surfaces en utilisant la commande "\$area". Pour le calcul de surface de l'intersection "Attractif" (en vert), il n'y a pas de problème et cela va afficher 253 m<sup>2</sup>. Cependant pour le calcul de surface de l'intersection "Bâti" (en orange), la formule "\$area" crée une duplication de données. Deux lignes sont générées : une ligne

correspondant à la surface de 31 m<sup>2</sup> et une autre pour la surface de 25 m<sup>2</sup>. Cependant, les deux lignes partagent le même ID de tampon, ce qui entraîne une duplication de l'ID du tampon.

C'est pour cette raison qu'il a été nécessaire de calculer les surfaces par groupe, comme illustré dans l'exemple 2 de la figure 19. La commande "sum(\$area,group\_by:="fid")" a été utilisée pour regrouper les surfaces appartenant au même tampon. Dans cet exemple, une seule ligne a été créée pour le calcul de surface de l'intersection "Bâti", additionnant les deux surfaces pour afficher 56 m<sup>2</sup> en résultat final.



*Figure 19 : Différents exemples de calcul de surface*

*Source : Etienne Valognes*

Après le calcul de surface de l'ensemble des couches intersectées, il a fallu les joindre à la couche contenant les tampons. Le champ qui a été utilisé pour la jointure est celui de l'ID tampon et le champ joint est celui contenant le calcul des surfaces, donc le champ nommé par le nom de l'occupation du sol des intersections. Un préfixe du nom du champ a été ajouté, celui de "Surface". La jointure a donc permis de créer différents champs avec cette désignation : "Surface [Nom de l'occupation du sol]".

La couche des tampons a été exportée en Shapefile pour récupérer le tableau de données et l'importer dans Excel. C'était le dernier traitement à réaliser dans le logiciel QGIS. C'est de cette façon qu'ont été obtenues les variables explicatives pour les 1000 échantillons.

## **2) Techniques d'observation des barrières pour une cartographie écologique précise**

Le tableau de données de l'environnement des barrières a été complété et peut être utilisé tel quel. Cependant, bien que les données des observations aient été préparées, il a encore fallu les compléter.

### **2.1) Utilisation des outils géospatiaux pour l'analyse des barrières en milieu urbain**

L'observation est dite "de terrain" car ce sont des éléments de terrain qui ont été analysés, mais il n'est pas correct de dire que l'observation a exclusivement été faite sur le terrain. En tant que piéton, les observations ont été possibles seulement depuis les routes et des obstacles ont obstrué la vue ne permettant pas de réaliser une observation qualitative. C'est pour cette raison que le travail d'observation a été réalisé en distanciel.

De nombreux outils géospatiaux permettant d'observer le terrain sont disponibles aujourd'hui. Pour la réalisation des observations et des catégorisations de tous les échantillons, Google Street View ainsi que Google Earth ont été utilisés.

Google Street View a permis d'avoir le point de vue d'un piéton, tout en se déplaçant instantanément entre les multiples barrières à analyser. Cet outil a permis d'observer les barrières à travers le temps. En effet, il a été compliqué de catégoriser certaines car elles n'étaient pas visibles à cause d'une végétation trop dense. Il a été suffisant d'observer les anciennes images de Google Street View 5 années plus tôt, afin de transformer la dense végétation en jeune pousse, permettant ainsi l'observation des barrières.

Google Earth, quant à lui, a été la résolution du problème des obstacles obstruant la vue. Cet outil géospatial a permis d'observer les barrières depuis une vue aérienne tridimensionnelle (3D). Il a donc été possible d'observer derrière des maisons et d'utiliser de la tridimensionnalité de l'outil pour obtenir des observations sous des toitures ou sous certains arbres. Il s'agissait d'un complément lorsque les observations n'ont pas pu être réalisées depuis les rues via Google Street View.

Si toutefois, il n'a pas été possible d'observer une barrière avec ces deux outils géospatiaux, alors il a été nécessaire de se rendre sur le terrain physiquement pour réaliser ces dernières observations.

Pour des raisons méthodiques, les quartiers ont été observés succinctement, analysant donc 50 échantillons par 50 échantillons pour faciliter le déplacement sur Google Street View. À chaque observation, il a été noté si la ligne du plan cadastral était observable, si une barrière était présente à son emplacement et le type de barrière correspondant.

## **2.2) Typologie des barrières : De l'observation à la catégorisation écologique**

Afin de rendre compte des observations de terrain dans la perspective d'une étude écologique, une typologie des barrières en huit catégories a été produite. La présence de murs, clôtures, haies, portails et grillages suivant les lignes du plan cadastral ont pu être déterminés. Lorsqu'aucune barrière n'était présente ou estimée trop perméable, ils étaient différenciés en fonction qu'il s'agissait de glissières ou de sols en béton ou en herbe.

Pour améliorer les performances du modèle statistique prédictif, les catégories ont ensuite été classifiées en trois classes : "Imperméable", "Semi-perméable" et "Perméable". La classe "imperméable" contient les catégories "mur", "clôtures" et "portail", permettant de représenter les barrières infranchissables. La classe "Semi-perméable" contient les catégories "Haie" et "Grillage". En effet, lors de l'observation, il a été difficile de vérifier si un grillage se trouvait à l'intérieur d'une haie à cause de la densité de végétation. Ce regroupement a fait sens pour éviter toute erreur de confusion. De plus, la semi-perméabilité de ces deux catégories a permis de renforcer ce choix de regroupement. Enfin, la classe "perméable" regroupe les catégories "béton", "herbe" et "glissière". Les lignes du plan cadastral appartenant à cette classe n'ont pas été considérées comme un obstacle à traverser. Cette classe a permis d'entraîner le modèle de prédiction, dans l'objectif de classer toutes les lignes du plan cadastral qui ne sont pas des barrières. Les hérissons peuvent traverser sans contourner et sans difficulté ces lignes de plan cadastral.

Suite à cette observation, les deux variables explicatives ont été finies d'être créées et complétées, permettant d'être utilisées dans le modèle statistique prédictif.

### **3) Développement d'un modèle prédictif pour la classification des barrières urbaines**

#### **3.1) Présentation du modèle de prédiction des barrières basé sur les forêts aléatoires**

Le logiciel de programmation R a été utilisé avec son propre langage de programmation. Ce logiciel est principalement utilisé dans la science des données ainsi que pour les statistiques de manière générale. Étant un logiciel libre, les utilisateurs forment une communauté solide et contribuent à son amélioration en permettant aux autres utilisateurs d'ajouter d'autres fonctionnalités sous forme d'extensions appelées "*Package*". Le package "Caret" a été utilisé pour la création de ce modèle en suivant la méthodologie de Kuhn (2008). C'est une extension qui permet de construire différents modèles de prédiction.

Pour cette étude, le modèle de forêt aléatoire (*random forest* en anglais) a été utilisé. Ce modèle est classé parmi les plus performants pour les algorithmes de classification. Pour cette méthode, une approche stochastique a été adoptée, c'est-à-dire qu'il a prédit les classes des barrières en utilisant des techniques de calcul des probabilités basées sur des données statistiques. Il a fonctionné grâce à un algorithme de type "boîte noire", ce qui signifie qu'il a suffi de lui donner des variables explicatives en entrée pour qu'il ait produit des variables de réponses en sortie, et ce, sans nécessiter d'avoir une compréhension détaillée de son fonctionnement interne.

Pour une meilleure compréhension, les forêts aléatoires sont un algorithme d'apprentissage qui mobilise la régression. C'est-à-dire qu'elle a besoin de variables explicatives en entrée et s'entraîne avec la nature de la variable dépendante. Elle classe donc les barrières en construisant de multiples arbres de décision à partir de sous-ensembles de données et de variables. Les probabilités de chaque arbre de décision sont calculées, et les classes dont la probabilité est la plus élevée sont choisies, fournissant ainsi la classification finale des barrières.

Cette méthode est très flexible. Elle est robuste à l'*overfitting*, c'est-à-dire qu'elle évite de trop adapter les données d'entraînement du modèle, c'est l'un des problèmes majeurs rencontrés en *machine learning*. Elle supporte aussi la multicollinéarité, un problème qui arrive dans un modèle quand des variables explicatives différentes expriment un même phénomène. Lorsque la multicollinéarité est prononcée, elle augmente la variance des coefficients de régression et rend difficile l'interprétation finale des données. Des techniques de rééchantillonnage peuvent être utilisées pour améliorer ce modèle, comme le bootstrapping. Un *bootstrap* consiste à créer des "nouveaux échantillons" statistiques, mais uniquement par tirage avec remise, à partir de l'échantillon initial.

### **3.2) Entraînement et validation du modèle pour une classification précise des barrières**

Avant d'utiliser ce modèle pour classifier l'ensemble des lignes du plan cadastral, il a fallu l'entraîner et le tester. Trois quarts des échantillons observés, soit 750 échantillons, ont été importés dans le modèle afin de l'entraîner (Annexe 2.1). Le modèle a utilisé les différentes surfaces d'occupation du sol entourant les barrières observées comme étant des variables explicatives et a observé les classes données comme étant les variables dépendantes (ou de réponse).

Le modèle a ensuite été testé sur un autre jeu de données, comportant le dernier quart des échantillons, soit 250 échantillons (Annexe 2.2). Le modèle des forêts aléatoires entraîné auparavant a ensuite été lancé avec les échantillons test comportant les variables explicatives et le modèle sort une classification en variables de réponse.

Deux classifications du même jeu de données existent, celui observé sur le terrain et celui prédit par le modèle des forêts aléatoires. Il suffit de comparer ces deux classifications pour obtenir le pourcentage de précision du modèle prédictif. Pour le modèle qui a été créé, la précision était de 65 %, soit 2 barrières sur 3 sont bien classifiées par le modèle.

### **3.3) Application du modèle prédictif sur l'intégralité des données cadastrales**

Une fois le modèle calibré, il a fallu l'appliquer à l'ensemble des lignes du plan cadastral. Cependant, pour appliquer le modèle, il a fallu calculer l'ensemble des surfaces d'occupation du sol autour des 636 000 lignes du plan cadastral restant.

Cette étape de traitement n'a pas été effectuée sur le logiciel QGIS mais sur le logiciel R. En effet, les étapes réalisées dans QGIS dans la partie 1.4 de la méthodologie de ce mémoire ont été réalisées sur seulement 1000 échantillons. QGIS est un logiciel très visuel et demande donc un temps de traitement plus important. C'est pour cette raison qu'il a été nécessaire de réaliser les mêmes étapes dans le logiciel R puisqu'il peut réaliser ces étapes sans que ce soit visuel, permettant un temps de traitement bien plus rapide pour l'ensemble des échantillons. Les mêmes étapes ont donc été appliquées pour obtenir l'ensemble des surfaces de toutes les lignes du plan cadastral. Il n'est pas nécessaire de revenir sur le choix de ces étapes, mais s'il en plait au lecteur de vouloir découvrir le fonctionnement du SIG du logiciel R, le code réalisé pour l'obtention de ces surfaces est disponible librement sur GITHUB (Annexe 1).

Les données des différentes surfaces d'occupation du sol ont été calculées pour l'ensemble des lignes du plan cadastral, correspondant à toutes les variables explicatives permettant au modèle d'être lancé. Le modèle a donc prédit la classe de type de barrière de l'ensemble des lignes du plan cadastral appartenant à la zone d'étude. Terminant ainsi l'obtention de la dernière donnée nécessaire pour finaliser la carte du paysage.

## C) Modélisation du déplacement du hérisson à l'aide de la théorie des graphes

La fragmentation des habitats, comme expliqué dans les points antérieurs, a de graves conséquences sur le hérisson d'Europe notamment dans les milieux hautement anthropisés que sont les zones urbaines. Ce travail de recherche a permis d'apporter une compréhension et l'identification des zones qui sont les plus touchées par cette fragmentation. Cela a été fait avec l'aide de la modélisation du réseau écologique du hérisson par la méthode des graphes paysagers.

La méthode des graphes paysagers est la méthode la plus courante aujourd'hui pour analyser et représenter la connectivité écologique d'une ou de plusieurs espèces. La majorité des informations utilisées dans cette partie est basée sur un travail issu de l'Habilitation à Diriger de Recherches (HDR) de Céline Clauzel, intitulé "**Réseaux écologiques et connectivité du paysage : De la modélisation spatiale à la gestion de la biodiversité.**".

Pour une meilleure compréhension de la méthodologie de la modélisation du réseau écologique du hérisson, cette partie est structurée en deux sous-parties. La première se concentrant sur la définition et l'explication des termes utilisés, puis une deuxième sous-partie traitant des méthodes qui ont été employées.

## 1) Fondements théoriques et outils pour la modélisation des réseaux écologiques

### 1.1) Concepts clés : Fragmentation paysagère, réseau écologique et théorie des graphes

**Fragmentation paysagère :** La fragmentation paysagère regroupe deux processus interreliés, c'est à la fois la réduction de la quantité totale d'habitat dans le paysage, mais aussi le morcellement de l'habitat en petits fragments (Laurance, 2008). Dans cette modélisation, le terme "taches d'habitats" est utilisé pour parler des différents habitats de l'espèce étudiée.

**Réseau écologique :** Un réseau écologique correspond à la connectivité écologique. Cette connectivité fait référence à la capacité de mouvement des organismes entre les taches d'habitat en réponse à la structure du paysage et mesurée à différentes échelles (Clauzel, 2021). Un réseau écologique prend en compte les aspects écologiques lors de l'identification d'un réseau fonctionnel ainsi que des habitats de l'espèce et des corridors qu'il emploie. Selon Opdam *et al.* (2006), un réseau écologique est « un ensemble d'écosystèmes de même nature, connectés par des flux d'organismes au sein d'un système spatialement cohérent, et interagissant avec la matrice paysagère dans laquelle il s'insère ». Le réseau écologique est aussi un concept spatial adapté pour la planification territoriale. Il peut donc être évoqué afin de parler de dispositif opérationnel pour permettre une meilleure intégration des enjeux de biodiversité en particulier dans les espaces fortement anthropisés. C'est pour ces raisons que ce terme est l'un des plus importants dans ce travail de recherche.

**Théorie des graphes :** La théorie des graphes est un modèle mathématique s'appuyant sur la représentation simplifiée sous forme d'un réseau, constitué d'une série de sommets (nœuds) et d'arêtes (liens) reliant ces sommets. Elle est utilisée dans le domaine de l'écologie en tant que graphe paysagers pour modéliser et étudier les interactions entre les éléments du paysage, tels que les habitats, les corridors de déplacement et les espèces qui les utilisent.

## Vocabulaire relatif aux graphes paysagers

Un graphe paysager est constitué d'un ensemble de **nœud** (*node*) représentant les taches d'habitat d'une espèce cible et de **liens** (*link*) représentant les connexions potentielles entre ces nœuds. Un nœud est associé à une valeur de **qualité**, représentant la capacité de la tache d'habitat à accueillir une population (aussi appelé potentiel démographique). La qualité d'un habitat peut être définie comme la surface de la tache (cas le plus courant) ou par d'autres critères en fonction des besoins écologiques de l'espèce étudiée. Un **chemin** (*path*) dans le graphe se définit comme un parcours constitué d'une séquence de nœuds, chaque nœud et chaque lien n'étant emprunté qu'une fois au cours de ce parcours. La **longueur** d'un chemin équivaut à la somme des longueurs des liens empruntés. Un graphe est considéré comme **connexe** s'il existe un chemin entre chaque paire de nœuds. Dans un graphe connexe, les groupes de nœuds fortement interconnectés définissent des **clusters**. Si un graphe peut être déconnecté par la suppression d'un seul nœud, celui-ci est appelé **nœud-clé** (*cut-node*). Un graphe **non connexe** est constitué de plusieurs sous-graphes indépendants les uns des autres et au sein desquels, chaque nœud est relié à au moins un autre. Ces sous-graphes délimitent des **composantes** (*component*) qui peuvent être assimilées à l'espace dans lequel un individu peut se déplacer et rejoindre un nœud de cette composante sans rencontrer de barrière infranchissable. Le **diamètre** (*diameter*) d'un graphe correspond au plus long parcours possible entre deux nœuds tout en considérant **le plus court chemin** (*least-cost path*).

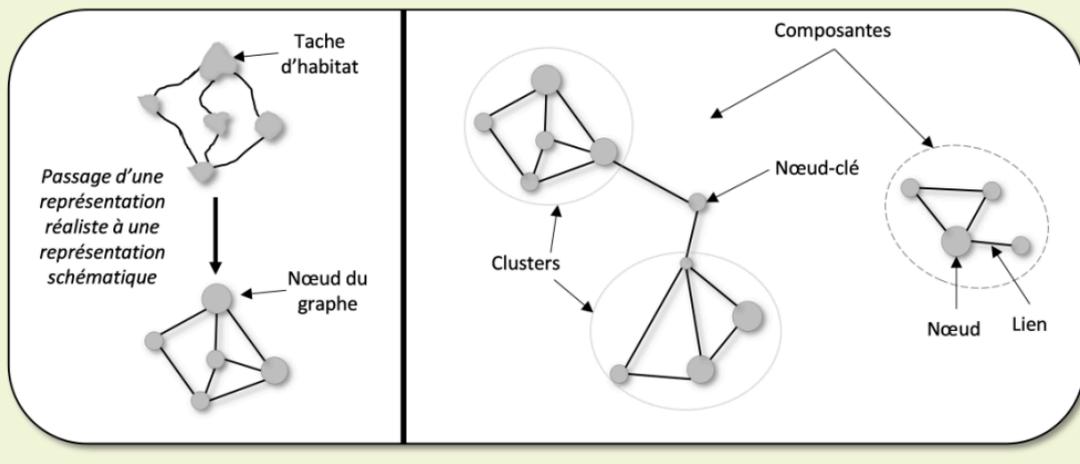


Figure 20 : Vocabulaire relatif aux graphes paysagers Encadré n°2 (Clauzel, 2021)

**Métatache** : Comme vu dans la description des graphes paysagers, un réseau écologique relie les taches représentant un habitat ou des ressources alimentaires, à des déplacements quotidiens à l'échelle d'un individu. Une métatache correspond à une tache d'habitat du réseau, mais à l'échelle des populations. Elle correspond donc au domaine vital. Le terme de métatache provient de Zetterberg *et al.* (2010).

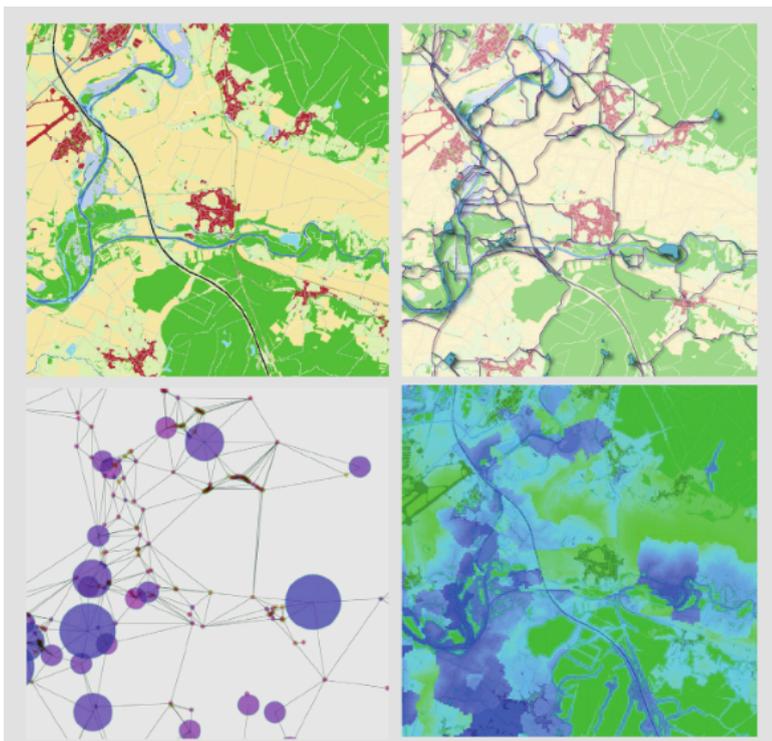
**Métriques** : En contexte de graphes paysagers, une métrique désigne une mesure utilisée pour évaluer la connectivité fonctionnelle des éléments du réseau écologique, tels que les nœuds (taches d'habitat) et les liens (corridors). Ces métriques permettent de quantifier la qualité et l'efficacité des connexions entre les différentes composantes du paysage écologique.

## 1.2) Utilisation de Graphab pour la modélisation des réseaux écologiques

La modélisation spatiale du réseau écologique permet de comprendre les processus écologiques afin de comprendre et “prédire”, les phénomènes et processus spatiaux (Varenne, 2020). Clauzel (2021) explique que « La modélisation spatiale permet une représentation schématique des processus en lien avec le déplacement des espèces afin de mieux comprendre la structure et le fonctionnement des réseaux écologiques, mais aussi l’impact de différents facteurs sur la connectivité ».

Pour cette étude, la théorie des graphes a été utilisée dans le domaine de l’écologie avec les graphes paysagers. Le logiciel Graphab (Foltête *et al.*, 2012) a été choisi pour cette tâche en raison de sa capacité à prendre en compte les aspects écologiques et biologiques de l’espèce étudiée lors de la modélisation.

En effet, ce logiciel a intégré une organisation hiérarchique des processus écologiques pour modéliser un graphe paysager en reprenant le concept de métataches. « Le principe consiste à modéliser successivement le réseau écologique à l’échelle des déplacements quotidiens, puis à partir de cette base, à modéliser le réseau écologique à l’échelle de la dispersion. [...] Les métataches retenues deviennent les nœuds d’un second graphe, reliés par des liens représentant les flux de dispersion » (Clauzel, 2021).



**Figure 21 : Fiches méthodologiques pour la prise en main de Graphab. LADYSS-SNPN**

**Source des images : X. Girard**

## **2) Optimisation de la modélisation des réseaux écologiques**

La pertinence d'un modèle dépend de sa construction. Pour cette étude, la théorie des graphes sera utilisée, mais dans le domaine de l'écologie avec les graphes paysagers. C'est la méthode la plus employée pour modéliser des réseaux écologiques dans une perspective opérationnelle (Urban et al., 2009) et elle a donc également été mobilisée pour cette étude.

### **2.1) Conception de la carte du paysage urbain : Intégration des barrières et optimisation des couches sous QGIS**

Avant d'utiliser Graphab, il a fallu finaliser les cartes du paysage sur QGIS. Ainsi, les trois classes de type de barrières ont été ajoutées aux autres couches d'occupation du sol. Il a ensuite fallu rastériser la carte du paysage, c'est-à-dire que les images vectorielles, ici les données des différentes couches, ont été converties en image matricielle, donc en plusieurs pixels. De ce fait, chaque pixel correspond à une seule couche de données.

L'outil "créer une carte d'occupation du sol" de l'extension Graphab a été utilisé dans le logiciel QGIS pour réaliser la carte du paysage. Dans un premier temps, l'ensemble des couches vecteurs ont été déposées dans l'onglet "Couche", en ordonnant celles-ci tout en respectant leur encodage. Voici l'ordre qui a été établi, allant de la moins prioritaire à la plus prioritaire : Grande culture < Surfaces perméables < Non bâti < Routes < Répulsif < Peu fréquenté < Attractif < Structurant < Bâti < Surface en eau < Imperméable < Semi-perméable < Perméable.

Lors de l'ajout des couches représentant les classes des barrières, il a été important de sélectionner l'option permettant que tous les pixels se touchent, dans le but de garder les barrières linéaires et non sectionnées par d'autres pixels. Pour les mêmes raisons, et pour plus de sécurité, il a été préférable d'ajouter un tampon d'un 1 mètre autour des barrières, dans les mêmes paramètres.

Dans un second temps, l'onglet "Fusion" a permis de numéroter la valeur finale des couches. Cela permet normalement de fusionner deux couches ayant une valeur finale similaire. Cependant, il n'y a pas eu besoin de les fusionner, donc les couches ont été numérotées de 1 à 13 en gardant l'ordre établi précédemment (Tableau 1).

*Tableau 1 : Tableau des codes des différentes couches d'occupation du sol*

<b>Code</b>	<b>Type</b>
1	Perméable
2	Semi-perméable
3	Imperméable
4	Surface eau
5	Bâti
6	Structurant
7	Attractif
8	Peu fréquente
9	Repulsif
10	Route
11	Non bâti
12	Surface perméable
13	Grande culture

Le milieu urbain de la ville de Caen a été le territoire de cette étude. Il a donc été nécessaire de travailler avec une résolution très fine pour bien distinguer les délimitations des bâtis, des routes, des jardins et surtout des barrières. C'est pour cette raison qu'a été définie la résolution spatiale de la carte du paysage à 2 mètres dans les paramètres de l'onglet "Sortie". La couche de la zone d'étude a été utilisée pour définir l'étendu de sortie. Ces étapes ont été les dernières pour la création finale de la carte du paysage en format Raster (Figure 22).



Figure 22 : Carte du paysage de Caen avec une résolution spatiale de 2 mètres.

## **2.2) Paramétrage des nœuds et des habitats dans Graphab : Focus sur le hériçon en milieu urbain**

La carte du paysage a ensuite été utilisée en entrée d'un nouveau projet sur le logiciel Graphab. Les différents paramètres ont été choisis en suivant le manuel d'utilisation de Graphab 2.8, réalisé par **Clauzel *et al.***, ainsi que les différentes fiches d'aide à l'utilisation de Graphab réalisées par **Clauzel *et al.*** en 2020.

Les codes 6 et 7 d'habitat ont été sélectionnés dans les paramètres, correspondant aux couches structurantes et attractives, soit les habitats privilégiés par le hériçon puisque ce sont, en majorité, les jardins dans la ville de Caen. Le code hors zone correspond au code des pixels correspondant à l'absence de valeurs dans le fichier Raster. Comme la carte du paysage à été faite avec l'extension Graphab sur QGIS, le code hors zone était le code n° 255.

La taille minimum de l'habitat a été fixée à 50 m<sup>2</sup>, correspondant à la taille minimum d'un jardin privé en ville, pouvant être habitable par le hériçon. Cela a permis de ne pas prendre en compte les petits jardins et d'éviter qu'un pixel isolé de 2 m<sup>2</sup> de surface attractive soit considéré comme un habitat potentiel.

## **2.3) Établissement des connexions écologiques : Choix de la topologie et calcul des distances à moindre coût**

### **a) Topologie des liens : Compromis entre réalisme et lisibilité du réseau**

La topologie permet de définir comment les liens entre les taches d'habitat sont définis. Le choix d'une topologie complète aurait permis une plus grande représentation de la réalité. Cependant, à cause de la grandeur de la zone d'étude, de la petite résolution spatiale définie et du nombre de taches d'habitat et de liens qui aurait été créé, le temps de traitement aurait été trop long et le graphe paysager aurait été illisible. C'est pour cette raison que la topologie planaire a été choisie, permettant une meilleure visibilité au prix d'une certaine simplification, puisque seuls les liens formant un graphe planaire minimal sont pris en compte.

## b) Analyse des déplacements en milieu urbain : De la distance euclidienne à la distance-coût

Les liens entre les nœuds correspondent aux chemins possibles entre les différents habitats. Ces liens ne sont pas calculés en distance euclidienne, mais en distance-coût, correspondant à la somme des coûts de tous les pixels du chemin parcouru.

Plus concrètement, un chemin direct reliant deux habitats, comme lors de la création de passage de hérisson par le projet Piqu'en ville, a une faible valeur de coût, car il n'y a pas d'obstacle. Cependant, une route ou un fossé séparant deux habitats est considéré comme un obstacle et nécessite un coût plus important pour rejoindre l'un des deux habitats. Donc la valeur de résistance/coût de déplacement est faible pour les haies, les pelouses, etc, mais élevée dans les milieux à éviter, à risque ou infranchissables comme les routes, les bâtiments, les surfaces artificialisées, etc. La perméabilité différenciée de la matrice doit donc être propre à une seule espèce, puisqu'un obstacle pour une espèce n'en est peut-être pas pour une autre. Cette démarche nécessite aussi de bien connaître l'écologie de l'espèce étudiée pour savoir quelles sont les contraintes dans ses déplacements. Cette méthode est la plus représentative et la plus pertinente pour analyser les déplacements des individus tout en prenant en compte l'hétérogénéité du paysage.

Il a donc fallu définir la valeur de résistance de la matrice distance-coût pour chaque type d'occupation du sol. L'attribution des coûts a été faite de manière pondérée de manière croissante, allant de la catégorie la plus préférentielle à la catégorie la plus difficile à franchir (Tableau 2).

*Tableau 2 : Matrice distance-coût*

Code	Type	Coût attribué
1	Perméable	200
2	Semi-perméable	15000
3	Imperméable	20000
4	Surface eau	5000
5	Bâti	20000
6	Structurant	1
7	Attractif	10
8	Peu fréquente	200
9	Repulsif	1000
10	Route	3000
11	Non bâti	500
12	Surface perméable	200
13	Grande culture	200

La valeur de 1 et 10 ont été attribuées aux surfaces structurantes et attractives, représentant les milieux habitables et préférentiels aux hérissons.

Les surfaces perméables, les grandes cultures, les milieux peu fréquentés ainsi que les barrières perméables représentent les terrains possibles à traverser sans obstacle tout en n'étant pas des milieux préférentiels. Pour ces raisons, la valeur de 200 leur a donc été attribuée.

Les surfaces des "Non bâti" sont aussi sans obstacle pour le déplacement, mais elles représentent les surfaces imperméabilisées, donc les surfaces bétonnées telles que les parkings et les terrains couverts de pavés ou de dalles. Puisqu'elles sont plus contraignantes au déplacement, alors la valeur de 500 leur a été attribuée.

Les milieux répulsifs de la sous-trame agricole extensive sont peu présents dans la zone d'étude, mais elle est définie comme étant un obstacle au déplacement. Cette perte de perméabilité de mouvement a été représentée par une valeur de 1000.

Les routes sont assez similaires aux non bâti, puisqu'elles sont des surfaces bétonnées sans obstacle physique pouvant donc être traversées. Cependant, la circulation routière et le flux de passage important des différents véhicules motorisés, les routes représentent un danger pouvant être mortel pour le hérisson. Elles constituent la source principale de mortalité chez les hérissons (Rondinini & Doncaster, 2002) et sont un facteur significatif de déclin de ses populations (Dowding *et al.*, 2010 ; Valerio *et al.*, 2020). Pour toutes ces raisons, la valeur de 3000 leur a été attribuée.

Les surfaces en eau ne sont normalement pas un réel obstacle puisque le hérisson est capable de nager (Korslund, 2024), mais les surfaces en eau à Caen correspondent majoritairement au canal de l'Orne traversant Caen et faisant 50 m de large. De plus, une fois dans le canal, il n'est pas possible de remonter partout. Ces surfaces sont aussi mortelles, donc leur valeur de coût a été attribuée à 5000.

Viennent ensuite, les obstacles physiques nécessitant d'être contournés puisqu'ils sont difficiles ou impossibles à franchir. Ces obstacles ont les valeurs de coût attribuées les plus importantes.

Dans ces catégories d'obstacles, se trouvent les barrières semi-perméables, composées à la fois des grillages et des haies. Certes, les haies sont bénéfiques pour le hérisson, mais lors de l'observation, il était courant d'avoir des grillages dans les haies. Il n'était pas possible de savoir si des grillages étaient présents dans les haies les plus denses, c'est donc la raison pour laquelle ces deux types de barrières ont été classifiés ensemble. Les grillages sont un obstacle ne pouvant être franchi, sauf dans le cas où ils ne sont pas entretenus. En effet, la durée de vie d'une clôture en grillage est estimée entre 3 à 10 ans, puisque cette dernière a tendance à se déformer avec le temps. Les fils de fer peuvent donc se desserrer et permettre aux hérissons de passer au travers. La valeur en coût des barrières semi-perméables a été attribuée à 15 000.

Enfin, les obstacles qui sont et restent infranchissables sont les bâtis et les barrières imperméables. Dans cette classe de barrières sont représentés les murs, clôtures et portails. Sauf preuve contraire, les hérissons ne peuvent pas traverser les murs à la façon de Dutilleul dans "Le passe-muraille" de Marcel Aymé. Ils sont donc dans l'obligation de contourner ces obstacles. Les valeurs de coût ont donc été mises à 20 000, soit les valeurs les plus élevées de la matrice.

#### **2.4) Simulation et évaluation du réseau écologique : De la modélisation aux métriques de connectivité**

Une fois que les différents paramètres ont été appliqués, le programme a pu être lancé, affichant donc les patches d'habitats avec le jeu de lien créé (Figure 23).

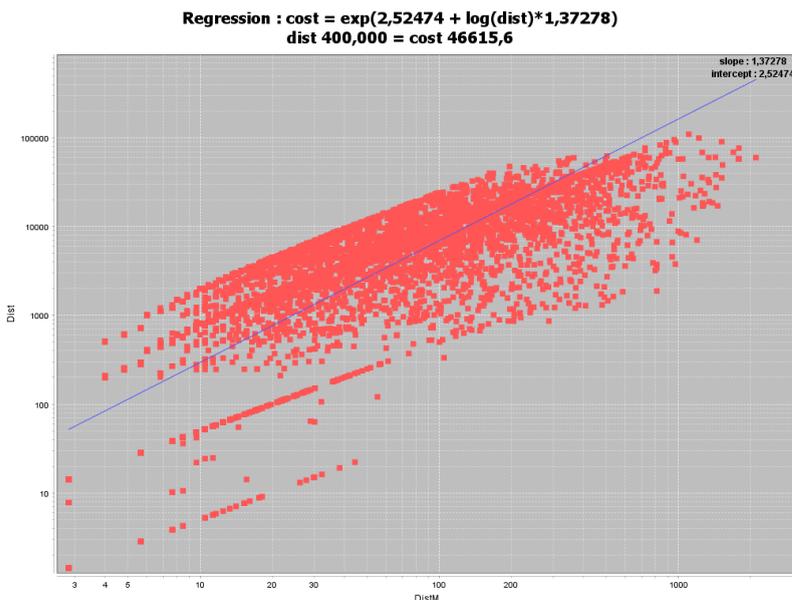
##### **a) Conversion des distances : Intégration du coût de déplacement dans la modélisation**

Pour la création d'un graphe, de la carte des corridors et des métriques qui ont été utilisées, il a fallu indiquer la distance maximum de dispersion quotidienne de l'espèce en coût cumulé. La distance métrique de cette dispersion en ville est connue. En effet, une étude à Nantes montre une distance parcourue de 150 m en moyenne la nuit avec un maximum de 456 m qui a été réalisé par une femelle (Verry et Marianne, 2012). La distance de 400 m a donc été retenue en tant que valeur maximum de dispersion quotidienne pour la ville de Caen.

Il a ensuite été possible de convertir cette distance métrique en distance en coût cumulé dans le logiciel grâce à l’outil “Conversion distance” présent dans le menu contextuel d'un jeu de lien. Les valeurs au-dessus de 3000, soit les routes, bâti, barrières imperméables et semi perméables, ont été ignorées avec le paramètre "Ignorer les chemins avec un coût supérieur à" permettant d'exclure de la conversion de distance les liens traversant des éléments barrières ou quasi infranchissables. Une distance métrique de 400 m correspondait donc à 46 615 de coût cumulé. (Figure 24)



*Figure 23 : Modélisation des chemins à moindre coût entre les différents habitats potentiels*



*Figure 24 : Conversion d'une distance métrique en distance coût cumulé*

#### **b) Identification des corridors écologiques : Cartographie des chemins potentiels pour le hérisson**

Le jeu de liens a servi à créer la carte des corridors. Les liens potentiellement utilisables par le hérisson ont été retenus à partir de ce jeu de liens, formant ainsi les différents corridors entre les tâches d'habitat. Graphab a permis de calculer les corridors représentant, pour une distance maximale de 46 615 en coût cumulé, l'espace qui peut être traversé entre 2 tâches d'habitat (Clauzel, 2022). C'est-à-dire l'espace qui représente l'ensemble des chemins possibles reliant 2 tâches et ayant une distance inférieure à la distance de dispersion quotidienne maximale, ici de 400 m. Les corridors ont donc été calculés à partir du jeu de liens créé auparavant en utilisant l'outil "Corridor" présent dans le menu contextuel d'un jeu de lien. La distance coût maximale qui a été renseignée dans les paramètres a donc été de 46 615 de coût cumulé.

#### **c) Construction du graphe paysager : Représentation de la connectivité écologique**

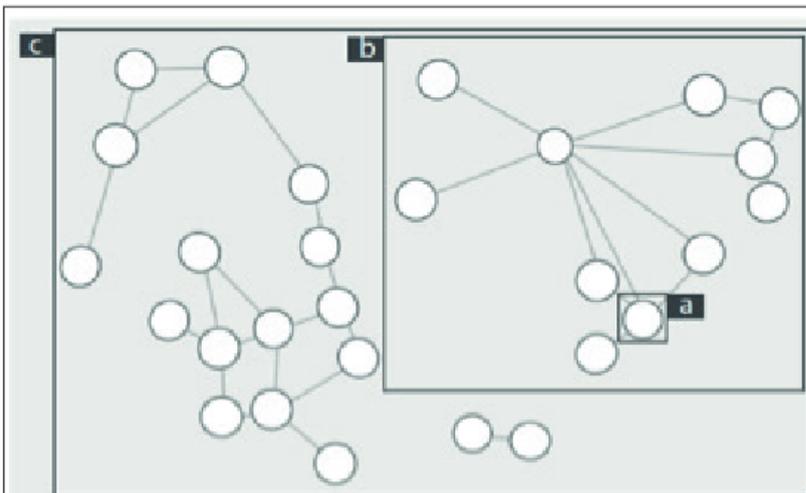
Un graphe paysager a aussi été créé en utilisant le même jeu de liens (figure 31.c). L'élagage choisi a été celui utilisant la distance Max afin que les liens retenus soient inférieurs à la distance maximum de dispersion quotidienne pour représenter au mieux le réseau écologique du hérisson. La distance maximum qui a été attribuée reste inchangée et a été fixée à 46 615 de coût cumulé. De plus, les distances intra-tâches ont été intégrées pour le calcul des métriques qui ont été réalisées a posteriori. Ce graphe paysager a permis de

représenter de manière simplifiée le réseau écologique du hérisson, tout en permettant de visualiser le degré de fragmentation paysagère du réseau écologique du hérisson, notamment en montrant les différentes composantes qui le composent.

**d) Analyse des métriques de connectivité : Évaluation de la fragmentation et des corridors écologiques**

Les métriques de connectivités ont ensuite été calculées en utilisant le graphe paysager comme support. Il existe trois types de métriques ;

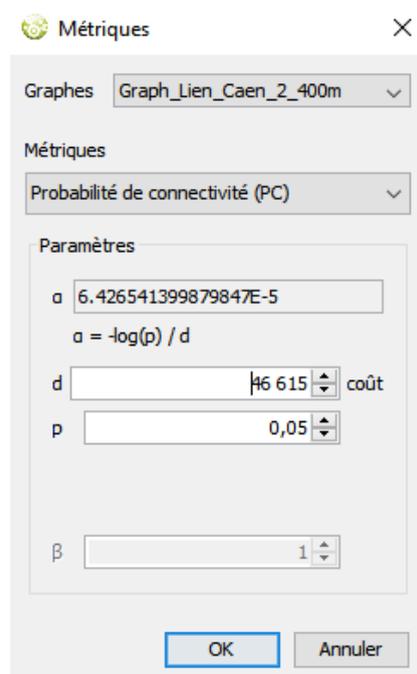
- Les métriques locales caractérisent la connectivité de chaque élément du graphe, nœud ou lien (Figure 25.a)
- Les métriques par composante caractérisent la connectivité interne de chaque composante (ou sous-graphe). (Figure 25.b)
- Les métriques globales caractérisent le graphe entier (Figure 25.c) (Clauzel, 2020).



*Figure 25 : Niveaux de calcul des métriques de connectivité dans un graphe.*

*Source : image de X. Girardet. (Clauzel, 2020)*

Pour cette étude, seules des métriques pondérées ont été utilisées, permettant de prendre en compte à la fois la capacité des habitats ainsi que de la distance entre celles-ci. Les paramètres ont été similaires pour les différentes métriques. Le paramètre “d” correspond à la distance en coût, encore une fois elle a été établie à 46 615 afin de représenter la dispersion quotidienne des hérissons. Le paramètre p correspond à la probabilité de déplacement entre deux taches pour la distance choisie. Elle a donc été fixée à 0,05 pour que 95 % des déplacements soient inférieurs à la distance “d” donc à 400 m. Enfin, bêta est la pondération par la capacité des taches. Bêta a été fixée à 1 pour qu’une tache, ayant une forte capacité, ait plus de poids qu’une tache ayant une capacité faible).

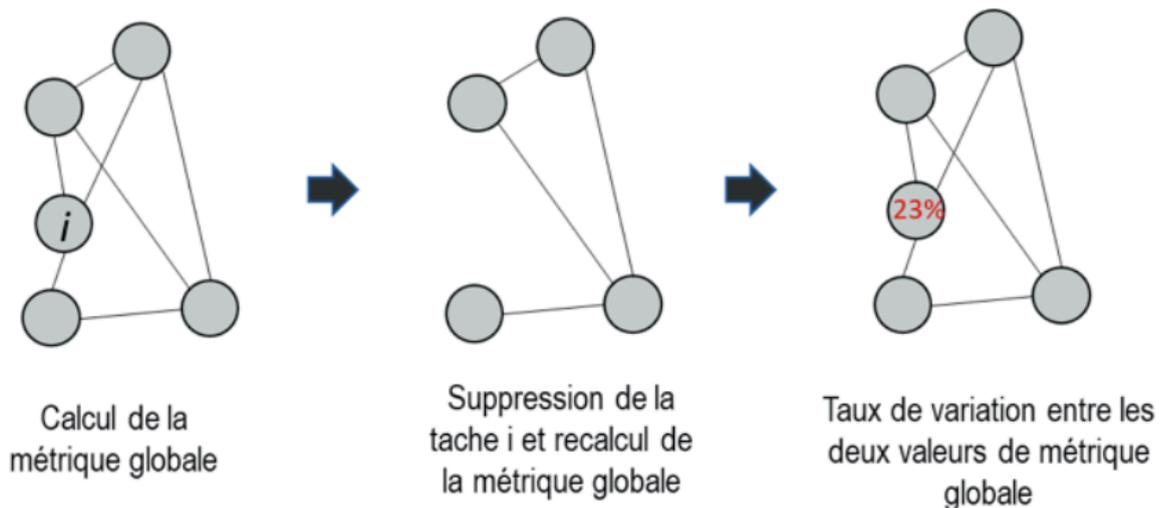


*Figure 26 : Paramétrage des métriques*

La première métrique qui a été calculée est l'indice de centralité intermédiaire ou Betweenness Centrality (BC), faisant partie des métriques locales. C'est une métrique qui permet d'indiquer le flux potentiel traversant les liens et les taches. Elle tient compte de la distance d'une tache par rapport aux autres taches, et des capacités de celle-ci avec les autres taches (Clauzel, 2020). Plus la tache est reliée à des chemins entre d'autres taches à l'intérieur du graphe, plus sa valeur de BC est forte. Cela a donc permis d'évaluer la fréquence d'utilisation des habitats et de voir visuellement les habitats les plus stratégiques au sein du graphe.

Deux autres métriques ont été utilisées, mais seulement pour un quartier et non pour la zone d'étude entière. En effet, le calcul de ces métriques nécessite une grande puissance de calcul et le nombre de tâches et de liens dans la zone d'étude est bien trop important pour le très bon ordinateur utilisé. Cependant, il est intéressant d'étudier et de montrer ces métriques dans un quartier important dans le réseau écologique. Le quartier de Sainte-Thérèse Demi-Lune a donc été le terrain d'étude pour le calcul des deux prochaines métriques puisque c'est un quartier pavillonnaire, dont les jardins sont présents en grand nombre.

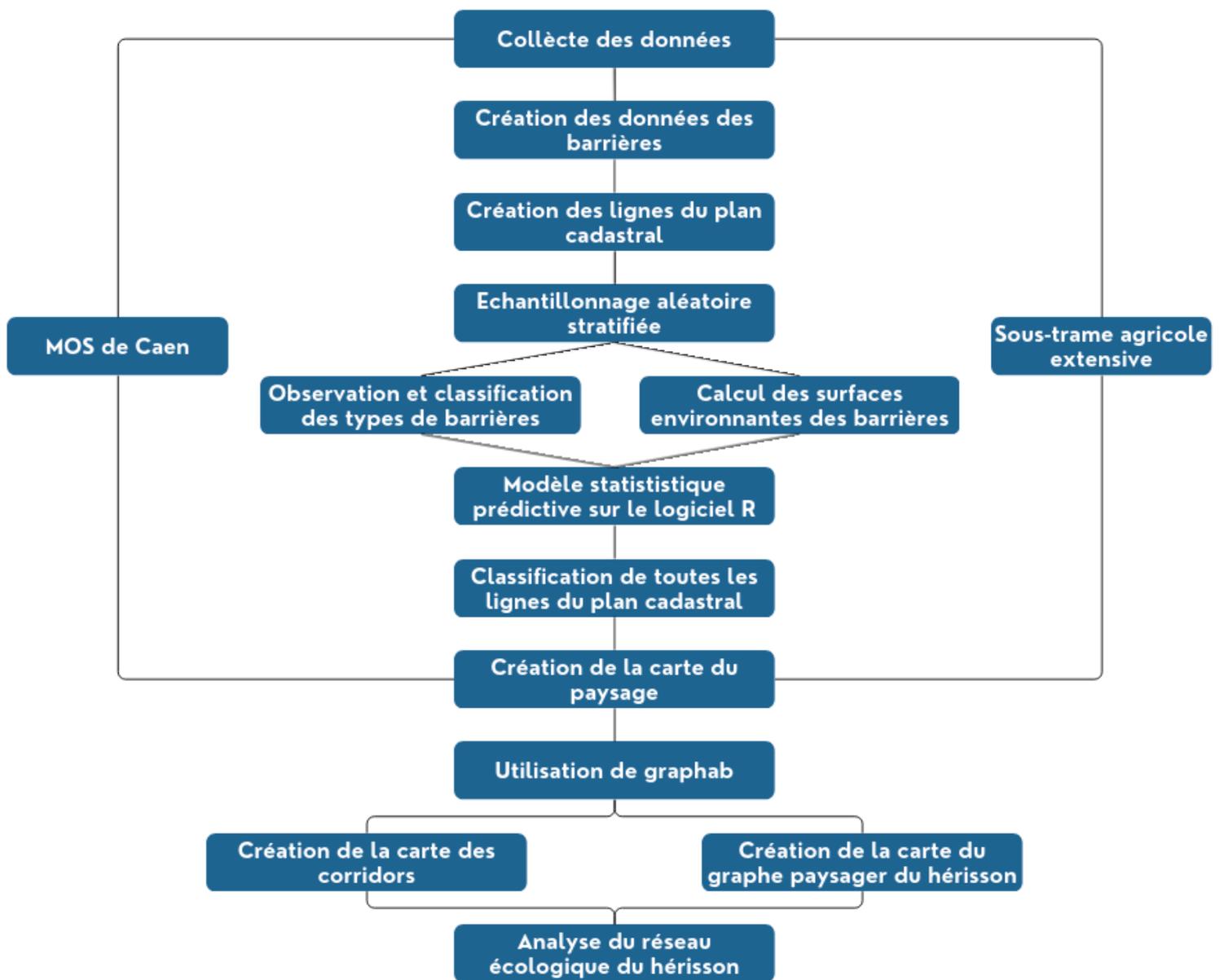
Les delta-métriques sont des métriques locales particulières. En effet, leur calcul est différent puisqu'il utilise la suppression. Pour plus de précision, une métrique globale est calculée à l'état initial, une tâche est retirée du graphe et la métrique globale est recalculée (Clauzel, 2020).



*Figure 27 : Principe des delta-métriques*  
*Source : image de X. Girardet (Clauzel, 2020).*

Cette métrique a permis de voir l'importance d'un élément dans le graphe paysager ainsi que son impact dans le réseau. Parmi les différentes delta métrique, celle qui a été utilisée est la probabilité de connectivité sur les nœuds du graphe. Elle représente la probabilité que deux individus tirés au hasard dans la zone d'étude parviennent à entrer en contact, soit parce qu'ils sont situés dans la même tâche d'habitat, soit parce qu'ils sont dans deux tâches connectées entre elles (Clauzel, 2020). Encore une fois, plus la tâche est rouge, plus elle est importante dans le réseau. l'importance de cette métrique prend en compte à la fois la capacité de surface et la place du nœud dans le réseau en fonction des liens. De plus, cette métrique est pratique pour observer un réseau écologique à un instant T.

La probabilité de connectivité a été une fois de plus utilisée, mais cette fois comme pour une métrique par composante. Les composantes représentent au mieux la fragmentation de l'habitat. Grâce à cette métrique, les zones les plus touchées par la fragmentation ont été représentées sur une carte, permettant donc d'identifier les zones à protéger ou nécessitant une intervention opérationnelle pour améliorer le réseau écologique.



*Figure 28 : Histogramme de la démarche méthodologique adoptée*

*Source : Etienne Valognes, 2024.*

# RÉSULTAT

## 1) Analyse des barrières urbaines à Caen : Typologie, répartition et implications écologiques

*Tableau 3 : Nombre de barrières observables*

Observable	Nombre de barrière
Oui	1150
Non	0
<b>Total général</b>	<b>1150</b>

*Tableau 4 : Nombre de barrières présentes*

Presence	Nombre de barrière
Non	213
Oui	937
<b>Total général</b>	<b>1150</b>

Le tableau 3 montre que l'ensemble des 1150 barrières ont pu être observées. Le tableau 4 ajoute une précision sur ces barrières. Parmi les 1150 barrières théoriques (lignes du plan cadastral) observées, seulement 937 barrières étaient bien présentes sur les lignes du plan cadastral. Ainsi, 213 lignes du plan cadastral n'étaient pas des barrières.

*Tableau 5 : Classification des 1150 barrières observées réparties selon leur type de perméabilité*

		Classes			Total général
		Imperméable	Perméable	Semi-perméable	
Type de barrière	Beton		120		120
	Cloture	52			52
	Glissière		4		4
	Grillage			54	54
	Haie			181	181
	Herbe		98		98
	Mur	568			568
	Portail	73			73
	<b>Total général</b>	<b>693</b>	<b>222</b>	<b>235</b>	<b>1150</b>

Ce tableau montre la classification des 1150 barrières observées réparties selon leur type de perméabilité. Ainsi, 693 barrières sont dans la classe imperméable comportant 52 clôtures, 568 murs et 73 portails. Il y a 235 barrières dans la classe semi-perméable comportant 54 grillages et 181 haies. Pour finir, il y a 222 barrières dans la classe perméable comportant 120 sols bétonnés, 4 glissières et 98 sols en herbe. Ainsi, 60,26 % des barrières sont imperméables, 19,30 % des barrières sont perméables et 20,44 % des barrières sont semi-perméables.

**Tableau 6 : Répartition en pourcentage des classes de barrières en fonction des différents quartiers de Caen**

Quartier	Imperméable	Perméable	Semi-perméable	Total général
Saint_Jean	98%	0%	2%	100%
Hasting	90%	4%	6%	100%
Centre Ancien	88%	10%	2%	100%
Calmette Saint-Jean Eudes Saint-Gilles	84%	10%	6%	100%
La_Haie_Vigne	82%	8%	10%	100%
Sainte_therese_demi_lune	80%	5%	15%	100%
Beaulieu_Maladrerie_Saint_Paul	74%	12%	14%	100%
Université	68%	18%	14%	100%
Vaucelle	66%	16%	18%	100%
Saint_Ouen	64%	20%	16%	100%
La Verte Vallée	62%	16%	22%	100%
La_Grace_De_Dieu	62%	22%	16%	100%
Bas Venoix Prairie	58%	14%	28%	100%
Calvaire Saint-Pierre	58%	10%	32%	100%
Venoix	50%	16%	34%	100%
Le_Port	46%	30%	24%	100%
La Pierre Heuze	44%	14%	42%	100%
La Folie Cuvrechef	40%	34%	26%	100%
La_Gueriniere	40%	44%	16%	100%
Le chemin Vert	34%	12%	54%	100%
<b>Total général</b>	<b>65%</b>	<b>15%</b>	<b>20%</b>	<b>100%</b>

Ce tableau montre que la classe de barrière dominante est celle des barrières imperméables, avec 65 % du total des barrières observées qui sont dans cette classe. Vient ensuite la classe des barrières semi-perméables comportant 20 % du total des barrières. Enfin, la classe perméable est la moins dominante avec seulement 15 % des barrières qui composent cette classe. Les pourcentages ne sont pas les mêmes que dans le tableau précédent puisque 100 échantillons ont été observés en dehors des quartiers. Les raisons de ces observations sont expliquées en détail dans les limites de l'étude.

Les quartiers avec la plus forte proportion de barrières imperméables sont les quartiers Saint-Jean, Hasting et le Centre ancien avec respectivement 98 %, 90 %, et 88 % de leurs barrières appartenant à cette catégorie.

Le quartier du Chemin Vert est quant à lui majoritairement composé de barrières appartenant à la classe semi-perméable avec 54 % des barrières qui la composent.

Enfin, dans le quartier de La Guérinière, les barrières perméables sont les plus nombreuses, constituant 44 % des barrières de ce quartier.

**Tableau 7 : Moyenne des surfaces calculées dans les tampons en fonction de l'occupation du sol**

Surface calculé	Moyenne en m2
Attractive	101
Bâti	73
Routes	51
Non bâti	37
Peu fréquent	23
Structurante	15
Grande culture	5
Surface perméable	5
Surface en eau	1

Lors du calcul des surfaces des tampons, l'occupation du sol la plus intersectée en superficie moyenne est l'occupation attractive avec 101 m<sup>2</sup>, suivie par celle des bâtis avec ses 73 m<sup>2</sup>. Les surfaces en eau et les surfaces perméables sont quant à elles minoritaires dans les surfaces moyennes des tampons, avec respectivement 1 m<sup>2</sup> et 5 m<sup>2</sup>.

## 2) Évaluation des barrières urbaines à Caen à l'aide d'un modèle prédictif : Performances et limites

```
> rfClasses <- predict(rfFit, newdata = Tableau_Test)
> Tableau_Test$Classe <- as.factor(Tableau_Test$Classe)
> confusionMatrix(data = rfClasses, Tableau_Test$Classe)
Confusion Matrix and Statistics
```

Prediction	Reference		
	Imperméable	Perméable	Semi-perméable
Imperméable	166	23	45
Perméable	11	13	6
Semi-perméable	13	8	14

Overall statistics

```
Accuracy : 0.6455
95% CI : (0.5884, 0.6997)
No Information Rate : 0.6355
P-Value [Acc > NIR] : 0.3839
```

Kappa : 0.2334

Mcnemar's Test P-Value : 5.995e-05

Statistics by class:

	Class: Imperméable	Class: Perméable	Class: Semi-perméable
Sensitivity	0.8737	0.29545	0.21538
Specificity	0.3761	0.93333	0.91026
Pos Pred Value	0.7094	0.43333	0.40000
Neg Pred Value	0.6308	0.88476	0.80682
Prevalence	0.6355	0.14716	0.21739
Detection Rate	0.5552	0.04348	0.04682
Detection Prevalence	0.7826	0.10033	0.11706
Balanced Accuracy	0.6249	0.61439	0.56282

*Figure 29 : Résultat de l'entraînement du modèle statistique prédictif avec le modèle des forêts aléatoires*

Le modèle des forêts aléatoires a été utilisé pour prédire les classes des barrières (imperméable, perméable et semi-perméable) de l'ensemble des lignes du plan cadastral en utilisant les différentes surfaces autour d'elles comme variables explicatives.

La matrice de confusion montre que 166 barrières imperméables, 13 barrières perméables et 14 barrières semi-perméables ont été correctement classifiées. 68 barrières imperméables, 17 barrières perméables et 21 barrières semi-perméables ont donc mal été prédites.

La précision du modèle est de 65 % mais l'intervalle de confiance indique que l'exactitude du modèle est comprise entre 59 % et 70 %. Les prédictions du modèle sont significativement différentes aux classes réelles au vu du faible coefficient Kappa et de la P-value du test de McNemar.

En ce qui concerne les statistiques par classes : 87.37 % des barrières imperméables sont correctement identifiées ainsi que 29,55 % pour les perméables et 21,54 % pour les semi-perméables. Les valeurs prédictives positives indiquent que 70.94 % des prédictions de la classe des imperméables sont correctes, 43.33 % pour la classe des perméables et 40 % pour celle des semi-perméables.

### **3) Modélisation des réseaux écologiques du hérisson à Caen : Identification des points stratégiques pour la conservation**

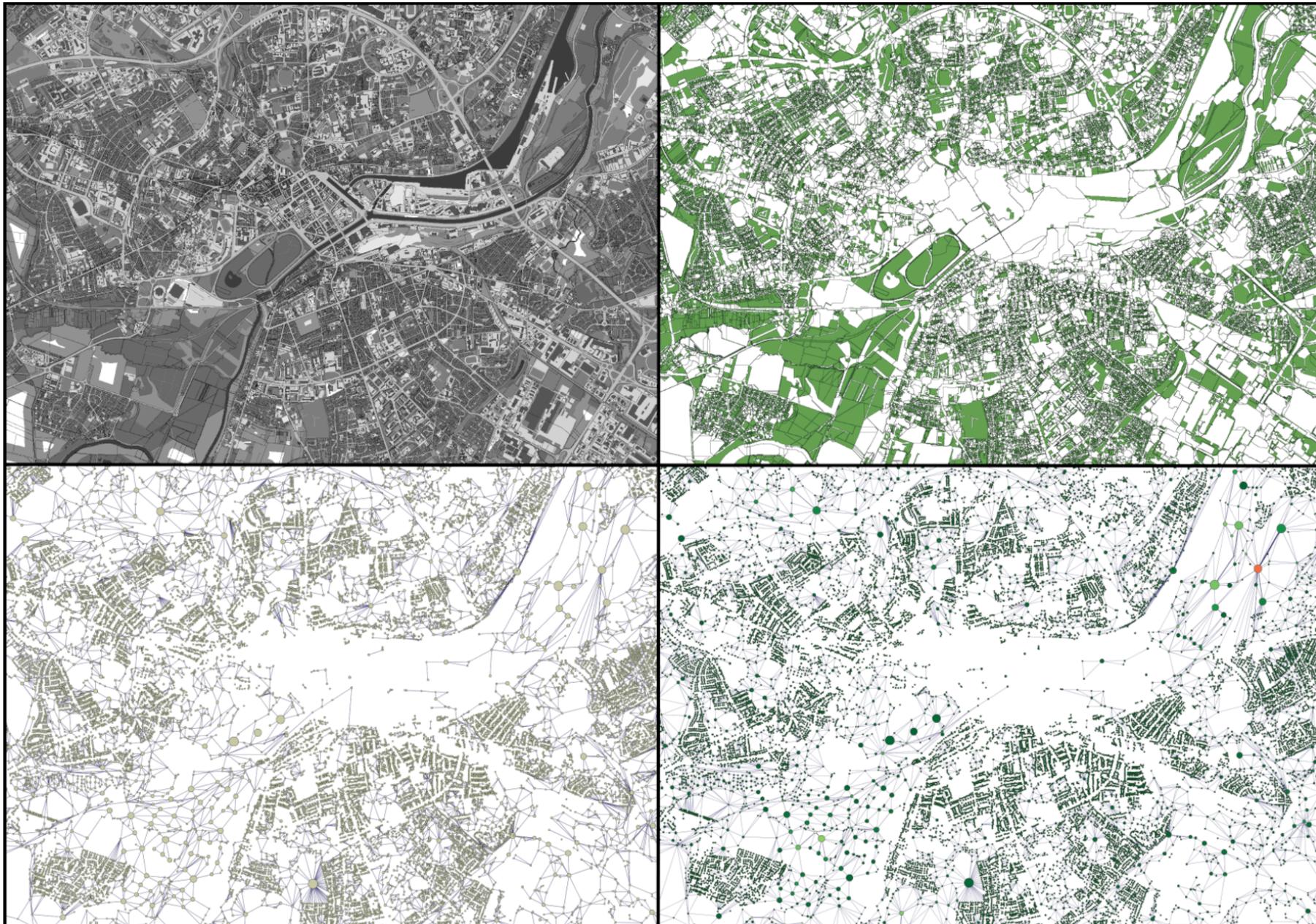
La carte des corridors de Caen (Figure 30) montre en vert les corridors théoriques du hérisson avec 46 615 de distance coût, soit 400 m de distance de dispersion quotidienne. Des grandes tâches sont reliées entre elles principalement à l'extérieur du centre ville, et un manque de corridor dans le centre ville. Il y aussi la présence de petits corridors un peu partout dans la zone d'étude ainsi que des corridors linéaires assez grands traversant de grandes zones.



*Figure 30 : Carte des corridors empruntés par les hérissons dans la ville de Caen. Source : Etienne Valognes*

La figure 31 est séparée en 4 cartes distinctes. La figure 31.a (en haut à gauche) représente la carte du paysage de la ville de Caen. Dans la figure 31.b (en haut à droite) sont représentés en vert les habitats préférés du hérisson reliés par les différents chemins qu'ils peuvent prendre. La figure 31.c (en bas à gauche) représente le graphe paysager avec un élagage des chemins à 400 m de distance de dispersion quotidienne, soit 46 615 en distance coût.

La figure 31.d (en bas à droite) représente la métrique de centralité intermédiaire appliquée au graphe paysager permettant d'évaluer la fréquence d'utilisation des habitats au sein du graphe. Bien que cela semble contradictoire, plus la couleur de la tache est rouge, plus elle est importante et stratégique dans le réseau écologique. Ainsi, au Nord-Est de Caen, se trouve un endroit stratégique dans le réseau écologique. Le reste des taches de la ville sont de la même couleur, soit vert foncé, donc peu stratégique pour le réseau écologique.



*Figure 31 : Les différentes étapes pour représenter le réseau écologique du hérisson dans la ville de Caen. Source : Etienne Valognes*

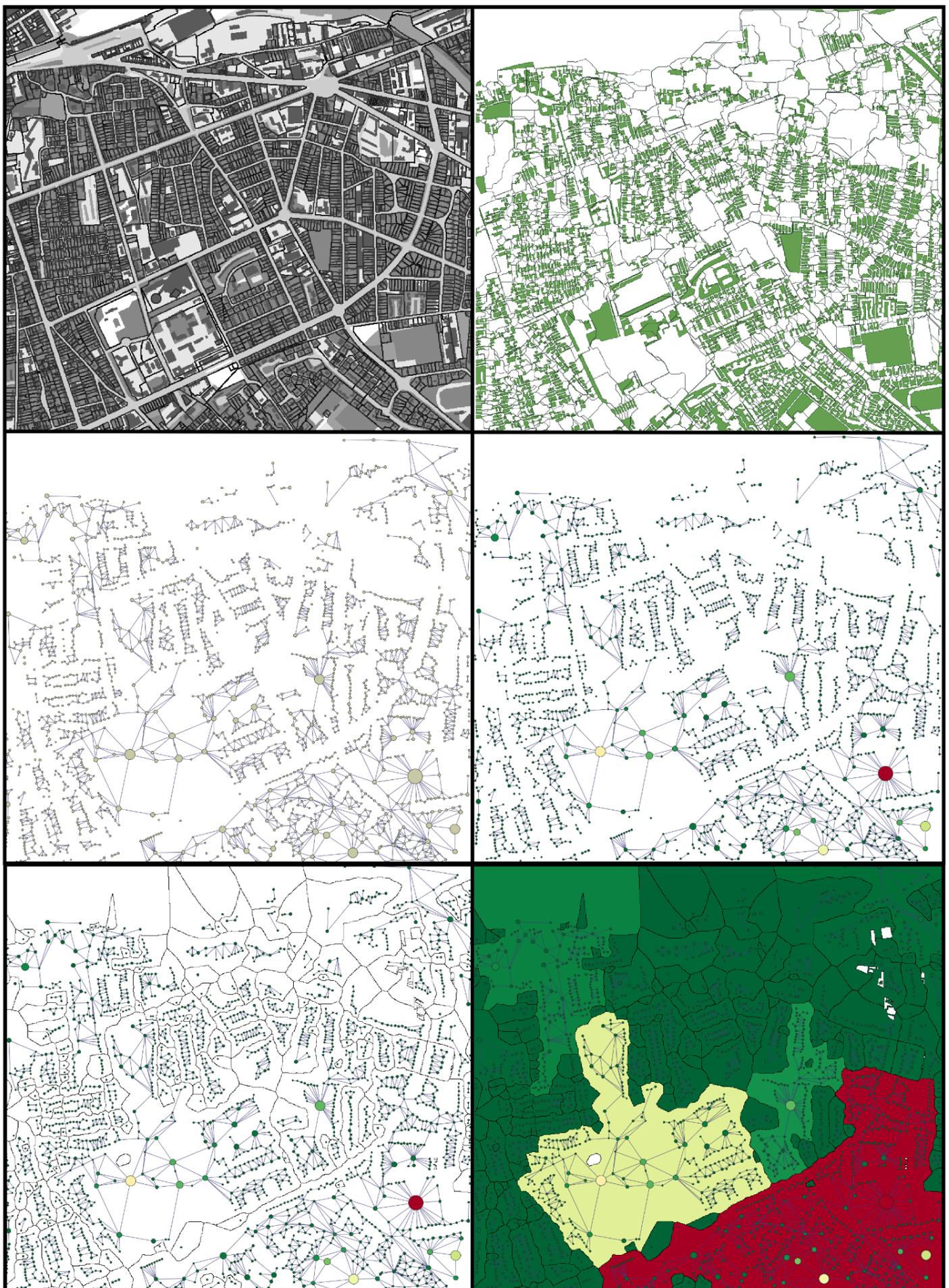
La Figure 32 est aussi décomposée en 6 parties. La figure 32.a (en haut à gauche) représente la carte du paysage du quartier Sainte-Thérèse Demi-Lune. La figure 32.b (en haut à droite) représente en vert les habitats préférentiels du hérisson reliés par les différents chemins qu'ils peuvent prendre.

Au milieu à gauche se trouve la figure 32.c, qui représente le graphe paysager avec un élagage des chemins à 400 m de distance de dispersion quotidienne, soit 46 615 en distance coût. La figure 32.d (au milieu à droite) montre le delta-métrique de probabilité de connectivité appliqué aux nœuds du graphe paysager permettant de voir leur importance en fonction de leur capacité et de leur placement dans le graphe.

Au sud-est se trouve un nœud coloré en rouge, indiquant un habitat avec une grande capacité et une place importante dans le réseau. Au sud-ouest se trouve un habitat stratégique dans le réseau, bien que moins important que celui situé au sud-est. Ces différents nœuds stratégiques sont des nœuds-clés. Celui situé au sud-ouest est visuellement plus parlant puisqu'il relie deux clusters différents situés à l'est et à l'ouest de celui-ci.

La figure 32.e (en bas à gauche) montre les différentes composantes du graphe paysager. Puisque le graphe est composé de plusieurs composantes, alors le graphe est dit non connexe. En effet, les différents clusters qui composent le graphe paysager ne sont pas tous reliés entre eux.

Enfin, la figure 32.f (en bas à droite) montre la probabilité de connectivité appliquée aux différentes composantes. Plus les composantes sont stratégiques, plus elles sont rouges. Ainsi, les composantes situées au sud-est et au sud-ouest sont plus importantes que les autres composantes du graphe.



*Figure 32 : Les différentes étapes pour représenter le réseau écologique du hérisson dans le quartier sainte-thérèse demi-lune. Source : Etienne Valognes*

# **DISCUSSION**

## **A) Analyse des résultats**

### **1) Évaluation de l'efficacité des méthodes d'observation à distance des barrières urbaines**

L'intégralité des barrières a pu être observée, prouvant l'efficacité et la robustesse des différentes méthodes d'observation. Bien que certaines zones soient inaccessibles ou trop difficiles à surveiller, il a toujours été possible de les observer en alternant les différentes méthodes d'observations en distanciel ou bien, en dernier recours, en réalisant les observations en présentiel.

18,5% des lignes du plan cadastral observées n'ont pas révélé la présence de barrière. Cela peut être expliqué par différents facteurs environnementaux. En effet, certaines parcelles cadastrales sont délimitées administrativement, traversant donc des routes, des trottoirs ou des accotements. Cette perte de données est liée à des données du plan cadastral qui n'ont pas été mises à jour pour cette étude. Cette limite d'étude est expliquée plus en détail par la suite.

Le manque de présence de barrières est un problème réglé par la classification de ces barrières en les considérant alors comme perméables, présentant alors une très faible résistance aux déplacements des hérissons.

#### **1.1) Dominance des barrières imperméables dans la ville de Caen : Impact sur la connectivité écologique**

Le tableau 4 montre bien que les barrières imperméables aux déplacements sont présentes. Au sein de cette classe, ce sont les murs qui montrent une dominance parmi les différents types de barrières, puisque les murs composent à 82 % les barrières imperméables. Les murs sont donc le type de barrière le plus utilisé pour délimiter les parcelles cadastrales dans la ville de Caen. Cela s'explique par le fait qu'une majorité des habitations en centre ville sont juxtaposées aux autres, ne pouvant être séparées que par des murs.

Chaque habitation ne dispose pas d'un jardin, et quand bien même une parcelle cadastrale en comprendrait un, la délimitation la plus employée reste la mise en place d'un mur.

La classe des barrières imperméables étant majoritaire, cela montre bien que ces barrières sont un réel frein aux déplacements de la faune en ville. L'imperméabilité de ces barrières est un facteur extrêmement important à prendre en compte pour l'étude des corridors écologiques que les hérissons empruntent en ville. Des quartiers entiers peuvent utiliser des barrières imperméables, cloisonnant des habitats potentiels et donc des ressources essentielles pour les hérissons.

En ce qui concerne la classe des barrières semi-perméables, elle est majoritairement composée de haies. Cependant, comme expliqué précédemment, il est fortement possible qu'au sein de ces haies, se trouvent des grillages qui ne sont pas visibles à cause d'une forte densité de végétation. Ces haies restent, à ce stade, l'un des éléments les plus incertains de l'analyse. Par la suite, une analyse qualitative de la présence de grillages et de leur qualité devrait apporter des éléments qui, quand bien même ils ne pourraient pas être intégrés aux graphes paysagers, permettraient au moins d'obtenir des éléments d'analyse complémentaires.

La classe des barrières perméables est quant à elle dominée par la catégorie béton. En effet, cette étude se plaçant en zone urbaine, les surfaces artificialisées et imperméables qui sont représentées par la couverture des surfaces non bâties sont assez nombreuses, expliquant donc la forte présence de sol bétonné. Cela explique aussi le fort nombre de données de non présence de barrière lors des observations.

## **1.2) Disparités spatiales des types de barrières dans les quartiers de Caen : Conséquences pour les corridors écologiques**

Comme le montre le Tableau 6, parmi les 20 quartiers observés, 18 ont une prédominance aux barrières imperméables. Seulement, les quartiers de la Guérinière et du Chemin Vert ont une prédominance pour les barrières perméables et semi-perméables. Les quartiers qui se distinguent par une proportion extrêmement élevée de barrières imperméables

sont les quartiers de Saint-Jean, Hasting ou le Centre ancien, qui sont situés au cœur du centre-ville de Caen. Le centre-ville de Caen est une zone extrêmement hostile au hérisson, en raison de la très forte présence de barrières imperméables, de son architecture très urbanisée et de son manque de végétation. La résistance au déplacement est donc très élevée dans ces quartiers.

Le Chemin Vert est le quartier possédant le moins de barrières imperméables (34 %). La majorité des barrières de ce quartier sont des barrières semi-perméables, indiquant donc une forte présence de haies ou de grillages. Ces barrières sont donc un gain de perméabilité en comparaison au centre ville. Les haies y sont plus nombreuses et peuvent donc former de nombreux corridors écologiques, indiquant au passage que le nom de ce quartier a bien été choisi. La faible présence de barrières imperméables dans ce quartier, ainsi que celui de La Guerrière, suggèrent qu'ils sont des environnements plus favorables à la connectivité écologique du hérisson, pouvant permettre un passage plus facile à la faune urbaine.

En revanche, il faut aussi prendre en compte la faible proportion d'échantillons par quartier. En effet, seulement cinquante échantillons ont été analysés par quartier (sauf pour le quartier de Sainte-Thérèse Demi-Lune pour des raisons évoquées par la suite). Pour finir, les zones possédant une forte densité de barrières imperméables pourraient être des zones à traiter prioritairement pour des projets comme Piqu'en ville, dans le but de créer de la perméabilité de passage dans ces barrières. Cependant, il est également nécessaire de prendre en compte qu'un accroissement de la perméabilité des passages dans ces quartiers sans connectivité plus large avec les corridors écologiques n'entraînera pas une présence accrue du hérisson.

### **1.3) Analyse des surfaces urbaines et leur rôle dans la connectivité des habitats pour la faune**

La moyenne des surfaces attractives est la plus élevée parmi les autres catégories de surfaces, suggérant que les jardins, donc les habitats potentiels, occupent une place importante dans le paysage étudié. La surface des bâtiments est la deuxième moyenne la plus importante, reflétant la nature urbaine du terrain d'étude. Les surfaces attractives ont donc un rôle clé dans cette connectivité écologique, puisqu'elles peuvent offrir de grands espaces d'habitat qui servent de refuge dans cet environnement urbanisé.

Les surfaces des routes et des non-bâties sont aussi liées aux infrastructures urbaines. La présence relativement élevée des routes suggère qu'elles doivent être fréquemment ou obligatoirement utilisées par la faune pour se déplacer entre deux habitats. Ces voies de déplacements peuvent être mortelles lorsqu'elles sont empruntées. Elles représentent donc un facteur important dans la fragmentation des habitats en milieu urbain.

Les espaces non bâtis de cette étude, constituent quant à eux des espaces ouverts pouvant être traversés sans risque de mortalité. Il faut rappeler que les données relatives aux routes ont été extraites depuis l'occupation du sol des non bâti, puis ont été intersectées avec pour retirer les routes des non bâti. C'est pour cela qu'il est possible d'affirmer qu'ils ne représentent pas de risque de mortalité.

Les autres catégories de surface calculée possèdent une moyenne assez faible. Ces surfaces sont donc une partie réduite du paysage urbain. Elles peuvent donc avoir un rôle ayant une importance moindre dans les créations et les améliorations des corridors.

Cependant, ces résultats ne sont que des surfaces calculées provenant d'un échantillon d'entités et ne représentent donc pas l'entièreté des surfaces de la zone d'étude. En effet, une fois sortie de la ville de Caen, les surfaces des grandes cultures sont très importantes, mais puisque l'échantillonnage a été réalisé au sein de la ville de Caen, ces surfaces sont ici sous-représentées.

## **2) Performance et limites du modèle prédictif pour la classification des barrières urbaines**

La précision de 65 %, obtenue avec le modèle des forêts aléatoires, montre bien une performance modérée du modèle. Le coefficient de Kappa (0,23) ainsi que la P-value du test de McNemar sont faibles, indiquant que le modèle ne distingue pas correctement les classes, et en particulier les classes perméables et semi-perméables.

La classe "imperméable" a la meilleure sensibilité (87,37 %), comparée aux deux autres classes, mais elle est aussi la classe contenant le plus d'entités. Il est important de souligner le fait que la classe "imperméable" représente plus de 63.55 % des observations

dans le tableau test. La forte disparité entre les entités peut provoquer un problème dans la prédiction. En effet, le modèle des forêts aléatoires peut sur-prédire la classe majoritaire à défaut des classes minoritaires, puisque celle-ci représente une probabilité plus faible d'erreur sans prendre en compte les variables explicatives. Cela se vérifie avec la valeur élevée de sensibilité pour la classe imperméable (87,37 %) possédant aussi une valeur de spécificité faible (37,61 %).

Ce modèle a une précision globale acceptable, mais n'est pas parfait. Il a donc pour vocation d'être amélioré avec un objectif minimal de 90 % de précision. Cela permettra de représenter au mieux une réalité de terrain. Une fois ce modèle amélioré, il fera l'objet d'une publication scientifique rendant ainsi possible son utilisation par d'autres chercheurs pour intégrer les barrières dans l'analyse des réseaux écologiques des espèces terrestres.

### **3) Analyse du réseau écologique du hérisson**

#### **3.1) Cartographie des corridors écologiques du hérisson : Évaluation des obstacles et des opportunités en milieu urbain**

La cartographie des corridors théoriques du hérisson montre bien que le centre ville lui reste inaccessible, ce qui rejoint les points préalablement discutés suggérant que le paysage urbain du centre ville est majoritairement composé de bâtiments sans espace vert avec une très forte concentration de barrières imperméables créant ainsi, chez le hérisson, une forte résistance aux déplacements.

L'espace de la Prairie est reconnaissable à sa forme et elle est l'un des corridors les plus importants et les plus proches du centre-ville. D'autres parcs, des grands espaces verts ou des grandes cultures sont aussi visibles par cette cartographie, suggérant qu'ils ont une importance majeure dans le réseau écologique du hérisson. Cependant, il conviendra de clarifier l'impact des produits phytosanitaires sur le hérisson pour déterminer la mesure dans laquelle son passage dans les espaces agricoles conventionnels peut présenter des dangers.

Les corridors théoriquement empruntés par le hérisson au Sud-Ouest de cette carte sont intéressants à analyser. En effet, ces routes correspondent aux voies vertes de la Suisse normande ainsi qu'à celle de la vallée de l'Odon, indiquant donc l'importance et l'efficacité de celles-ci dans la trame verte de la métropole caennaise. N'étant pas praticables par les véhicules motorisés, ces voies sont des corridors sans danger aux déplacements du hérisson. La carte des corridors semble donc bien représenter la réalité du terrain, validant ainsi la pertinence de ces espaces comme éléments clés de la connectivité écologique.

Certaines routes ne sont tellement pas empruntées qu'elles sont donc visibles sur cette carte. En effet, les corridors longent les deux côtés de ces routes sans qu'elles soient traversées, dessinant alors le tracé de ces routes. L'exemple le plus frappant dans cette carte est le périphérique situé au Nord de la carte. Bien que le périphérique contourne Caen d'Est en Ouest, il semble soigneusement évité. La raison de son évitement est sa dangerosité qui représente donc un obstacle infranchissable comparé à une route située au centre ville.

Enfin, cette carte montre des petits corridors présents dans l'ensemble de la zone d'étude. La taille de ces petits corridors est causée par l'isolement et le cloisonnement des quartiers, qui ne peuvent pas être reliés avec les autres quartiers. La formation de grands corridors ne peut donc pas se faire.

L'ensemble de cette analyse laisse penser que les différents paramètres, tels que les coûts attribués dans le logiciel de Graphab, ainsi que la distance de déplacement de l'espèce attribuée, sont bien renseignés et représentent au mieux la réalité de terrain. Cette approche visuelle et analytique permet de représenter les corridors écologiques potentiels et les zones de rupture. Cette carte offre alors la visualisation des zones nécessitant une intervention opérationnelle permettant de limiter la fragmentation des habitats. Ces résultats permettent ainsi d'accompagner la réflexion d'initiatives privées comme Piqu'en Ville dans les politiques publiques d'aménagement du territoire.

### **3.2) Conséquence de l'urbanisation sur la connectivité des habitats du hériçon : Une modélisation basée sur le graphe paysager**

La ville de Caen montre une forte présence de petits habitats potentiels au Nord et au Sud. Ce sont majoritairement des jardins particuliers. Le Nord-Est et le Sud-Ouest montrent une forte présence de grands habitats potentiels, avec la Prairie et les terrains de grandes cultures.

Le graphe paysager permet de distinguer les différentes tailles d'habitats avec la taille des nœuds du graphe. Les quartiers et certaines routes linéaires sont aussi distinguables. Le graphe paysager présente bien la fragmentation des habitats, puisque certaines zones pavillonnaires ne sont pas reliées avec les autres habitats. Comme expliqué précédemment, cela peut s'expliquer par le fait que les routes sont dangereuses et présentent donc une résistance au déplacement assez forte. De plus, l'imperméabilité de certaines barrières est aussi un facteur de fragmentation à prendre en compte.

La métrique de centralité intermédiaire montre que le nœud situé au Nord-Est est stratégique dans le réseau écologique par son nombre de liens qui le relie aux autres habitats. Cet habitat est donc fortement utilisé comme point de passage pour accéder aux autres habitats. La raison de l'importance de ce nœud peut être expliquée par sa localisation. En effet, ce nœud est situé sur l'ancien site de la SMN (Société Métallurgique de Normandie).

La SMN est un ancien site industriel majeur installé dans la ville de Colombelles. Plus de 6 000 personnes y travaillaient à son pic d'activité des années 1970. Cette usine a fermé ses portes en 1993 et ses 160 hectares sont restés à l'abandon jusqu'à la reconversion partielle du site dans les débuts des années 2000. Cependant, une grande partie du terrain du site est encore aujourd'hui perméable et herbeuse. C'est notamment le cas avec la ferme solaire de 19,5 ha qui a été construite. Les panneaux solaires sont simplement disposés sur l'ancien grand pré sans avoir imperméabilisé son sol. L'ancien site de la SMN reste donc très ouvert et est relié à d'autres parties qui ont été rachetées. C'est pour cette raison que ce terrain reste un habitat stratégique dans la connectivité du réseau écologique du hériçon.

### **3.3) Analyse de la modélisation du réseau écologique du hérisson dans le quartier Sainte-Thérèse Demi-Lune**

L'analyse de ce quartier permet une plus grande précision et une meilleure visualisation du réseau écologique du hérisson. Le graphe paysager représenté dans la figure 30.c permet de se rendre compte de la fragmentation des habitats de ce quartier, mais la figure 30.e le montre davantage avec la disposition des différentes composantes qui la composent.

Cette fragmentation est à la fois causée par les routes, puisque le tracé de celles-ci est devinable depuis le graphe paysager, mais aussi causée par la disposition des barrières. La figure 30.a, montrant la carte du paysage permet de voir le cloisonnement des différents habitats causé par ces barrières au sein des différentes rues.

Le delta métrique utilisé dans la figure 30.d montre bien les nœuds importants situés au sud-est et au sud-ouest. Le nœud situé au sud-est est le stade de foot Jean Tocquer composé de deux terrains de foot. Ce grand terrain en herbe est situé au cœur des habitations, rendant donc ce lieu stratégique pour la connectivité du Réseau écologique du hérisson.

Quant au nœud situé au Sud-Ouest, il correspond au parc Claude Decaen. Il est composé de pelouses, d'un bassin et d'un jardin de plantes vivaces, faisant en tout une superficie de 4 hectares. Comme pour le stade, il est situé au milieu des habitations, et favorise donc lui aussi le déplacement entre les différents habitats. Le parc est donc un lieu stratégique, bien qu'il le soit moins par rapport au stade de foot.

Cette différence de connectivité peut s'expliquer par le fait que le parc est délimité par des barrières et est entouré d'habitats eux aussi cloisonnés. Ce qui n'est pas le cas avec le stade, étant donné qu'il est situé en milieu ouvert à côté de grands terrains en herbe.

Cette différence de connectivité est montrée avec la métrique par composante calculée dans la figure 30.f. Toute la partie sud de la carte constitue une seule composante, montrant alors que le réseau écologique est étendu ici, et qu'il est moins étendu, donc moins stratégique autour du parc.

## **B) Limites de l'étude :**

### **1) Actualisation des données**

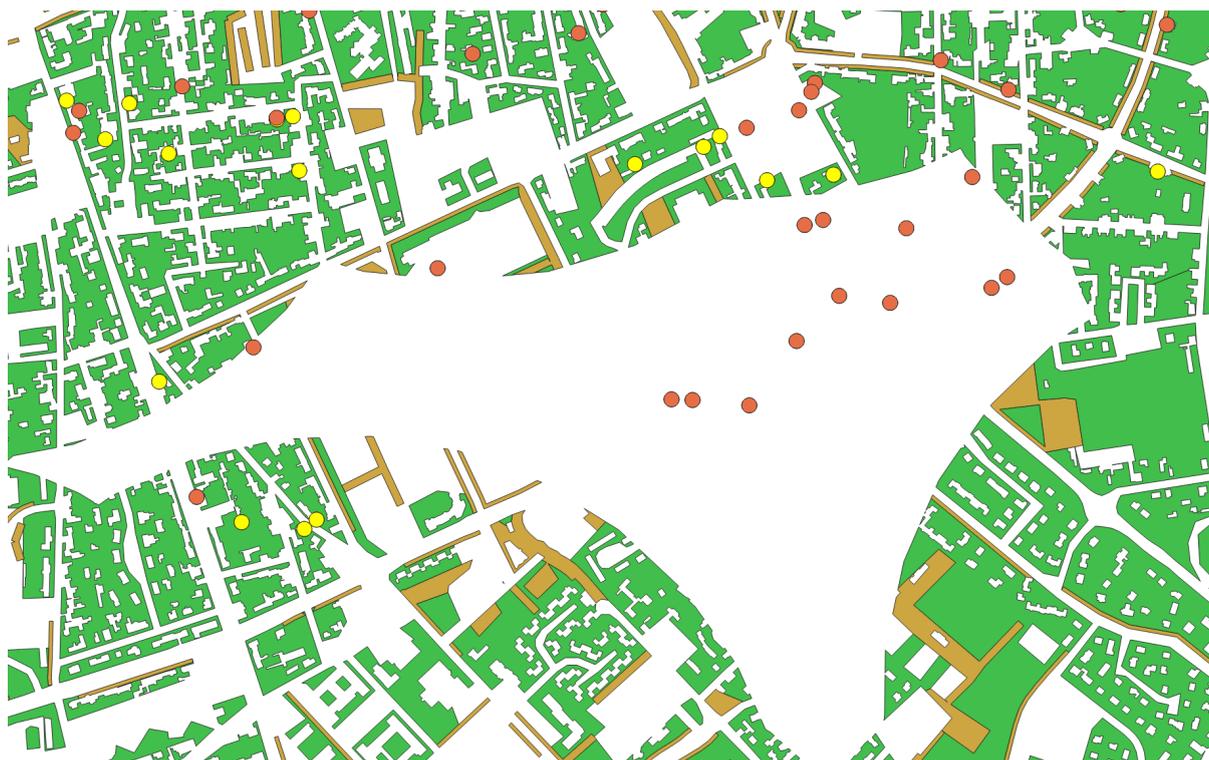
#### **1.1) Impact de l'actualisation des données AUCAME sur l'analyse écologique : Perspectives pour 2024**

Les données du MOS de Caen ainsi que de la sous-trame agricole extensive provenant de l'AUCAME ont été produites en 2020 et ne sont pas encore actualisées. Cependant, après avoir contacté les gestionnaires de l'AUCAME, une actualisation des données est prévue pour la fin d'année 2024. Cette actualisation va permettre, pour l'année prochaine, de reproduire une carte du paysage récente, permettant d'intégrer les occupations du sol mises à jour qui feront suite à l'ensemble des travaux des quatre dernières années à Caen.

#### **1.2) Correction d'un artefact de données dans le quartier Sainte-Thérèse Demi-Lune : Conséquences sur l'analyse écologique**

De plus, cette actualisation va permettre de réparer les erreurs de traitement dans la carte de la sous-trame agricole extensive. En effet, un artefact d'une taille assez conséquente est situé en plein milieu du quartier Sainte-Thérèse Demi-Lune (Figure 33). Ça représente donc un manque de données conséquent pour la zone de l'artefact. C'était un problème préoccupant puisqu'il s'agit d'un quartier très important pour cette étude car le quartier est situé proche du centre ville et est composé de maisons pavillonnaires avec beaucoup de jardins, terrain propice pour constituer les habitats potentiels du hérisson.

Pour remédier à cette problématique, il a fallu ruser. Les données de la sous-trame agricole extensive sont composées à partir des éléments de la carte d'occupation du sol. Il a donc fallu extraire les données des formations herbacées du MOS correspondant à la zone de l'artefact puis de l'ajouter à celle de la sous-trame. Ce rafistolage de données a certes permis de récupérer les informations importantes (les habitats privilégiés) pour le logiciel Graphab mais a aussi causé du tort lors du calcul des surfaces.



*Figure 33 : Artéfact dans les données de la sous-trame agricole extensive*

En effet, malgré les étapes préliminaires au calcul des surfaces, ayant permis de ne plus avoir des occupations du sol qui se superposent entre elles, 38 lignes du plan de cadastre observées ont été corrompues à cause de l'artefact. Ces données ont donc été retirées du jeu de données pour entraîner le modèle statistique prédictif. La raison exacte reste encore inconnue, mais une grande partie des tampons situés dans la zone de l'artéfact corrigé ont eu une surface supérieure ou doublée par rapport à la surface maximale que peuvent contenir les tampons. Comme expliqué dans la partie 1.4.a, l'aire totale d'un disque de tampon fait 309 m<sup>2</sup>. C'est pour cette raison que toutes les données au-dessus de cette somme ne peuvent pas être exploitables pour l'entraînement du modèle.

Lors de la prédiction de la totalité des lignes du plan cadastral de Caen, les barrières situées dans la zone de l'artéfact ont aussi été prédites. Cependant, une partie de ces barrières ont des surfaces possédant une aire supérieure au maximum possible. Estimant qu'il était préférable de garder l'intégralité des barrières pour l'analyse du réseau écologique, ces données n'ont pas été supprimées. Toutes ces problématiques ne poseront plus aucun problème par la suite, puisqu'elles seront certainement résolues avec l'actualisation des données de l'AUCAME.

### **1.3) Mise à jour du plan cadastral : Implications pour la modélisation écologique du hérisson**

Les données ayant permis l'obtention des parcelles cadastrales de cette étude proviennent de la BD parcellaire datant de 2017. Cependant, la BD parcellaire n'est plus mise à jour et est figée. Des plans cadastraux plus récents peuvent être récupérés à partir du produit parcellaire express (PCI). Cette donnée est diffusée trimestriellement par la DGFIP. Ainsi, il sera possible d'utiliser cette donnée correspondant à la même période d'actualisation des données de l'AUCAME. En effet, l'ensemble des jeux de données doivent correspondre à une période similaire afin d'améliorer la précision de la classification du modèle statistique prédictif ainsi que les analyses du réseau écologique qui s'ensuit.

## **2) Lignes du plan cadastral**

### **2.1) Limites de la classification des barrières dans le plan cadastral : Un impact sur la précision des modèles écologiques**

L'utilisation des lignes du plan cadastral pour identifier les barrières ne permet pas d'identifier l'intégralité des barrières de la zone d'étude. En effet, les barrières disposées à l'intérieur d'une parcelle cadastrale ne peuvent pas être prises en compte avec la méthode employée. Par exemple, un particulier peut rajouter du grillage dans son jardin afin de délimiter son terrain pour la construction d'un poulailler. Ce grillage reste un frein au déplacement du hérisson, mais n'est pas pris en compte dans la modélisation. Ainsi, plus une parcelle cadastrale est grande et plus elle peut contenir des barrières qui ne peuvent pas être représentées dans ce modèle.

### **2.2) Disparités dans la représentation des barrières physiques : Repenser la classification des lignes cadastrales**

Lors de la catégorisation des lignes du plan cadastral, une partie a été catégorisée en "herbe" et "béton". Elles ont alors été réunies ensemble pour former la classe "Sol". Le postulat de départ était de penser que chaque ligne du plan cadastral était en réalité des barrières. Cependant, lors des observations, ce n'était pas toujours le cas.

Les parcelles cadastrales ne sont pas toujours bien délimitées et il est arrivé que des lignes du plan cadastral coupent des routes, des champs ou des terrains en herbe n'étant pas des barrières physiques.

C'est pour cette raison qu'il a été important de réaliser une classification pour former la classe "sol". Grâce à cela, le modèle statistique prédictif a permis de corriger ce problème en prédisant la classe de ces lignes et en leur attribuant un faible coût de résistance au déplacement dans le logiciel Graphab.

### **3) L'échantillonnage**

#### **3.1) Inclusion de données supplémentaires dans l'échantillonnage : Révisions et ajustements méthodologiques**

L'énonciation de 1000 échantillons pour cette étude n'est pas tout à fait exacte. En réalité, il y a eu 1150 échantillons qui ont été créés et observés. En effet, il y a eu une première observation de terrain réalisée dans le quartier Sainte-Thérèse Demi-Lune servant d'observation test. Ce quartier était composé de 100 lignes du plan à observer en une journée, et cela uniquement en étant sur le terrain. Cette observation test a permis de se rendre compte des limites de terrain. Il était seulement possible d'observer les lignes du plan cadastral depuis la rue. De plus, il a fallu suivre pendant 6h un trajet de 13 km établi à l'avance pour permettre d'optimiser l'ordre des observations de terrain.

Un premier bilan a donc été établi à la suite de cette observation test, permettant de réajuster le nombre d'échantillons par strate, donc par quartier, puisqu'il n'était pas réalisable d'observer autant d'échantillons par strate dans le temps imparti. C'est pour cela que le nombre d'échantillons a été descendu à 50 par strate et que les observations ont été réalisées en distanciel grâce aux différents outils géospatiaux.

Les 100 échantillons du quartier de Sainte-Thérèse Demi-Lune étant déjà observés, ils ont donc été conservés dans le total des échantillons. Ces échantillons sont par ailleurs bien représentés dans la carte de la figure 17 dans la partie Échantillonnage aléatoire, page 47.

En ce qui concerne les 100 échantillons restants ajoutés mais non mentionnés, ce sont des échantillons représentatifs des occupations du sol des grandes cultures et des surfaces perméables. En effet, après avoir observé et catégorisé les 1050 échantillons aléatoirement stratifiés, il a été remarqué que l'ensemble de ces échantillons n'ont, à aucun moment, été présents sur les occupations du sol des grandes cultures et des surfaces perméables.

Afin d'améliorer l'entraînement du modèle statistique prédictif, 50 lignes du plan cadastral situées sur de grandes cultures et 50 autres sur des surfaces perméables ont été analysées, observées et catégorisées. Ces échantillons n'ont pas été stratifiés de manière aléatoire, car ils ont été sélectionnés par un échantillonnage aléatoire simple. Par conséquent, ils n'appartiennent pas à une strate spécifique.

### **3.2) Optimisation de la création des tampons pour l'analyse écologique : Méthodologies et recommandations futures**

La création des tampons autour des échantillons de barrière n'a pas été correctement réalisée. Les centroïdes ont été placés au centre des lignes du plan cadastral pour réaliser des tampons circulaires autour de celles-ci. Cependant, comme les longueurs des lignes du plan cadastral ne sont pas égales, il aurait fallu que les tampons soient de largeur variable le long des lignes afin de prendre en compte la taille de ces lignes.

Dans le cas où les tampons sont construits en fonction de la largeur des lignes du plan cadastral et non plus en fonction d'une zone sphérique centrée sur ces lignes, alors il sera plus complexe de vérifier les problèmes de calcul de surface. En effet, avec la méthode utilisée cette année, toutes les surfaces de tampon font la même taille et, comme vu auparavant, chaque surface supérieure à la valeur maximum peut être identifiée et retirée. Cependant, si les tampons suivent la largeur des lignes du plan cadastral, il sera nécessaire de calculer les surfaces des tampons dans un nouveau champ après leur création, mais avant de les intersecter avec les différentes couches d'occupation du sol. Cela permettra de vérifier que la somme des surfaces des occupations du sol ne soit pas supérieure à la taille initiale du tampon.

Il est aussi possible d'avoir un total de surfaces qui soit inférieur à la taille des tampons. La raison à cela est le fait que l'ensemble des occupations du sol ne couvrent pas l'entièreté de la zone d'étude ou bien que les tampons réalisés soient situés en bord de zone d'étude dépassent celle-ci. Le manque de données d'occupation du sol peuvent donc se retrouver dans la surface des tampons et ne peuvent donc pas être intersectées, créant ainsi un total de surface inférieur à la surface d'un tampon. 35 entités ont eu leur total de surfaces inférieur à la surface maximum dans cette étude. Elles ont donc aussi été retirées pour l'entraînement du modèle.

Pour pallier ce problème, il faudrait remplir la zone d'étude avec toutes les occupations du sol et utiliser la méthode des tampons qui prennent la largeur des lignes du plan cadastral, puis couper ces tampons avec la zone d'étude pour être sûr qu'elles ne dépassent pas celle-ci.

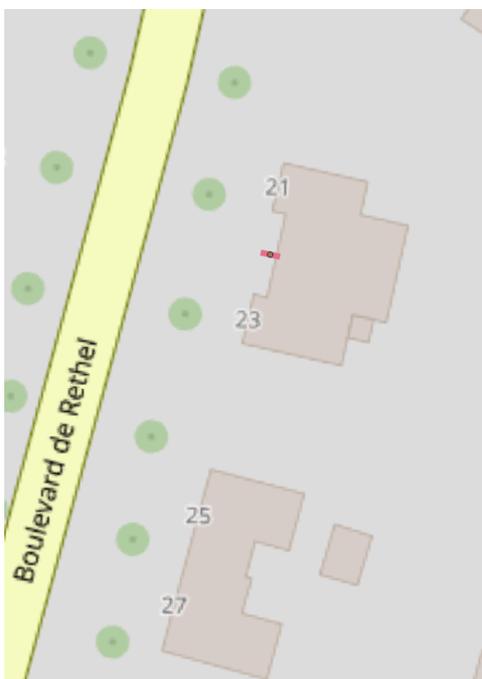
Toutes ces étapes ont été réalisées sur QGIS, mais il aurait fallu les réaliser dans leur intégralité avec le logiciel R. Cela aurait permis de documenter toutes les étapes réalisées et de partager l'intégralité du code, rendant ainsi le processus reproductible par d'autres. Enfin, cela aurait permis d'effectuer différents tests en modifiant certains paramètres sans avoir à répéter l'ensemble des étapes à chaque fois. Par exemple, dans cette étude, la taille des tampons est fixée à 10 m mais ce n'est qu'une valeur arbitraire. Il serait tout à fait possible de définir une échelle de données pour ce paramètre, comprise entre 5 m et 20 m et de voir ensuite quelle variable donne le meilleur résultat pour l'entraînement du modèle statistique prédictif.

#### **4) Limitations des observations de terrain et adaptations méthodologiques**

Comme mentionné précédemment, une journée d'observation test a révélé qu'il n'était pas possible de réaliser des observations de terrain pour toute la zone d'étude. En plus de l'impossibilité d'observer les lignes du plan cadastral situées derrière les maisons, une autre limite est apparue.

Étant donné que les données du MOS ainsi que les données du plan cadastral ne sont pas à jour, il était possible que des lignes du plan cadastral ainsi que des occupations du sol ne soient pas correctes à cause de travaux effectués à postériori de la création de ces données. Les changements physiques urbains peuvent donc expliquer l'absence de certaines barrières.

Par exemple, une grande partie du quartier de Sainte-Thérèse Demi-Lune était en travaux lors de l'observation test. Lors d'un relevé (Figure 34), toutes les maisons pavillonnaires présentes sur le plan cadastral avaient disparu, laissant place à des terrains herbacés destinés à être utilisés pour la construction de futurs immeubles (Figure 35).



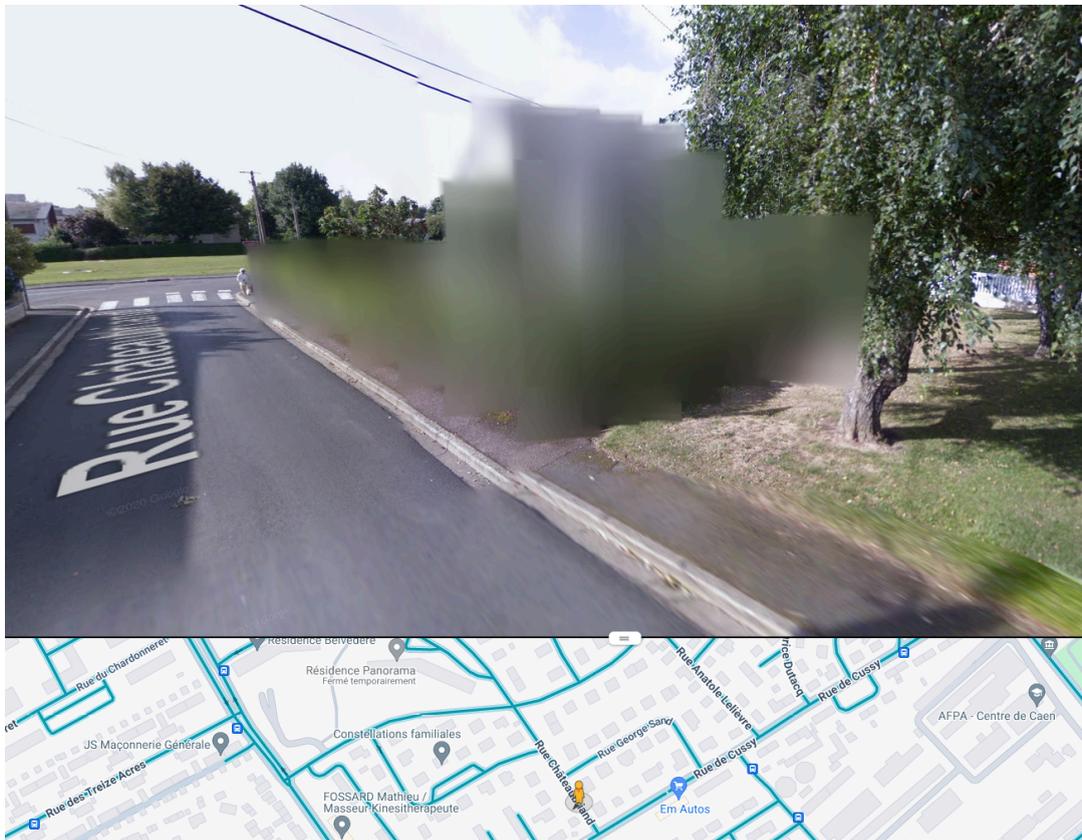
**Figure 34 : Barrière à observer entre le 21 et 23 Boulevard de Rethel**



**Figure 35 : Terrain herbacé au 21 Boulevard de Rethel suite à des travaux**  
*Source : Photo prise par Etienne Valognes*

Les observations à distance ont permis de catégoriser plus rapidement les différents types de barrières et de détecter ce genre de situations, car les données de Google Street View sont plus récentes que celles fournies par l'AUCAME

Cependant, les outils géospatiaux permettant d'effectuer les observations en distanciel ont eux aussi certaines limites et contraintes. Bien que la majorité des observations aient été réalisées avec Google Street View, celui-ci ne permet pas d'observer toutes les maisons depuis les rues puisqu'il est possible de faire une demande auprès de Google afin de flouter sa maison, rendant donc l'observation impossible (Figure 36).



**Figure 36 : Maison floutée rendant l'observation impossible à réaliser avec cet outil**

Pour pouvoir réaliser ce genre d'observation, il a fallu utiliser le second outil géospatial, Google Earth (Figure 37). En effet, les demandes sont bien plus complexes pour ne pas apparaître sur des images satellites. Ainsi il a été possible de catégoriser ces lignes du plan cadastral en “haie” lors de cette observation.



**Figure 37 : Utilisation de Google Earth pour réaliser cette observation**

Cependant, certains bâtiments ne peuvent pas apparaître dans Google Earth pour des raisons de sécurité. C'est notamment le cas des centres pénitentiaires. Ainsi, toute une partie du quartier de Beaulieu-Maladrerie Saint-Paul n'est pas représentée depuis une vue aérienne tridimensionnelle (3D) mais en 2D en plus d'avoir flouté les deux centres pénitentiaires de Caen (Figure 38).



*Figure 38 : Partie du quartier de Beaulieu-Maladrerie Saint-Paul censuré par Google Earth*

Inversement, lorsque ce problème est apparu avec Google Earth, il a alors été possible d'utiliser Google Street View. Ces outils sont complémentaires dans cette démarche d'observation. Dans le cas où il n'était pas possible d'identifier le type de barrière avec ces deux outils, il a alors fallu se rendre sur place pour réaliser une observation de terrain. Parmi les 1150 observations réalisées, seulement 3 ont été réalisées sur le terrain en dépit des autres outils. Cela montre bien l'efficacité de cette méthode.

## **5) Optimisation et application d'un modèle prédictif des barrières urbaines**

### **5.1) Évaluation des performances des modèles prédictifs pour la classification des barrières**

Afin d'avoir les meilleurs résultats pour la prédiction des classes des barrières, plusieurs modèles ont été entraînés et testés avec les mêmes jeux de données. Le modèle des forêts aléatoires a été le plus performant avec une précision de 64,55 %. Le modèle de régression des moindres carrés partiels (Régression PLS) ainsi que le modèle des arbres de décision (Decision Tree) ont été moins performants avec respectivement 63,88 % et 64,21 % de précision. Un quatrième modèle a été testé, combinant les trois modèles pour n'en former qu'un, mais celui-ci a été le moins performant de tous et a donc été abandonné.

La précision du modèle des forêts aléatoires reste globalement acceptable, malgré qu'elle soit significativement différente aux classes réelles. Cette précision est possible uniquement par le fait d'avoir regroupé les différentes catégories de types de barrières en trois classes de perméabilité. En effet, un plus grand nombre de catégories peut introduire davantage de variabilité dans les résultats du modèle, ce qui peut réduire sa précision. Ce regroupement de données a donc été obligatoire pour l'amélioration du modèle au détriment d'informations sur les types de barrière.

Ce modèle permet tout de même une analyse plus poussée des réseaux écologiques en intégrant la perméabilité des barrières. De plus, ce modèle est voué à être amélioré l'année prochaine afin d'atteindre une précision minimum de 90 %. L'actualisation des données de l'AUCAME permettra un meilleur calcul des surfaces d'occupation du sol. Les différentes formes urbaines de la ville de Caen vont être intégrées comme nouvelles variables explicatives. Il sera possible à l'avenir d'intégrer les données du LiDAR haute densité (HD). Le LiDAR est une technique de télémétrie (mesure de distance) qui utilise les propriétés de la lumière, permettant d'élaborer des modèles numériques en 3D allant à 10 points par mètre carré en moyenne. Grâce à la précision de ces données, il est possible d'obtenir les différentes strates de végétation.

Ces différentes strates et cette précision vont donc être utilisées en tant que variable explicative pour l'entraînement du modèle. Cependant, les données du LiDAR HD ne sont pas encore disponibles pour toute la France. En effet, ces données sont encore en cours d'acquisition pour le territoire de Caen.

## **5.2) Assignation des classes de perméabilité aux barrières cadastrales via modélisation**

L'application du modèle sur l'ensemble des lignes du plan cadastral permet donc d'attribuer le type de perméabilité à ces 637 000 barrières théoriques. Cependant, comme énoncé précédemment, il y a un problème de calcul de surface et ces problèmes ne sont pas inhérents aux données des observations. Parmi les 637 780 tampons créés avec le logiciel R, 6200 ont une surface inférieure à la taille standard d'un tampon, et 15 000 sont quant à eux au-dessus de cette taille standard. Ces données sont normalement non valides, mais sont bien présentes dans le modèle, car elles ont tout de même été classifiées. Il vaut mieux avoir des données de barrières imperméables dans le modèle qu'une zone totalement perméable créant des corridors et des habitats préférentiels qui n'existent pas.

Puisque ce problème de calcul perdure dans le logiciel R, cela prouve bien que l'erreur de l'artefact est liée aux données d'occupation du sol, donc possiblement à une erreur de correction d'artefact qui a été évoquée auparavant. Une fois de plus, ces erreurs seront corrigées lors de l'actualisation de l'ensemble des différentes données.

## **6) Modélisation du réseau écologique du hérisson : Défis et solutions**

Certaines problématiques liées à la création de modélisation ont été identifiées. La zone d'étude étant très grande puisqu'elle contient l'ensemble de la ville de Caen avec une résolution du modèle très fine, certaines métriques ne peuvent pas être calculées sur l'ensemble de la zone d'étude. Les delta métriques, de par leur fonctionnement, ne peuvent pas être calculés sur l'ensemble du territoire à cause du trop grand nombre de nœuds et de liens. La puissance de calcul est beaucoup trop élevée pour l'appliquer à l'ensemble de la zone d'étude. C'est pour cette raison que le delta métrique a été appliqué seulement à un quartier, car la puissance de calcul est moindre.

Il serait peut-être possible d'appliquer les métriques les plus gourmandes en puissance de calcul en utilisant la puissance de calcul fournie par le Centre Régional Informatique et d'Applications Numériques de Normandie (CRIANN). En effet, ce centre met à disposition leurs infrastructures informatiques à haut niveau de performance pour les établissements d'enseignement supérieur et de recherche.

La métrique de centralité intermédiaire calculée pour l'intégralité de la zone d'étude ne s'est pas montrée très impactante et a seulement montré un habitat stratégique comparé aux autres. Cette métrique peut être biaisée à cause d'un trop grand nombre de nœuds. En effet, elle montre bien un endroit stratégique, mais une majorité d'autres endroits stratégiques plus petits et plus impactants à l'échelle d'un quartier aurait dû être calculée. C'est pour cette raison que le quartier de Sainte-Thérèse Demi-Lune a été analysé plus en détail, pour voir les endroits stratégiques à plus grande échelle.

Les modélisations du réseau écologique du hérisson présentes dans ce travail ne sont que des ébauches de ce qu'il est possible de faire. Ce mémoire devait à l'origine se consacrer davantage à des analyses et des productions cartographiques de modélisation du réseau écologique du hérisson, mais lors de la réalisation de celui-ci, les barrières se sont avérées être une problématique plus grande et plus importante à prendre en compte dans un premier temps. C'est pour cette raison que l'élaboration de ce mémoire l'a amené à devenir un travail dont l'enjeu central réside dans sa méthodologie. De par les réflexions qu'il a initiées, il permet à quiconque souhaitant modéliser des réseaux écologiques d'intégrer notre modèle de classification des barrières afin d'améliorer la précision des modèles, particulièrement en milieu urbain.

## CONCLUSION

Les routes sont souvent citées comme exemple pour expliquer la fragmentation des habitats, mais les barrières ne sont clairement pas assez prises en compte dans les études des réseaux écologiques. Cela s'explique par un manque de données de recensement des différents types de barrières pouvant être utilisées pour ces études.

La majorité des articles traitant des réseaux écologiques, ne font pas mention de l'engrillagement dans les différents facteurs causant la fragmentation des habitats. Quand elle est mentionnée, c'est donc uniquement dans les limites d'études. Par exemple, Brémaud (2017) explique que certains liens de son modèle sont obsolètes du fait de l'absence d'information sur l'engrillagement des parcelles. De même, dans une étude sur la construction de la trame verte et bleue, un membre d'une institution d'aménagement du territoire mentionne les conséquences significatives des grillages installés sur les voies ferrées, mais souligne leur absence dans les bases de données utilisées (Alphandéry. P, 2012). L'intégration des barrières dans les modélisations de réseaux écologiques n'avait donc jamais été réalisée avant ce mémoire. Ce présent travail, en intégrant pour la première fois les barrières dans les modélisations de réseaux écologiques, représente une innovation scientifique majeure dans ce domaine.

L'intégration des différentes classes de barrières dans les modélisations de réseaux écologiques a fourni des données extrêmement précieuses en représentant au mieux une réalité de terrain. En effet, cette étude a pu montrer que les barrières, en particulier les murs, ont un impact considérable sur la fragmentation des habitats. Cette perte de connectivité écologique a bien été confirmée avec les analyses du graphe paysager ainsi que la cartographie des corridors réalisée avec la modélisation du réseau écologique du hérisson.

C'est pour cette raison qu'il est primordial d'intégrer cette nouvelle donnée dans les futures modélisations de réseau écologique. Grâce à la répliquabilité de la méthodologie développée dans ce mémoire, permettant de recenser les différentes classes de barrières, ce travail permet de contribuer à améliorer ces futures études. De plus, la répliquabilité de cette étude permet de pouvoir étudier les réseaux écologiques des autres espèces terrestres dans d'autres milieux urbains que celui de Caen.

Ce mémoire de M1, consacré à la conception d'une méthodologie innovante dans l'acquisition de nouvelles données, constitue une base solide et une première partie d'une série d'études plus large. En effet, le travail réalisé cette année sera exploité l'année prochaine pour localiser les passages potentiels des espèces, afin d'optimiser l'ensemble du réseau écologique. Par ailleurs, cette étude sera donc consacrée aux modélisations de réseau écologique du hérisson dans la ville de Caen ainsi qu'aux collisions que rencontre le hérisson avec les infrastructures linéaires. Cette future étude s'inscrit dans le projet COLHERIC (analyse spatiale des **COL**lisions potentielles des **HER**issons à **Caen**). Ce projet répond à un appel de projet de recherche de ITTECOP (Infrastructures de Transports Territoires, ECOsystèmes et Paysages). Les cartographies interactives des zones à risque de collision et des zones d'intervention prioritaire seront proposées aux gestionnaires territoriaux ainsi qu'aux associations comme Piqu'en ville comme outil d'aide à la décision.

# **BIBLIOGRAPHIE**

**Alphandéry P., Fortier A., Sourdril A.**, 2012. "Les données entre normalisation et territoire : la construction de la trame verte et bleue", Développement durable et territoires [En ligne], vol. 3, n° 2.

**Arrêté du 23 avril 2007** fixant la liste des mammifères terrestres protégés sur l'ensemble du territoire et les modalités de leur protection.

**Article 11.4.2 du règlement du Plan Local d'Urbanisme de Caen** 2018.

**Article 23 de la LOI n° 2009-967** du 3 août 2009 de programmation relative à la mise en œuvre du Grenelle de l'environnement.

**Article L4251-3 du code général des collectivités territoriales** entré en vigueur le 1er janvier 2021.

**AUCAME**, 2020. Notice La trame verte et bleue de Caen Métropole et ses sous-trames. Auteur : Anne-Sophie Boisgallais.

**AUCAME**, 2020. Diaporama de présentation de l'Aucame

**Alisé Géomatique**, 2018. Dictionnaire Occupation du sol Grande Échelle 2D : Dimension Couverture. Rédacteurs : F. Boret, H. Durand, R. Gaudard.

**Bergès, L., Roche, P., & Avon, C.** (2010). Corridors écologiques et conservation de la biodiversité, intérêts et limites pour la mise en place de la Trame verte et bleue. *Sciences Eaux & Territoires*, (3), 34-39.

**Berthoud G.**, 1982. "L'activité du hérisson européen (*Erinaceus europaeus* L.)", Revue d'Écologie, vol. 36, n° 1, pp. 3-14.

**Braaker, S., & al.**, 2014. "Assessing habitat connectivity for ground-dwelling animals in an urban environment" dans *Ecological Society of America*, preprint.

**Brémaud F., Clauzel C.**, 2017. "La définition des zones de collisions entre un réseau routier et des réseaux écologiques : application au Val d'Oise", Journée Graphab, juin 2017, Paris, France, pp. 43-45.

**Cantat O.**, 2004. "L'îlot de chaleur urbain parisien selon les types de temps", *Norois. Environnement, aménagement, société*, (191), pp. 75-102.

**Carte interactive** du suivi du projet de Piqu'en Ville. <https://piquenville-54.websselfsite.net>.

**Chris Grayling MP is the new Hedgehog Species Champion**, Site de Hedgehog Street.

**Clauzel C., Gaber C., Godet C.**, 2020. Fiches méthodologiques pour la prise en main de Graphab. LADYSS-SNPN.

**Clauzel C.**, 2021. "Réseaux écologiques et connectivité du paysage : De la modélisation spatiale à la gestion de la biodiversité". Thèse de doctorat, Université Paris 1 - Panthéon Sorbonne.

**Clauzel, C.** 2022. « Les réseaux écologiques, une stratégie de conservation pour concilier fonctionnalités écologiques et aménagement du territoire ». *Géoconfluences*, juin 2022.

**Clauzel C., Foltête J.-C., Vuidel G., Girardet X.**, 2022. Graphab 2.8 Manuel d'utilisation. LADYSS-SNPN, 50 p.

**Collins J.P., Kinzig A., Grimm N.B., Fagan W.F., Hope D., Wu J., Borer E.T.**, 2000. "A new urban ecology: modeling human communities as integral parts of ecosystems poses special problems for the development and testing of ecological theory", *American Scientist*, vol. 88, n° 5, pp. 416-425.

**Convention relative à la conservation de la vie sauvage et du milieu naturel de l'Europe** (STE n° 104).

**Defosseux, I.**, 2023. Effets de l'environnement urbain et des traits d'histoire de vie du hérisson d'Europe (*Erinaceus europaeus*) sur la dynamique de ses agents pathogènes (tiques du genre *Ixodes* et *Borrelia burgdorferi* sensu lato). Médecine vétérinaire et santé animale.

**Dowding, C. V., Harris, S., Poulton, S., & Baker, P. J.**, 2010. Nocturnal ranging behaviour of urban hedgehogs, *Erinaceus europaeus*, in relation to risk and reward. *Animal Behaviour*, 80(1), 13-21.

**Emelianoff C.**, 2000. "L'écologie urbaine entre science et urbanisme", Quaderni, vol. 43, n° 1, pp. 85-99.

**Foltête J.-C., Clauzel C., Vuidel G.**, 2012. "A software tool dedicated to the modelling of landscape networks", *Environmental Modelling & Software*, vol. 38, pp. 316-327.

**Foltête J.-C., Vuidel G., Savary P., Clauzel C., Sahraoui Y., Girardet X., Bourgeois M.**, 2021. "Graphab: an application for modeling and managing ecological habitat networks", *Software Impacts*, vol. 8, art. 100065.

**Gerkema, M.P., Davies, W.I.L., Foster, R.G., Menaker, M., & Hut, R.A.**, 2013. The nocturnal bottleneck and the evolution of activity patterns in mammals.

**GIEC.**, 2021: Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. In Press.

**Graphab.** Les outils - Graphab. Disponible à l'adresse : <https://graphab.org/les-outils/>

**Graphab.** Site officiel du logiciel Graphab.

<https://sourcesup.renater.fr/www/graphab/fr/home.html>.

**HelloAsso.** Page sur Piqu'en Ville, un Hérisson dans mon jardin.

<https://www.helloasso.com/associations/groupe-mammalogique-normand/collectes/piqu-caen-un-herisson-dans-mon-jardin>.

**Herter, K.**, 1934. Körpertemperatur und Aktivität beim Igel. *Z. f. vergl. Physiologie*, 20, 511–544.

**Hof, A. R., & Bright, P. W.**, 2010. The impact of grassy field margins on macro-invertebrate abundance in adjacent field edges. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 139(1-2), 83-90.

**Hopkins R.**, 2010. Manuel de transition. De la dépendance au pétrole à la résilience locale, Écosociété, Montréal.

**Hubert P.**, 2008. Effets de l'urbanisation sur une population de hérissons européens (*Erinaceus europaeus*). Thèse de doctorat, Université de Reims.

**Hubert P., Julliard R., Biagiatti S., Poulle M.L.**, 2011. "Ecological factors driving the higher hedgehog (*Erinaceus europaeus*) densities in an urban area compared to rural areas in the region of Paris", *Journal of Mammalogy*, vol. 92, n° 4, pp. 813-821.

**Huijser, M. P., & Bergers, P. J. M.**, 2000. The effect of roads and traffic on hedgehog (*Erinaceus europaeus*) populations. *Biological Conservation*, 95(1), 111-116.

**IUCN.**, 2023. The IUCN Red List of Threatened Species. Version 2023-1. Consulté le 8 juin 2023.

**Jourde, P.**, 2020. *Le hérisson d'Europe: description, comportement, vie sociale, mythologie, observation* (Nouvelle éd.). Paris : Delachaux et Niestlé. ISBN 978-2-603-02720-2.

**Jones, C., Moss, K., & Sanders, M.**, 2005. Diet of hedgehogs (*Erinaceus europaeus*) in the upper Waitaki Basin, New Zealand: Implications for conservation. *New Zealand Journal of Ecology*, 29(1), 29–35.

**Korslund L.M., Floden M.S., Albertsen M.M.S., Landsverk A., Løkken K.M.V., Johansen B.S.**, 2024. "Home Range, Movement, and Nest Use of Hedgehogs (*Erinaceus europaeus*) in an Urban Environment Prior to Hibernation", *Animals*, vol. 14, art. 130.

**Krauz A.**, 2014. "Les villes en transition, l'ambition d'une alternative urbaine", Métropolitiques.eu.

**Kuhn M.**, 2008. "Building Predictive Models in R Using the caret Package", *Journal of Statistical Software*, vol. 28, n° 5, pp. 1-26.

**Larmarange, J.** *Connaître la Multicolinéarité dans la régression.*  
<https://larmarange.github.io/analyse-R/multicolinearite.html>.

**Laurance W.**, 2008. "Theory meets reality: How habitat fragmentation research has transcended island biogeographic theory", *Biological Conservation*, vol. 141, pp. 1731-1744.

*LOI n° 2023-54 du 2 février 2023 visant à limiter l'engrillagement des espaces naturels et à protéger la propriété privée.*

**Luniak M.**, 2004. "Synurbization - adaptation of animal wildlife to urban development", dans Proceedings Of The 4th International Symposium On Urban Wildlife Conservation.

**Macdonald D.W., Newman C.**, 2002. "Population dynamics of hedgehogs in rural landscapes: Implications for conservation", *Biological Conservation*, vol. 106, n° 3, pp. 285-297.

**Maughan N.**, 2012. "Quelles perspectives pour l'écologie urbaine au XXIe siècle: d'un champ de recherche basé sur les interfaces à une discipline scientifique autonome ?", dans SHS Web of Conferences, vol. 3, art. 03001, EDP Sciences.

**Menessier, K.**, 2013. Mode de vie et alimentation du hérisson d'Europe (*Erinaceus europaeus*). Médecine vétérinaire et santé animale.

**Opdam P., Steingröver E., van Rooij S.**, 2006. "Ecological networks: A spatial concept for multiactor planning of sustainable landscapes", *Landscape and Urban Planning*, vol. 75, pp. 322-332.

**Oke T.R.**, 1973. "City size and the urban heat island", *Atmospheric Environment*, vol. 7, n° 8, pp. 769-779.

**Rautio A., Valtonen A., Kunnasranta M.**, 2013. "The effect of railway structure on the mortality of hedgehogs", *Animal Biodiversity and Conservation*, vol. 36, n° 2, pp. 159-168.

**Rondinini C., Doncaster C.P.**, 2002. "Roads as barriers to movement for hedgehogs", *Functional Ecology*, vol. 16, pp. 504-509.

**Savin, I. I.**, 2011. Image du hérisson qui mange un poisson. *Wikipédia*, <https://commons.wikimedia.org/wiki/File.JPG>.

**Stevens D., Refay M.**, 2019. L'engrillagement en Sologne : synthèse des effets et propositions (rapport). Paris : Conseil général de l'environnement et du développement durable et Conseil général de l'alimentation, de l'agriculture et des espaces ruraux.

**United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division.** 2018. World Urbanization Prospects: The 2018 Revision.

**United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division.** 2024. World Population Prospects 2024: Summary of Results. UN DESA/POP/2024.

**Urban D.L., Minor E.S., Treml E.A., Schick R.S.**, 2009. "Graph models of habitat mosaics", Ecology Letters, vol. 12, n° 3, pp. 260-273.

**Ursutraide.** Carte des différents quartiers de Caen. **Wikipédia**, disponible à l'adresse : <https://fr.wikipedia.org/wiki/Fichier:Quartiers-de-Caen.png>.

**Valerio F., et al.**, 2020. "The identification of wildlife-vehicle collision hotspots: Citizen science reveals spatial and temporal patterns", Ecological Processes.

**Varenne F.**, 2020. "Modélisation", in Dictionnaire critique de l'anthropocène, pp. 145-156.

**Verry M.**, 2014. "Les cheminements du Hérisson d'Europe (*Erinaceus europaeus*) dans deux quartiers de la ville de Nantes", Bulletin de la Société des sciences naturelles de l'Ouest de la France, vol. 36, pp. 101-112.

**Walls G.L.**, 1942. The vertebrate eye and its adaptive radiation. Bloomfield Hills, MI: Cranbrook Institute of Science.

**Wembridge D., Johnson G., Al-Fulaij N., Langton S.**, 2022. The State of Britain's Hedgehogs 2022. British Hedgehog Preservation Society and People's Trust for Endangered Species: London, UK.

**Wikimonde.** Article sur l'engrillagement. <https://wikimonde.com/article/Engrillagement>.

**Wikipédia.** *Bootstrap* (statistiques). [https://fr.wikipedia.org/wiki/Bootstrap\\_\(statistiques\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Bootstrap_(statistiques)).

**Wroot A.J.**, 1984. Feeding ecology of the European hedgehog *Erinaceus europaeus* (Doctoral dissertation, Royal Holloway, University of London).

**Yalden D.W.**, 1976. "The food of the hedgehog in England", Acta theriologica, vol. 21, n° 30, pp. 401-424.

**YouTube.** (2018). Interopérabilité BioDispersal - Graphab (3) : Graphe et métriques de la chaîne YouTube UMR TETIS.

**YouTube.** (2020). Piqu'Caen, un projet sur la bonne voie ! Vidéo YouTube.

**Zetterberg A., Mortberg U.M., Balfors B.,** 2010. "Making graph theory operational for landscape ecological assessments, planning and design", Landscape and Urban Planning, vol. 95, pp. 181-191

## **ANNEXE**

*Annexe 1 : Lien du Github pour accéder aux codes pour le modèle statistique prédictif de barrière :*

<https://github.com/ValognesEtienne/Modele-statistique-predictif-de-barriere.git>

### Annexe 2.1 : Tableau de donnée pour entraîner le modèle

ID_Barriere	Quartier	Observable	Présence	Type de barrière	Classe	Surface_attract	Surface_Peufrq	Surface_struct	Surface_bati	Surface_non_bati	Surface_Routes	Surface_Surf_Eau	Surface_Culture	Surface_Surf_perm	Total	
673	79876	Université	Oui	Oui	Mur	Imperméable	178.6069500	0.0000000	0.0000000	130.3162900	0.0000000	0.0000000	0	0	0.0000000	308.9232
674	79950	Université	Oui	Oui	Mur	Imperméable	0.0000000	0.0000000	249.4364000	11.7451600	0.0000000	47.7418500	0	0	0.0000000	308.9234
675	80118	Université	Oui	Oui	Haie	Semi-perméable	231.0976600	0.0000000	0.0000000	77.8257100	0.0000000	0.0000000	0	0	0.0000000	308.9234
676	80336	Université	Oui	Oui	Mur	Imperméable	0.0000000	0.0000000	297.1168900	11.8067900	0.0000000	0.0000000	0	0	0.0000000	308.9237
677	80399	Université	Oui	Oui	Mur	Imperméable	0.0000000	0.0000000	125.4059300	11.2803700	0.0000000	172.2371700	0	0	0.0000000	308.9235
678	81766	Université	Oui	Oui	Haie	Semi-perméable	0.0000000	0.0000000	0.0000000	38.8261100	105.9341000	164.1641600	0	0	0.0000000	308.9244
679	166675	Vaucelle	Oui	Oui	Mur	Imperméable	0.0000000	165.4931424	0.0000000	143.4368128	0.0000000	0.0000000	0	0	0.0001421	308.9301
680	166964	Vaucelle	Oui	Oui	Grillage	Semi-perméable	0.0000000	308.9300825	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0	0	0.0000000	308.9301
681	167269	Vaucelle	Oui	Oui	Mur	Imperméable	0.0000000	0.0000000	0.0000000	127.4184728	117.2448470	64.2669907	0	0	0.0000000	308.9303
682	167302	Vaucelle	Oui	Non	Beton	Perméable	0.0000000	0.0000000	0.0000000	69.1221470	239.8082189	0.0000000	0	0	0.0000000	308.9304
683	167573	Vaucelle	Oui	Oui	Mur	Imperméable	4.9605150	0.0000000	105.0456468	180.0161487	0.0000000	18.9079680	0	0	0.0000000	308.9303
684	167683	Vaucelle	Oui	Oui	Mur	Imperméable	0.0000000	63.0824962	115.6301952	130.2178238	0.0000000	0.0000000	0	0	0.0000000	308.9305
685	167951	Vaucelle	Oui	Oui	Grillage	Semi-perméable	0.0000000	0.0000000	91.9936036	35.2260148	0.0000000	181.7113999	0	0	0.0000000	308.9310
686	167955	Vaucelle	Oui	Oui	Grillage	Semi-perméable	2.3125118	0.0000000	160.1720347	0.0000000	0.0000000	146.4464439	0	0	0.0000000	308.9310
687	168048	Vaucelle	Oui	Oui	Mur	Imperméable	0.0000000	0.0000000	0.0000000	148.6474775	160.2828479	0.0000000	0	0	0.0000000	308.9303
688	168178	Vaucelle	Oui	Oui	Mur	Imperméable	49.3213033	124.8225165	0.0000000	80.6141554	0.0000000	54.1728075	0	0	0.0000742	308.9309
689	168460	Vaucelle	Oui	Oui	Mur	Imperméable	180.1291598	43.8291538	0.0000000	84.9724181	0.0000000	0.0000000	0	0	0.0002054	308.9309
690	169916	Vaucelle	Oui	Oui	Mur	Imperméable	250.1778905	0.0000000	0.0000000	58.7534889	0.0000000	0.0000000	0	0	0.0000000	308.9314
691	169926	Vaucelle	Oui	Oui	Mur	Imperméable	308.9314805	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0	0	0.0000000	308.9315
692	170742	Vaucelle	Oui	Oui	Grillage	Semi-perméable	136.8044140	0.0000000	0.0000000	144.0120433	0.0000000	28.1155336	0	0	0.0000000	308.9320
693	170824	Vaucelle	Oui	Oui	Mur	Imperméable	167.6145055	0.0000000	0.0000000	134.1632155	0.0000000	7.1538873	0	0	0.0000000	308.9316
694	171295	Vaucelle	Oui	Non	Beton	Perméable	78.6269390	0.0000000	0.0000000	69.2418958	0.3319029	160.7311553	0	0	0.0000000	308.9319
695	171435	Vaucelle	Oui	Oui	Mur	Imperméable	256.9834948	0.0000000	0.0000000	39.3427592	12.6057389	0.0000000	0	0	0.0000000	308.9320
696	172298	Vaucelle	Oui	Oui	Haie	Semi-perméable	0.0000000	98.4138293	0.0000000	0.0000000	109.2335612	101.2854232	0	0	0.0000000	308.9328
697	172751	Vaucelle	Oui	Oui	Mur	Imperméable	92.5322866	0.0000000	0.0000000	147.6425967	0.0000000	68.7560645	0	0	0.0000000	308.9309
698	173777	Vaucelle	Oui	Oui	Mur	Imperméable	0.0000000	0.0000000	0.0000000	128.1635764	127.9817657	52.7863582	0	0	0.0000000	308.9317
699	173980	Vaucelle	Oui	Non	Beton	Perméable	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000	298.4757966	10.4553005	0	0	0.0000000	308.9311
700	173992	Vaucelle	Oui	Oui	Portail	Imperméable	21.5575878	0.0000000	0.0000000	0.0000000	287.3734640	0.0000000	0	0	0.0000000	308.9311

### Annexe 2.2 : Tableau de donnée pour tester le modèle

ID_Barriere	Quartier	Observable	Présence	Type de barrière	Classe	Surface_attract	Surface_Peufrq	Surface_struct	Surface_bati	Surface_non_bati	Surface_Routes	Surface_Surf_Eau	Surface_Culture	Surface_Surf_perm	Total	
272	87862	La Verte Vallée	Oui	Oui	Haie	Semi-perméable	249.43952	0.000	0.00000	59.48170	0.00000	0.00000	0	0	0.0000000	308.9212
273	87932	La Verte Vallée	Oui	Oui	Mur	Imperméable	236.79595	0.000	0.00000	72.12472	0.00000	0.00000	0	0	0.0000000	308.9207
274	87942	La Verte Vallée	Oui	Oui	Mur	Imperméable	196.09496	0.000	0.00000	112.82577	0.00000	0.00000	0	0	0.0000000	308.9207
275	88009	La Verte Vallée	Oui	Oui	Mur	Imperméable	55.16036	0.000	237.76160	0.00000	0.00000	15.99826	0	0	0.0000000	308.9202
276	88023	La Verte Vallée	Oui	Oui	Portail	Imperméable	0.39674	0.000	164.03622	0.00000	0.00000	144.48741	0	0	0.0000000	308.9204
277	88246	La Verte Vallée	Oui	Oui	Mur	Imperméable	0.00000	0.000	93.71298	90.57658	0.00000	124.63075	0	0	0.0000000	308.9203
278	88346	La Verte Vallée	Oui	Oui	Mur	Imperméable	258.55434	0.000	0.00000	50.36628	0.00000	0.00000	0	0	0.0000000	308.9206
279	88397	La Verte Vallée	Oui	Oui	Mur	Imperméable	95.17538	0.000	0.00000	110.58532	0.00000	103.15956	0	0	0.0000000	308.9203
280	88398	La Verte Vallée	Oui	Oui	Mur	Imperméable	127.83466	0.000	0.00000	181.08582	0.00000	0.00000	0	0	0.0000000	308.9205
281	88611	La Verte Vallée	Oui	Oui	Portail	Imperméable	100.12641	0.000	0.00000	75.40860	0.00000	133.38595	0	0	0.0000000	308.9210
282	88639	La Verte Vallée	Oui	Oui	Mur	Imperméable	157.95979	0.000	0.00000	135.96132	0.00000	14.99970	0	0	0.0000000	308.9208
283	88702	La Verte Vallée	Oui	Oui	Portail	Imperméable	146.55404	0.000	0.00000	26.41202	0.00000	135.95486	0	0	0.0000000	308.9209
284	88800	La Verte Vallée	Oui	Oui	Mur	Imperméable	15.61299	0.000	53.92063	134.50160	0.00000	104.88491	0	0	0.0000000	308.9201
285	89070	La Verte Vallée	Oui	Oui	Haie	Semi-perméable	0.00000	0.000	0.00000	57.74183	251.17870	0.00000	0	0	0.0000000	308.9205
286	89237	La Verte Vallée	Oui	Oui	Portail	Imperméable	137.76887	4.800	0.00000	0.00000	0.00000	166.35152	0	0	0.0000000	308.9204
287	89288	La Verte Vallée	Oui	Oui	Haie	Semi-perméable	0.00000	79.466	0.00000	0.00000	137.02591	92.42900	0	0	0.0000000	308.9209
288	89366	La Verte Vallée	Oui	Oui	Haie	Semi-perméable	0.00000	308.787	0.13335	0.00000	0.00000	0.00000	0	0	0.0000000	308.9203
289	89441	La Verte Vallée	Oui	Oui	Glissiere	Perméable	0.00000	138.303	0.00000	0.00000	0.00000	170.61702	0	0	0.0000000	308.9200
290	89477	La Verte Vallée	Oui	Non	Herbe	Perméable	248.99892	59.921	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0	0	0.0000000	308.9199
291	89845	La Verte Vallée	Oui	Oui	Grillage	Semi-perméable	277.65203	0.000	0.00000	31.26988	0.00000	0.00000	0	0	0.0000000	308.9219
292	89881	La Verte Vallée	Oui	Oui	Portail	Imperméable	200.08292	0.000	0.00000	0.00000	0.00000	108.83884	0	0	0.0000000	308.9218
293	90019	La Verte Vallée	Oui	Oui	Haie	Semi-perméable	137.02277	0.000	0.00000	0.00000	0.00000	171.89950	0	0	0.0000000	308.9223
294	90136	La Verte Vallée	Oui	Oui	Cloture	Imperméable	197.66791	0.000	0.00000	0.00000	0.00000	111.25369	0	0	0.0000000	308.9216
295	90219	La Verte Vallée	Oui	Oui	Haie	Semi-perméable	125.25165	0.000	0.00000	0.00000	0.00000	183.67064	0	0	0.0000000	308.9223
296	90284	La Verte Vallée	Oui	Oui	Mur	Imperméable	168.87456	105.791	0.00000	34.25605	0.00000	0.00000	0	0	0.0000000	308.9216

