

BIOREV'AIX

**BIODIVERSITÉ ET RÉSEAU VIAIRE
À AIX-EN-PROVENCE
INTERROGER LA MORPHOLOGIE URBAINE
À TRAVERS L'ÉCOLOGIE DU TRONÇON DE RUE**

**JEAN NOËL CONSALÈS
BENOIT ROMEYER
CÉCILE ALBERT
VALÉRIE BERTAUDIÈRE-MONTÈS
BRUNO VILA
MAGALI DESCHAMPS-COTTIN
FRANÇOIS HAMONIC
CHRISTINE ROBLES**

Plan Urbanisme Construction Architecture
Ministères Aménagement du Territoire, Transition écologique
Arche Sud - 92055 La Défense cedex
www.urbanisme-puca.gouv.fr

Directeur de la publication

François Ménard, secrétaire permanent par intérim du PUCA

Responsable de l'action

Sophie Carré, chargée de projets de recherche

Coordination éditoriale et mise en page

Bénédicte Bercovici, chargée de valorisation

ISBN : 978-2-11-139347-9

Photos : couverture : © Mathilde Pham

p. 96 : © Bénédicte Bercovici, PUCA

Septembre 2025

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	4
INTRODUCTION	10
LE TRONÇON DE RUE POUR ANALYSER LES RAPPORTS ENTRE BIODIVERSITÉ ET MORPHOLOGIE URBAINES	18
LE TRONÇON DE RUE POUR MESURER LA BIODIVERSITÉ URBAINE	34
La flore	
La malacofaune	
Par-delà le gradient d'urbanisation, l'influence de la morphologie urbaine	
LE TRONÇON DE RUE POUR OPTIMISER LES CONNECTIVITÉS ÉCOLOGIQUES	44
LE TRONÇON DE RUE POUR RÉVÉLER LA GOUVERNANCE DE LA NATURE EN VILLE ET DE LA BIODIVERSITÉ URBAINE	52
LE TRONÇON DE RUE POUR (A)MÉNAGER LA BIODIVERSITÉ URBAINE	60
Les routes périurbaines	
Les voies de desserte privées	
Les boulevards périurbains et voies de desserte publiques	
CONCLUSION : LE TRONÇON DE RUE, UN NOUVEL OUTIL DE RECHERCHE-ACTION	80
BIBLIOGRAPHIE	84
BIOGRAPHIES DES AUTEUR(E)S	90
CONSEIL SCIENTIFIQUE DU PROGRAMME BAUM	94

AVANT-PROPOS

Plan Urbanisme Construction Architecture

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

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

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

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

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

post-doctorat de 10 mois, Morgane Fléreau, docteure en géographie et aménagement, pour la réalisation d'une revue de la littérature scientifique consacrée aux liens entre formes urbaines et biodiversité, à l'échelle du quartier, dans les villes occidentales. Des résultats de celle-ci, objet d'une publication du PUCA¹, nous tirerons des enseignements indispensables à la poursuite du programme, et le premier d'entre eux : les chercheurs, écologues et urbanistes, géographes, architectes ou sociologues, sont très peu nombreux à collaborer, et se comprennent mal car ils utilisent des outils de recherche différents. Ainsi, les acteurs de l'aménagement parviennent-ils difficilement à s'emparer des résultats de la recherche en écologie. La Direction générale de l'aménagement du logement et de la nature (DGALN), en charge de la conception des politiques publiques d'aménagement, notre partenaire de tous les instants au Ministère de la transition écologique (MTE), et l'Office français de la biodiversité, agence sous tutelle du MTE, qui voient une opportunité d'encourager la coopération entre les champs disciplinaires de l'écologie et de l'aménagement du territoire, soutiendront le programme BAUM, initié par le PUCA. Enfin, un comité scientifique du programme réunit 18 représentants de la recherche, ou d'institutions en charge de l'animation des politiques publiques, dans les champs disciplinaires de l'écologie et de l'aménagement du territoire, sous la présidence de Philippe Clergeau.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Auteur(e)s et affiliations :

- Jean Noël Consalès (Université Lumière Lyon 2/ LER)
- Benoit Romeyer (Aix-Marseille Université/LIEU)
- Cécile Albert (CNRS/IMBE)
- Valérie Bertaudière-Montès (Aix-Marseille Université/LPED)
- Bruno Vila (Aix-Marseille Université/LPED)
- Magali Deschamps-Cottin (Aix-Marseille Université/LPED)
- François Hamonic (CNRS/IMBE)
- Christine Robles (Aix-Marseille Université/LPED)

Stagiaires du projet :

- Maia Barrère
- Marybel Bernardet
- Florine Francotte
- Baptiste Le Guen
- Noémie Montel
- Mathilde Pham
- Romain Wilmes

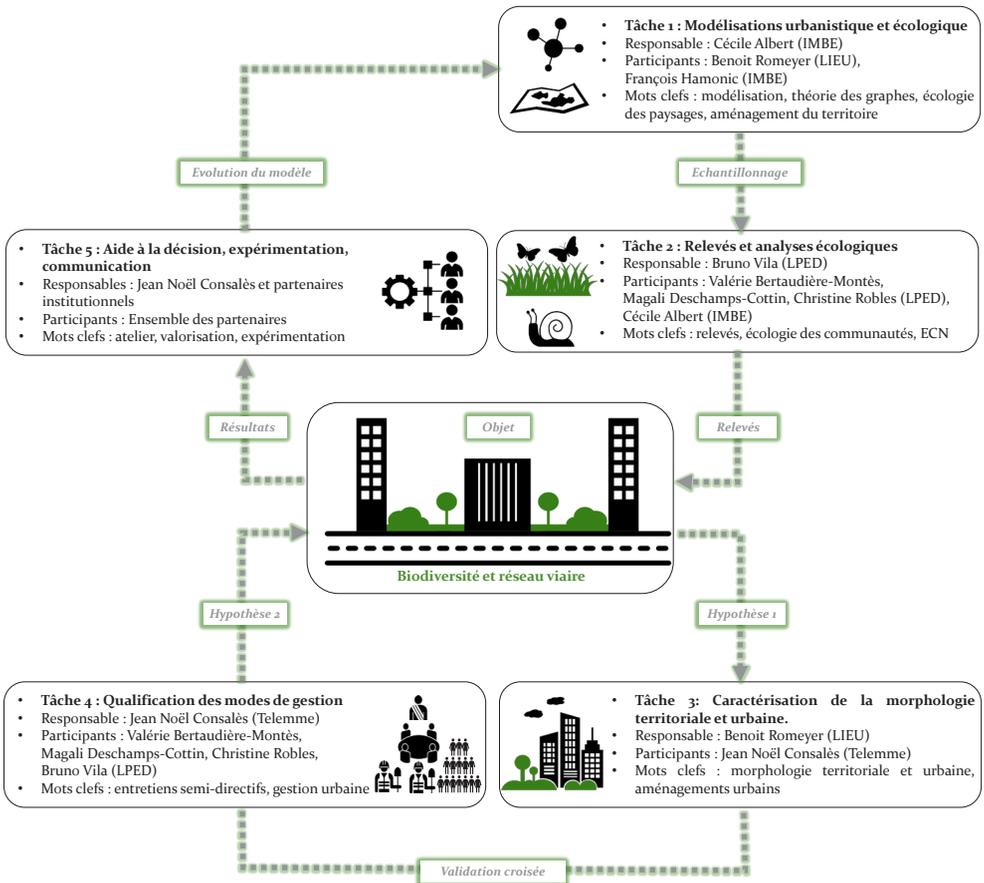
INTRODUCTION

Matrice première de constitution et d'évolution des tissus urbains, le réseau des rues et des voies - le réseau viaire - constitue un élément clé de la morphogenèse urbaine (Kostof, 1992, Panerai et al., 2004). Quasi inamovible dans sa structure topologique, celui-ci fait néanmoins l'objet de transformations régulières de ses usages, statuts et configurations spatiales, en fonction de l'évolution des paradigmes aménagistes et sociétaux (Romeyer, 2017 ; Alonzo, 2020). Dans un contexte appelant à une meilleure prise en compte, par le champ de l'urbanisme et de l'aménagement, des enjeux de préservation de la biodiversité (Clergeau, 2020 ; Rode, 2023), de nouvelles « écologies de la rue » (Appleyard, 1981), moins anthropocentrées, tendent à se dessiner (Moxon, 2019). Au sein de celles-ci, le réseau viaire s'appréhende comme un support non seulement favorable à l'accueil d'une diversité d'usages et d'appropriations humaines, mais encore à l'épanouissement de dynamiques écologiques d'habitat et de dispersion. À cet égard, « la rue est alors à penser aussi comme un corridor et peut être intégrée à un réseau de trames vertes » (Héran et al., 2022, p. 102). Qu'en est-il alors de la prise en compte de ce réseau viaire dans un contexte de crises environnementales et de montée en puissance d'un urbanisme non plus seulement durable, mais pleinement écologique ? En tant qu'élément relevant à la fois de l'universel et de l'extrême proximité, sur lequel la puissance publique dispose par ailleurs d'une large capacité d'action et de régulation, le réseau viaire représente alors un potentiel considérable d'espaces mobilisables au service de la transition écologique, à l'échelle de la ville et de ses quartiers.

C'est en se fondant sur ce postulat initial que le projet BioRev'Aix (pour Biodiversité et Réseau viaire à Aix-en-Provence) a appréhendé la rue comme un objet transversal permettant de jeter des ponts entre écologie des paysages et écologie des communautés, mais aussi entre aménagement des territoires et aménagement urbain. À cet égard, il s'est interrogé sur la capacité du réseau viaire à être support de fonctionnements urbanistiques et écologiques suivant sa double structuration (i) topologique, en tant que réseau de « liens » et (ii) morphologique, en tant que réseau de « lieux » (Jones et al., 2007). Cette recherche a ainsi formulé l'hypothèse que la relation entre ces deux types de fonctionnements est inféodée à deux paramètres principaux :

1. la morphologie territoriale et urbaine, ici caractérisée par des interrelations entre des structures viaires et des formes urbaines extrêmement variables dans leurs configurations et leurs usages.
2. les modes de gestion des espaces à caractère naturel (ECN) (Clergeau, 2007) présents sur le réseau viaire ou à son immédiate proximité (espaces végétalisés, parcs et jardins publics ou privés, pieds d'arbres, ...).

Figure 1 : Schéma organisationnel du projet BioRev'Aix.



Pour tester cette hypothèse, le projet BioRev'Aix s'est structuré autour d'un ensemble de 5 tâches interconnectées, faisant la part belle aux « frottements interdisciplinaires » (Groupe sur l'urbanisme écologique, 2022) entre urbanisme et aménagement, géographie et écologie (cf. figure 1).

Plus précisément, il s'est d'abord fixé pour objectif de modéliser et de qualifier le réseau viaire aixois sur la base de métriques à la fois écologiques et urbanistiques. Il s'est ensuite efforcé de valider cette approche de manière empirique, en mesurant la biodiversité sise sur des rues et des voies échantillonnées selon des caractéristiques urbanistiques et écologiques contrastées, en appui sur les résultats de la modélisation cartographique. Mais le projet a aussi cherché à travailler avec des modèles faunistiques et floristiques différents par leurs aires vitales et leurs capacités de dispersion : la flore spontanée, l'escargot (malacofaune) et l'écureuil roux. Ce faisant, BioRev'Aix a développé une approche méthodologique novatrice, prenant appui sur une unité de mesure originale de la morphologie urbaine et de sa biodiversité : le tronçon de rue. Ce dernier a été interrogé, d'une part, au regard de l'influence de sa morphologie sur sa biodiversité en tant que socio-écosystème à part entière, et, d'autre part, au regard de sa capacité à favoriser les continuités écologiques en tant qu'élément d'un réseau viaire interconnecté.

C'est en effet à partir de cette unité spatiale développée afin de permettre l'interrogation interdisciplinaire du réseau viaire qu'ont pu être (i) réalisés des relevés écologiques sur des pieds d'arbres, (ii) élaboré un outil d'aide à la décision pour l'identification des secteurs propices à une amélioration des connectivités écologiques, (iii) conduites des enquêtes auprès de parties prenantes urbaines représentatives et (iv) formulées des propositions d'aménagement cohérentes pour la biodiversité urbaine. Le tronçon de rue constitue ainsi le fil directeur d'un système de recherche interdisciplinaire.

Pour asseoir sa démarche, le projet BioRev'Aix a pu, en outre, profiter d'un écosystème de recherche-action favorable : la ville d'Aix-en-Provence. Celle-ci se caractérise en effet par une structure urbaine très lisible, particulièrement adaptée à l'analyse de la morphologie urbaine, du fait du caractère archétypal de ses différents quartiers issus de périodes de production de bâti distinctes. Aix-en-Provence se trouve, par ailleurs, à proximité directe de grands réservoirs de biodiversité (montagne Sainte Victoire, plateau de l'Arbois). C'est également une ville qui tend à s'inscrire dans une démarche d'écologisation progressive de ses pratiques d'aménagement et de gestion, tant en matière d'espaces verts (Romeyer et Consalès, 2023), comme en témoigne l'obtention du label « EcoJardin » pour le parc Christine Bernard, qu'en matière de voirie, comme l'atteste la mise

Encadré n° 1 : Le parc naturel urbain d'Aix-en-Provence

Inspiré des parcs naturels régionaux (PNR), le Parc Naturel Urbain est une démarche aux contours souples et sans valeur réglementaire. Apparu en France dans les années 1990 avec le projet pionnier de Rueil-Malmaison, il se fonde sur la nécessité de mieux préserver et valoriser les espaces à caractères naturels présents en milieu urbain dans une perspective de développement durable. Il a depuis été adopté par une dizaine de collectivités territoriales françaises. L'opportunité de donner un cadre légal à la démarche a fait l'objet de discussions en 2005 à l'Assemblée nationale et au Sénat dans le cadre de l'examen du projet de loi relatif aux parcs nationaux et aux parcs naturels marins promulgué en 2006. Triplement rejeté pour son intitulé jugé proche de l'oxymore, pour le risque de confusion qu'il pourrait susciter par rapport aux Parcs Naturels Régionaux, ainsi que pour sa faible plus-value supposée vis-à-vis des outils de protection existants, une « association des villes et intercommunalités supports de parcs naturels urbains » regroupant 3 communautés d'agglomération (Agen, Pau, Marsan) et 3 villes (Strasbourg, Rueil-Malmaison, Villeurbanne) a néanmoins vu le jour en 2011 pour continuer à promouvoir la création d'un cadre juridique spécifique aux parcs naturels urbains. L'initiative n'a toutefois pas encore aboutie, et le PNU demeure donc à ce jour un outil juridiquement non contraignant dont le cadre, la gouvernance et le contenu varient fortement en fonction des territoires sur lequel il se déploie.

En 2018, la Ville d'Aix-en-Provence s'est dotée de son propre Parc Naturel Urbain, conçu parallèlement au déploiement de son nouveau réseau de Bus à Haut Niveau de Service (l'AixPress) dont il constitue une forme de miroir et de complément à destination des modes de déplacement actifs. Prenant la forme d'un linéaire de 4,7 km reliant les quartiers Sud et Est de la Ville, il vise à favoriser la pratique des déplacements piétons et cyclables tout en contribuant à la mise en réseau des parcs et espaces verts que son tracé intègre. Il répond ce faisant à quatre grands objectifs :

- « - proposer une réelle trame piétonne et cyclable attractive et cohérente pour le territoire,
- établir le lien ville-nature comme élément de développement pour Aix-en-Provence,

- susciter une prise de conscience et opérer un changement de pratique auprès des citoyens,
- valoriser un patrimoine culturel et naturel dans les quartiers en périphérie du centre-ville” (extrait de la délibération du 9 novembre 2018 du Conseil municipal d’Aix-en-Provence actant la création du Parc Naturel urbain).»

Alternant espaces urbains (quartiers résidentiels, commerces, écoles, bibliothèques, centre-sportif, facultés, cités universitaires, etc.) et espaces à caractère naturels aux profils variés (parc public, friche, cours d’eau, bois), la diversité des milieux qui le constitue l’a conduit à servir de support aux inventaires écologiques de la faune et de la flore réalisés dans le cadre de la démarche d’Atlas de Biodiversité Communale (ABC) porté par le Muséum d’histoire naturelle d’Aix-en-Provence.

Ayant mobilisé un investissement de 4 millions d’euros sur ses 5 premières années d’existence, le Parc Naturel Urbain d’Aix-en-Provence apparaît ainsi comme un espace localement démonstrateur d’autres manières d’(a)ménager les natures urbaines (Consalès, 2024) tout en répondant aux objectifs sociaux, économiques et écologiques de la Ville.

Le présent cahier se propose de revenir sur la démarche et le processus de recherche du projet BioRev'Aix, en insistant autant sur ses partis pris méthodologiques, pensés pour être aisément appropriables et reproductibles, que sur ses résultats, discutés au regard de l'état de l'art scientifique. Ainsi, dans une première partie, ce cahier se centre sur le processus de recherche ayant conduit au choix et à la conception du tronçon de rue comme unité de mesure de la morphologie urbaine et de sa biodiversité. Dans une seconde partie, il montre comment celui-ci a été utilisé pour inventorier la malacofaune et la flore spontanée d'un échantillon de pieds d'arbres représentatifs de la diversité des tissus urbains d'Aix-en-Provence, afin de comprendre comment ces taxons réagissent aux tissus analysés. Puis dans une troisième partie, il explique comment, à partir du modèle écologique de l'écureuil roux, l'approche à l'échelle du tronçon de rue a permis d'identifier des secteurs à aménager susceptibles d'améliorer le fonctionnement et la connectivité écologiques du territoire. Il présente ensuite, dans une quatrième partie, les résultats de l'enquête réalisée auprès des parties prenantes territoriales aixoises (élu, techniciens, résidents et usagers) quant à leurs attentes, leurs compétences et leurs représentations en matière de nature et de biodiversité urbaines. Il s'attarde enfin, dans une cinquième et dernière partie, sur l'identification de trois situations de projet distinctes établies en cohérence avec les capacités d'intervention des acteurs institutionnels, d'une part, et les spécificités morphologiques constatées d'un ensemble de tronçons de rue à potentiel de renaturation, d'autre part.

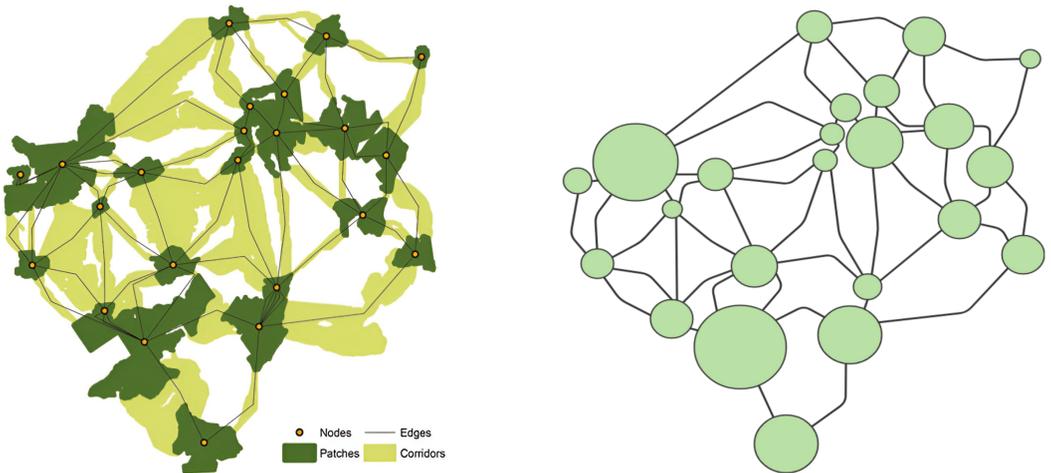
**LE TRONÇON DE RUE POUR
ANALYSER LES RAPPORTS
ENTRE BIODIVERSITÉ ET
MORPHOLOGIE URBAINES**

Le réseau viaire se caractérise par sa grande hétérogénéité. En effet, si certaines rues mesurent plusieurs kilomètres de long, d'autres se déploient sur quelques mètres seulement. En outre, plusieurs types bâtis peuvent se succéder au sein d'une seule et même rue. Cette infinie variété des formes représente, à ce titre, un véritable « défi à la classification » (Allain, 2004).

L'établissement d'un cadre d'analyse permettant la caractérisation à la fois fine et systématique des interrelations à l'œuvre entre des structures viaires et des formes urbaines extrêmement variables dans leurs configurations et leurs usages, est pourtant apparu comme une condition *sine qua none* du travail interdisciplinaire à engager entre urbanistes et écologues. Pour répondre à cet enjeu scientifique, le recours à une unité de travail commune est apparu comme un préalable indispensable. Cette recherche s'est alors appuyée sur les derniers développements des travaux interrogeant la structure de la ville depuis la rue. La disponibilité croissante des données géospatiales et les progrès parallèles des sciences qui leurs sont associées ont en effet participé à l'émergence de nouvelles évolutions dans le champ de la morphologie urbaine (Moudon, 1997).

L'analyse structurelle du réseau viaire a ainsi fait l'objet de nombreuses investigations, en appui sur la théorie des graphes, et dans la lignée des travaux pionniers des tenants de la Space Syntax (Hillier et Hanson, 1984). De manière générale, un graphe est un objet mathématique construit comme un ensemble de sommets reliés par des arêtes. Plus précisément, un graphe viaire modélise la manière dont les voies urbaines (liens) se croisent et s'entrecroisent autour d'un ensemble d'intersections (nœuds) (cf. figure 2).

Figure 2 : Exemple de modélisation d'un paysage écologique sous forme de graphe (image de gauche : Rudnick et al., 2012 ; image de droite : Hamonic, 2023)



L'analyse structurelle par graphe d'un réseau viaire peut s'opérer de manière assez directe, en appui sur de nombreux programmes informatiques dédiés tels SDNA (Cooper et Chiaradia, 2020), ou encore Morphéo (Lagesse, 2015). Elle permet alors d'en définir les caractéristiques topologiques et topographiques et, partant, d'en identifier les nœuds et liens les plus centraux (Lagesse, 2015). Ceci confère à ces modèles mathématiques une capacité prédictive avérée vis-à-vis de certains fonctionnements urbains (flux de transports, valeurs foncières, ...). Leur utilisation en tant que descripteur de morphologie urbaine est toutefois limitée par leur incapacité à intégrer certains éléments essentiels des tissus urbains (bâti, parcellaire, topographie, ...) ainsi que les caractéristiques géométriques des voies considérées.

C'est ainsi que d'autres travaux ont profité du développement des bases de données SIG pour proposer de nouveaux dispositifs, plus contextuels, de caractérisation morphologique du réseau viaire. En la matière, les outils de caractérisation automatisés du paysage viaire urbain (*streetscape*), proposés par Harvey et al., (2017) puis par Araldi et Fusco (2018), ouvrent à une prise en compte de l'espace-rue appréhendé par ses différents usagers, humains et non-humains. Ceux-ci ont tout particulièrement inspiré le choix d'une unité d'analyse morphologique originale, car adaptée au croisement d'analyses à la fois urbanistiques et écologiques du réseau viaire : le tronçon de rue. Au sein du projet BioRev'Aix, ce dernier a été pensé pour accompagner les modélisations, les échantillonnages ainsi que l'interprétation des données produites par les écologues du projet à partir de trois taxons distincts, choisis pour la variété de leurs modes et échelles de dispersion :

- la malacofaune (dispersion active et de faible portée),
- la flore spontanée des rues (dispersion passive et de portée intermédiaire),
- l'écureuil roux (dispersion active et de grande portée).

Le tronçon de rue correspond à un linéaire de voie urbaine (hors route et sentier) inclus entre deux intersections (cf. figure 3), dont le protocole de génération, aisément reproductible, est décrit dans l'encadré n°2 ci-après.

Le protocole de découpage du réseau viaire en tronçons de rue développé dans le cadre du projet BioRev'Aix s'appuie sur la couche "Route nommée" présente dans la base de données BD TOPO développée par l'Institut national de l'information géographique et forestière (IGN), à partir de laquelle une série de modifications est opérée.

1 - Soustraction des voies d'importance "1" (autoroutes) et "6" (sentiers, pistes cyclables, ...) dont les caractéristiques morphologiques ne répondent pas à la définition usuelle de la rue comme voie de circulation bordée de bâtiments.



2 - Découpage des voies au niveau de chaque intersection (noeud) avec un *buffer* de 4m. Ceci afin de générer des sous-segments de rue à la fois bien différenciés et comparables.



Encadré n° 2 : Protocole de découpage du réseau viaire en tronçons de rues

3 - Suppression de tous les tronçons de rue inférieurs à 30 m. Ce seuil est apparu pertinent pour permettre l'élimination d'un maximum de segments jugés non-représentatifs (reliquats de ronds-points ...).



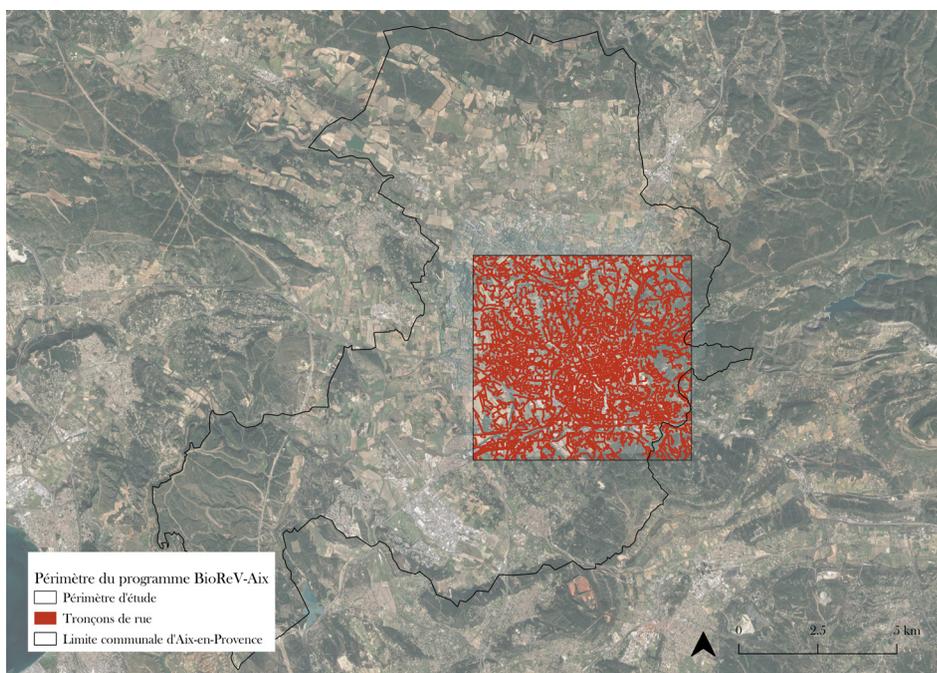
4 - Application d'un *buffer* à plat de 30m de part et d'autre des segments de rues, donnant lieu aux tronçons de rue finaux. A noter que cette valeur seuil a été déterminée à partir des caractéristiques connues du réseau d'Aix-en-Provence (écartement maximal de façade à façade relevé dans la base de données IGN BD TOPO).



Figure 3 : Exemple de tronçon de rue avec son *buffer* dans la ville d'Aix-en-Provence (photo aérienne : IGN).



Figure 4 : L'ensemble des rues du périmètre BioRev'Aix découpées en tronçons de rue.



C'est ainsi qu'un ensemble de 5460 tronçons de rue a pu être généré à l'échelle du territoire d'études, dont le périmètre se concentre sur le centre-ville et les premières couronnes périphériques aixoises (cf. figure 4). Ce périmètre a été choisi dans le but de concentrer les recherches sur les spécificités de l'urbain aggloméré, laissant ainsi de côté l'urbain diffus.

Une fois la totalité des tronçons de rue spatialisés à l'échelle du territoire d'étude, il s'est ensuite agi de leur imputer un ensemble d'indicateurs permettant leur caractérisation morphologique. En appui sur le logiciel libre de Système d'information géographique QGIS ainsi que sur le programme de morphométrie urbaine Momepy développé sous Python par Martin Fleischmann (2019), un ensemble d'indicateurs de morphologie urbaine a ainsi pu être associé à chacun des tronçons de rue. Ces différents indicateurs ont été synthétisés dans le tableau 1 ci-après.

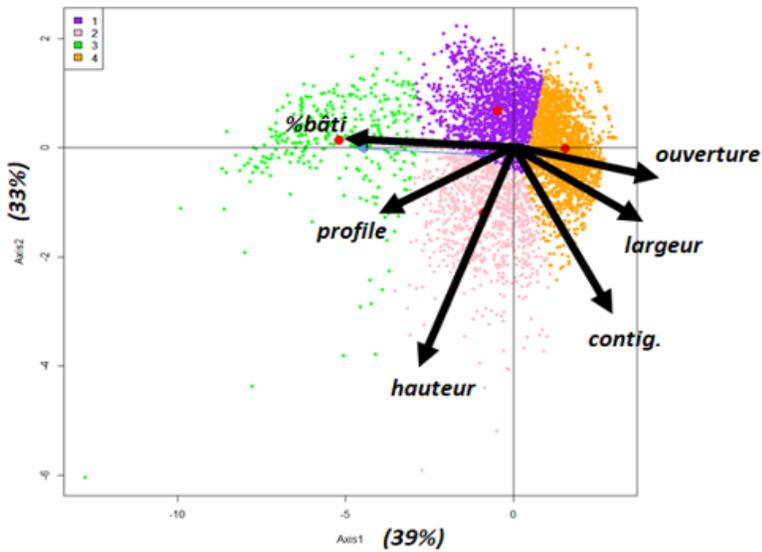
Tableau 1 : Liste des différents indicateurs imputés dans les tronçons de rue.

Nom_colonne	Données associées	Remarques
ID_troncon	Identifiant unique associé au tronçon de rue	donnée issue du SIG
NOM_1_G	Nom de la rue (côté gauche)	donnée issue de la BD TOPO IGN
IMPORTANCE	Hiérarchisation du réseau viaire en fonction du trafic routier, sur une échelle de 1 à 6 (1 étant le niveau avec le plus d'importance)	donnée issue de la BD TOPO IGN
LARGEUR	Largeur indicative de la chaussée, de trottoir à trottoir ou d'accotement à accotement.	donnée issue de la BD TOPO IGN
LONGUEUR	Longueur du tronçon de rue	donnée issue du SIG
AIRE	Surface du tronçon de rue avec <i>buffer</i>	donnée issue du SIG
AIRE_BATI	Surface des emprises bâties dans le tronçon de rue	donnée issue du SIG
RATIO_BATI	Ratio entre la surface bâtie et la surface totale du tronçon de rue	donnée issue du SIG
decliv	Écart entre les points d'altitude les plus élevés et faibles du tronçon de rue.	Pour déclivité (en appui sur BD ALTI IGN)
length_euc	Longueur euclidienne du tronçon de rue (à vol d'oiseau)	donnée issue du SIG
sinuos	Sinuosité du tronçon de rue exprimé par le ratio entre sa longueur euclidienne et sa longueur effective	donnée issue du SIG
alt_start	Altitude du point de départ du tronçon de rue	donnée issue du SIG
alt_end	Altitude du point final du tronçon de rue	donnée issue du SIG
pente	Différentiel entre altitude de départ et altitude finale du tronçon de rue	donnée issue du SIG (exprimé en valeur absolue)
conti_batie	Indice de contiguïté du bâti. Celui-ci permet de qualifier dans quelle mesure le bâti est fragmenté en différents ensembles ou plutôt mitoyen	donnée issue du SIG

nb_blocs	Nombre d'ensembles bâtis contigus du tronçon de rue	donnée issue du SIG
nb_bati	Nombre de bâtiments présents dans le tronçon de rue	donnée issue du SIG
widths	largeur moyenne de la rue de bâti à bâti	Calculé avec le logiciel Momepy avec intervalle de 3m et suivant un <i>buffer</i> de 50 m de part et d'autre de l'axe du tronçon de rue).
width_devi	Écart-type de la largeur de la rue de bâti à bâti	Calculé avec le logiciel Momepy à intervalle de 3m et suivant un <i>buffer</i> de 50 m de part et d'autre de l'axe du tronçon de rue).
openness	Qualifie le degré d'ouverture de la rue (Nombre de rayons perpendiculaires à l'axe du tronçon de rue qui ont "touché" un bâtiment sur nombre total de rayons)	Calculé avec Momepy
heights	hauteur moyenne du bâti présent à 50 m de l'axe du tronçon de rue.	Calculé avec Momepy
heights_de	hauteur moyenne du bâti présent à 50 m de l'axe du tronçon de rue.	Calculé avec Momepy
profile	Hauteur moyenne / largeur moyenne de la rue	Calculé avec Momepy
BtE200	Betweenness centrality de chaque tronçon de rue suivant un rayon de 200m	Calculé avec Momepy
BtE800	Betweenness centrality de chaque tronçon de rue suivant un rayon de 800m	Calculé avec Momepy
BtE2000	Betweenness centrality de chaque tronçon de rue suivant un rayon de 2000m	Calculé avec Momepy

L'enjeu a ensuite été de regrouper les différents tronçons de rue en un ensemble à la fois raisonné, par leur construction objectivée, et raisonnable, par leur nombre limité, de classes morphologiques. Celles-ci ont été construites par l'intermédiaire d'une analyse statistique multivariée de type Analyse en Composantes Principales (ACP), réalisée à l'aide du logiciel R (cf. figure 5).

Figure 5 : Représentation de l'ACP des tronçons de rues sur les variables de morphologie urbaine. Ouverture : ouverture de la rue ; largeur : largeur de la rue ; contig. : contiguïté du bâti ; hauteur : hauteur du bâti ; profil : profil du bâti ; %bâti : surface de bâti du tronçon de rue/superficie totale du tronçon de rue.



En l'espèce, il s'est agi de choisir et de s'appuyer sur six variables jugées représentatives des morphologies urbaines en présence :

- le pourcentage d'emprise du bâti,
- la hauteur moyenne du bâti,
- le niveau de contiguïté du bâti,
- le degré d'ouverture du bâti,
- la largeur moyenne du tronçon de rue,
- et enfin le profil du tronçon de rue (cf. figure 6).

Figure 6 : Les 5460 tronçons de rue générés à l'échelle du territoire d'études, ici discrétisés suivant leur profil, équivalent au ratio : Hauteur moyenne du bâti / Largeur moyenne du tronçon de rue.

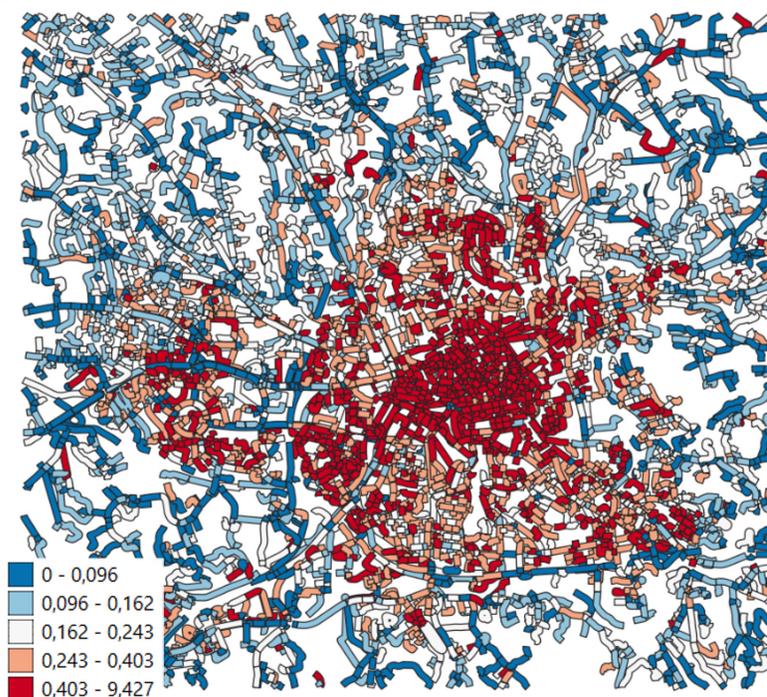
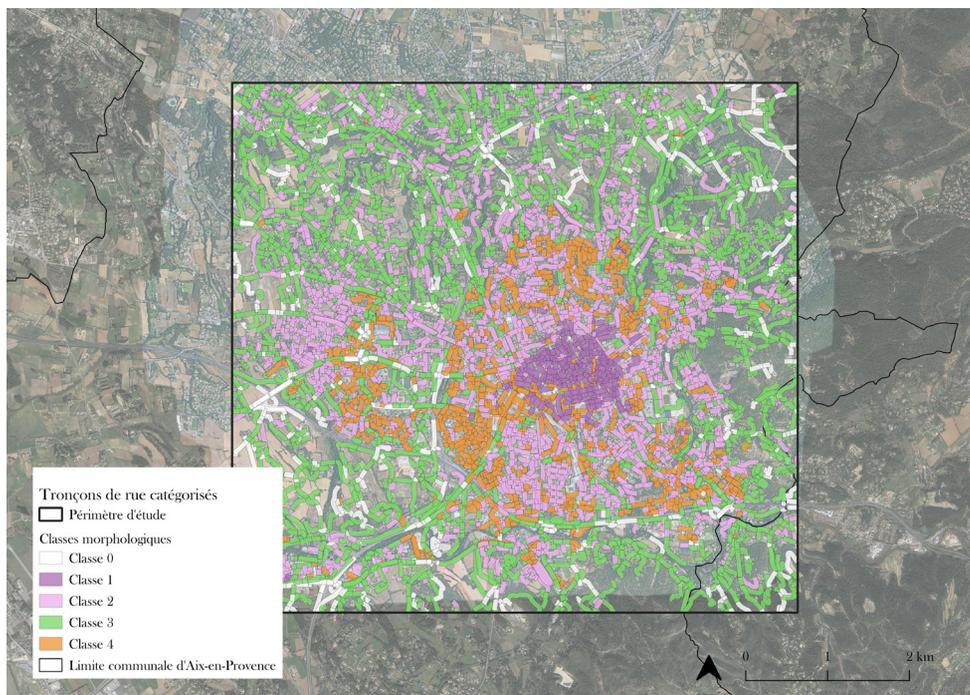


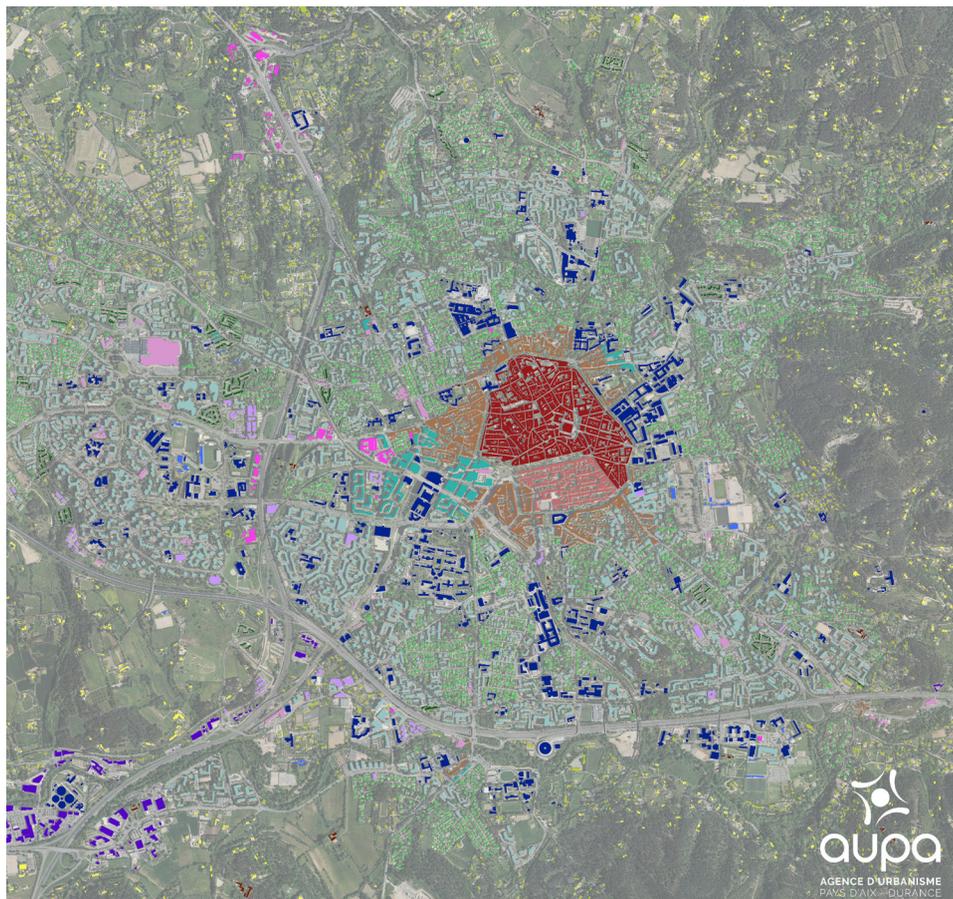
Figure 7 : Représentation des tronçons de rues selon les catégories de tissus urbains. Violet : Tissus d'habitat collectif continu ; Orange : Tissus d'habitat collectif discontinu ; Rose : Tissus urbains composites ; Vert : Tissus d'habitat pavillonnaire ; Blanc : tronçons de rue non bâtis.



A partir des résultats de l'ACP, une approche dite de « *clustering* » visant à la génération statistique de classes de tronçons de rue ayant des caractéristiques similaires a ensuite été mise en œuvre. Différents découpages ont ainsi été spatialisés (de 2 à 7 classes) sur le secteur d'étude. À la fois synthétique et représentatif de la diversité morphologique du territoire aixois considéré, un découpage en 5 classes, incluant une classe dite « 0 » regroupant tous les tronçons de rue non bâtis du secteur considéré, a finalement été retenu (cf. figure 7).

Ce choix a fait l'objet d'une validation grâce à la confrontation avec d'autres classifications, notamment celles produites par l'agence d'urbanisme du territoire, l'Agence d'urbanisme Pays d'Aix - Durance (AUPA) (cf. figure 8).

Figure 8 : L'analyse typo-morphologique d'Aix-en-Provence déterminée par l'Agence d'urbanisme Pays d'Aix - Durance.



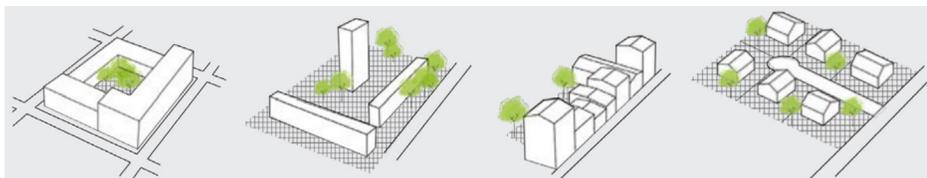
Formes urbaines



■ Espaces bâtis

SOURCE : ANALYSE TYPO-MORPHOLOGIQUE - AUPA - 2/2020

Figure 9 : Illustration indicative des 4 grandes catégories de tissus urbains identifiées par l'ACP avec, de gauche à droite, les tissus d'habitat collectif continu, les tissus d'habitat collectif discontinu, les tissus urbains composites, les tissus d'habitat pavillonnaire (d'après AGAM, 2021).



La spatialisation de ces quatre classes morphologiques a ainsi fait ressortir la structure urbaine très lisible d'Aix-en-Provence. Cette concordance générale entre les classes obtenues et la réalité territoriale a non seulement permis de confirmer la pertinence territoriale des quatre contextes morphologiques statistiquement construits par l'ACP, mais encore d'identifier leur association avec de grandes catégories de tissus urbains :

- les tissus d'habitat collectif continu,
- les tissus d'habitat collectif discontinu,
- les tissus urbains composites,
- les tissus d'habitat pavillonnaire (cf. figure 9).

C'est sur la base de ces unités morphologiques qu'ont été réalisés les relevés écologiques ainsi que les analyses des résultats obtenus. Concrètement, il s'est agi d'appréhender le rôle du réseau viaire dans la composition des communautés et d'évaluer la dispersion des taxons en fonction des différents tissus urbains ainsi mis en évidence.

LE TRONÇON DE RUE POUR MESURER LA BIODIVERSITÉ URBAINE

La typologie de tissus urbains d'Aix-en-Provence établie par le projet BioRev'Aix s'est donc fondée sur la mise en exergue statistique de six variables représentatives. Par la suite, ces dernières ont été envisagées comme des facteurs perturbant ou limitant le maintien, la dispersion ou l'établissement des taxons étudiés. Ainsi, la flore spontanée et la malacofaune ont été inventoriées dans un habitat représentatif des rues : le pied d'arbre. Celui-ci constitue un habitat amené à prendre de plus en plus de place sur le réseau viaire, eu égard aux nouvelles politiques de végétalisation des villes (Plans Canopée, par exemple) qui cherchent, notamment, à lutter contre les îlots de chaleur urbains. De fait, les arbres sont désormais au cœur de politiques publiques volontaristes qui peuvent, par extension, agir sur la biodiversité qui leur est associée.

Selon la Charte de l'Arbre d'Aix-en-Provence (cf. encadré n°3), la ville possède un important patrimoine arboré (2100 arbres). Cependant, celui-ci est en partie fragilisé. En effet, la moitié des sujets recensés a plus de 150 ans, ce qui est un âge bien avancé dans ce contexte urbain. Il en va par exemple ainsi des platanes (*Platanus hispanica*) qui représentent 19 % du patrimoine arboré aixois. Ces arbres d'alignement par excellence, majoritairement situés dans le centre et le long des boulevards, ont vu leurs conditions de croissance se dégrader considérablement depuis leur plantation, et leur présence tendre à la baisse au sein des tissus urbains au cours des dernières décennies. Les Pins d'Alep (*Pinus halepensis*, 18 % du patrimoine arboré), les Micocouliers (*Celtis australis*, 10% du patrimoine arboré) et les Sophoras du Japon (*Styphnolobium japonicum*) dominent, quant à eux, la palette végétale des périphéries aixoises ainsi que les choix de plantation des aménageurs du réseau viaire urbain.

La flore

Le plan d'échantillonnage de la flore spontanée, sise aux pieds des arbres statistiquement déterminés, a reposé sur deux campagnes d'observation effectuées entre les mois de mars et de mai de 2021 et de 2022. 4 tissus urbains, 2 modalités de végétalisation (rues plus végétalisées versus rues moins végétalisées), 12 tronçons de rue par type de tissus urbains et 10 arbres par tronçon de rue ont été investigués, soit un total de 453 pieds d'arbres. Le recouvrement total et spécifique de la végétation ainsi que la richesse spécifique ont été mesurés. Des informations contextuelles, telles que l'essence plantée, la situation du pied d'arbre au sein de la rue (distance du pied d'arbre à la chaussée, à un autre arbre, etc.), son aménagement (type de protection, de revêtement, etc.), ses perturbations anthropiques (détritiques, déjections, piétinement, etc.), ont également été renseignées. L'identification des espèces ou des taxons s'est faite sur le terrain ou en laboratoire à l'aide de différentes flores. Lors du traitement des

données, les tronçons de rue ont été considérés comme des répliqués et les pieds d'arbres comme des pseudo-répliqués. Sur cette base, les données floristiques recueillies sur le terrain ont été soumises à une série de tests statistiques comparatifs et de calculs d'indices écologiques (indice de diversité, indice de similarité).

Au total, 158 espèces, réparties au sein de 31 familles, ont été observées sur les pieds d'arbres échantillonnés, avec une forte variation de présence en fonction des tissus urbains d'inclusion. Ainsi, les tissus d'habitat collectif continu (centre et péricentre) apparaissent comme moins riches en espèces que les tissus pavillonnaires (périphérie), ce qui peut être mis en relation avec les plus fortes perturbations qu'induit le centre urbain dense (cf. tableau 2). Force est alors de souligner l'influence du gradient d'urbanisation sur la richesse spécifique des pieds d'arbre. Une différence significative de richesse spécifique peut toutefois être relevée entre les tissus d'habitat collectif discontinu et les tissus urbains composites, pourtant situés au même niveau du gradient d'urbanisation. Cela laisse entrevoir une certaine influence de la morphologie urbaine sur le nombre d'espèces.

Tableau 2 : Richesse spécifique totale de la flore (Stot), richesse spécifique moyenne d'un tronçon de rue (SmT) et richesse spécifique moyenne de la végétation d'un pied d'arbre (SmP), par tissus urbains et contexte de végétalisation (Nt = nombre de tronçons de rue, NP = nombre de pieds d'arbres). Les deux lettres différentes en exposant indiquent une différence significative au seuil 5%.

Tissus urbains	N_T	N_P	S_tot	S_mT	S_mP
Habitat collectif continu	12	113	66	19,83 ^a	5,81 ^a
Habitat collectif discontinu	12	117	99	26,50 ^{ab}	7,06 ^b
Composite	12	117	105	31,33 ^b	9,42 ^c
Habitat pavillonnaire	11	106	110	30,00 ^{ab}	9,60 ^c
Contexte de végétalisation					
Rue moins végétalisée	24	227	131	28,61 ^a	8,79 ^a
Rue plus végétalisée	23	226	123	25,17 ^a	7,11 ^b

Au regard du contexte de végétalisation, les rues les moins arborées, c'est-à-dire avec un pourcentage de canopée plus faible, montrent une richesse spécifique en plantes statistiquement plus élevée que les rues plus arborées. Ces dernières sont en effet marquées par une canopée importante en lien avec des arbres plus âgés et de grande taille. Dans ce cas, la surface de la base du tronc de l'arbre occupe presque la totalité de la superficie de

la fosse de plantation et réduit l'espace disponible pour le développement de la végétation spontanée. L'étude du recouvrement spécifique conforte cette analyse. Un plus faible recouvrement moyen est effectivement observé au pied des arbres situés dans les tissus d'habitat collectif continu du centre-ville qui se caractérise par la présence de grands sujets âgés. L'ancienneté de la plantation peut induire une érosion de la banque de graines du sol au cours du temps, dès lors que les apports extérieurs de graines sont limités et que les espèces s'étant développées à partir de la banque de graines initiale ont été progressivement éliminées par les perturbations. Le piétinement, les pollutions ainsi que le tassement du sol éliminent, en effet, certaines espèces et impactent le développement aérien de celles qui s'y maintiennent.

Les indices de similarités (indice de jaccard), calculés à partir de la comparaison des listes d'espèces inventoriées au sein des quatre tissus urbains, pris deux à deux, sont faibles et ne dépassent pas 60 %. La plus faible similarité est mesurée entre les tissus d'habitat collectif continu du centre et les tissus pavillonnaires de la périphérie. Ce dernier est, en revanche, plus fortement similaire aux tissus urbains composites. Cela se traduit par différents assemblages d'espèces et donc par des compositions floristiques différentes entre les tissus urbains étudiés et selon leurs contextes de végétalisation. Les espèces communes ont des contributions différentes en fonction des types de tissus urbains observés : *Stellaria media* et *Poa annua* contribuent fortement aux tissus d'habitat collectif continu du centre, tandis que *Bromus madritensis* et *Avena barbata* marquent de leur importance les tissus d'habitat pavillonnaire de la périphérie. Cette variabilité des contributions spécifiques en fonction des différents tissus urbains étudiés démontre que la morphologie urbaine influence quantitativement les communautés végétales des pieds d'arbres.

A cet égard, en accord avec la littérature scientifique, les résultats de l'étude de la chorologie des espèces montrent que les tissus d'habitat collectif continu du centre-ville contiennent la plus faible proportion d'espèces indigènes méditerranéennes, tandis que les tissus urbains composites et d'habitat pavillonnaire de la périphérie en comprennent le plus grand nombre. Il est en outre important de noter que la plus faible proportion est observée au sein des rues les plus arborées. Ce résultat peut alors s'expliquer par l'effet d'ombrage sous-tendu par une importante canopée qui tend à limiter le développement des espèces méditerranéennes (Godfroid et Koedam, 2007).

Les traits biologiques majoritaires mis en évidence sont ceux classiquement rencontrés en ville : espèces thérophytes (annuelles) et hémicryptophytes (plantes en rosette basale), rudérales (espèces de milieux très perturbés) et stress-tolérantes (supportant de faibles niveaux de ressources).

Ils ne diffèrent pas en fonction des tissus urbains d'appartenance ou des contextes de végétalisation de la rue. Si les proportions d'espèces anémogames (24%) et anémochores (31%) sont élevées, on observe toutefois une majorité d'espèces entomogames (68%) (pollinisation par les insectes) et zoochores (60%) (épi- et endozoochores caractérisées par une dissémination des graines par la faune). Ce résultat semble en contradiction avec les études antérieures indiquant que les milieux urbains fournissent très peu d'habitats pour les insectes pollinisateurs (Benvenuti, 2004). Face à ce résultat déjà observé dans la ville de Dijon (Martinez, 2010), on pourrait émettre l'hypothèse selon laquelle les conditions intrinsèques du pied d'arbre, liées aux perturbations associées (piétinement, pollution, nature du substrat...), sélectionnent les espèces appartenant à des familles au mode de reproduction entomogame, sans que ce trait soit lui-même directement sélectionné, pour l'avantage reproductif qu'il procure à la plante. On peut citer par exemple *Sonchus sp.* et *Taraxacum sp.*, appartenant aux astéracées très résistantes au piétinement grâce à la protection du bourgeon apical au cœur de la rosette de feuille basale et très présentes au niveau des pieds d'arbres.

Il faut enfin souligner que les espèces annuelles sont majoritaires dans les relevés réalisés. Elles sont généralement les premières espèces colonisatrices des environnements urbains perturbés (Benvenuti, 2004). Ce résultat suggère que les communautés de la flore spontanée des pieds d'arbres d'Aix-en-Provence se trouvent dans le premier stade de la succession végétale. Cette surreprésentation de certains traits biologiques apparaît donc indépendante des critères identifiés pour qualifier la morphologie urbaine aixoise.

Quoi qu'il en soit, l'étude de la végétation spontanée présente au pied des arbres sis dans les tronçons de rues choisis démontre que les tissus urbains analysés sont bel et bien caractérisés par une flore spécifique, tant en matière de richesse que de recouvrement. La présence des arbres et notamment leur recouvrement par la canopée agit quantitativement (richesse spécifique, proportion espèces méditerranéennes) sur les communautés végétales, probablement en lien avec l'âge des plantations. De fait, s'il est possible de dire que la morphologie urbaine a des effets quantitatifs et qualitatifs sur ces communautés végétales du réseau viaire aixois, d'autres paramètres, tels que le contexte de végétalisation ou les perturbations intrinsèques au pied d'arbre (piétinement, pollution, tassement du sol) ne doivent cependant pas être négligés.

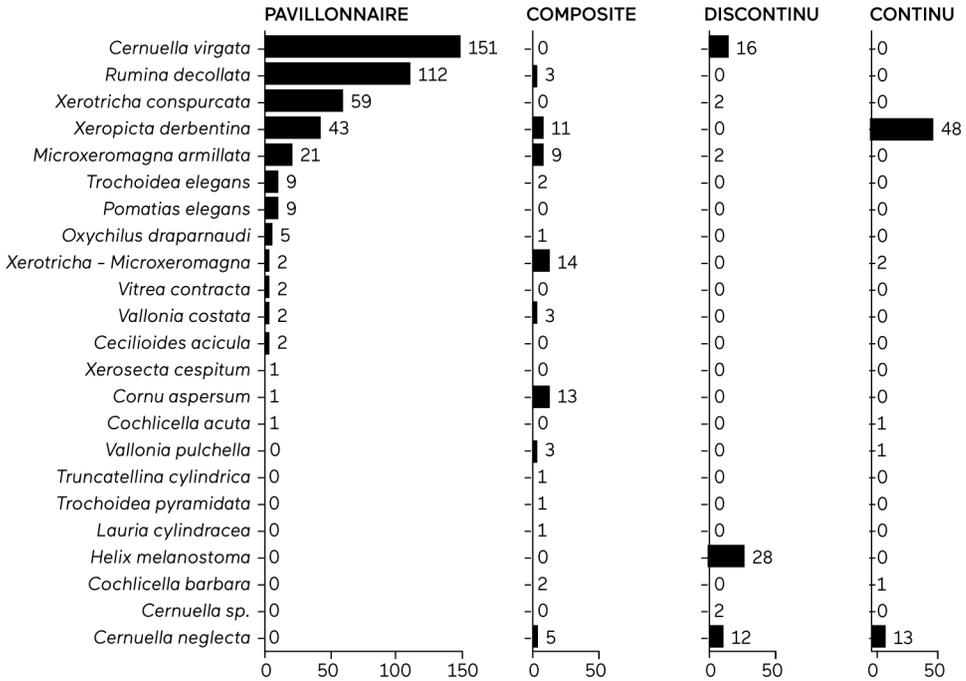
La malacofaune

Les escargots (*Gastropoda*, *Mollusca*) forment un groupe taxonomique peu étudié en milieu urbain. Pourtant, ils jouent un rôle non négligeable dans l'écosystème terrestre, participant activement à la décomposition de la litière. Les escargots, et notamment les micro-escargots, s'avèrent être de bons indicateurs de l'impact de l'usage des sols sur l'intégrité d'un écosystème donné. En raison de leur taille, de leur mobilité limitée et de leur absence de comportement migratoire, ils sont en effet sensibles aux changements d'usage des terres et aux autres perturbations anthropiques. En milieu urbain, des études ont démontré que les escargots vivant dans les arbres et au sol, subissent une diminution de leur diversité et de leur abondance. Néanmoins, certains types d'habitats, tels que les parcs et les jardins, peuvent offrir des communautés riches en espèces.

L'étude de la malacofaune s'est ici centrée sur 48 pieds d'arbres, sis sur 12 tronçons de rue (4 pieds d'arbre par tronçon de rue) représentatifs des 4 tissus urbains étudiés. La méthodologie s'est alors fondée sur des relevés réalisés sur des quadrats d'une surface de 1 m² autour de l'arbre, définis sans prendre en compte l'emprise au sol de ce dernier. Pour les escargots, deux jeux de données ont été obtenus. Le premier concerne la chasse à vue sur un quadrat d'un m² de tous les macro-escargots (> 5 mm) pendant 30 mn pour un observateur. Le second concerne le prélèvement de sol (volume constant de 650g), toujours sur un m², pour l'étude des micro-escargots. Différentes données contextuelles ont par ailleurs été relevées. Il s'agit de l'espèce de l'arbre présent, de sa circonférence, de la nature et du pourcentage de litière, de la hauteur et du pourcentage de recouvrement de la végétation au pied de l'arbre, du pourcentage de sol nu ainsi que de la compacité du sol. A été enfin notée la proximité de l'arbre échantillonné à un espace de végétation spontanée ou plantée dans un rayon de 25 m.

Au total, ce sont 617 coquilles et escargots vivants qui ont été récoltés. 599 ont été identifiés jusqu'à l'espèce. 23 espèces au total ont ainsi été recensées. Quand les espèces *Xeroticha conspurcata* et *Microxeromagna lowei* ne pouvaient être distinguées l'une de l'autre, elles ont été comptabilisées comme un taxon sous la dénomination *Xeroticha_Microxeromagna*. En interrogeant la richesse spécifique et l'abondance, en fonction des tissus urbains déterminés par le modèle, il apparaît que les tissus urbains composites et d'habitat pavillonnaire présentent une richesse spécifique moyenne plus élevée que les tissus d'habitat collectif continu et discontinu (cf. figure 10).

Figure 10 : Diagramme d'abondance des espèces d'escargots aux pieds des arbres en fonction du tissu urbain (de gauche à droite, les tissus d'habitat pavillonnaire, les tissus urbains composites, les tissus d'habitat collectif continu, et les tissus d'habitat collectif discontinu).



Les tissus d'habitat pavillonnaire sont, quant à eux, marqués par une abondance nettement supérieure à celle observée dans les trois autres configurations morphologiques. Il comptabilise ainsi 420 individus, contre 69 pour les tissus urbains composites, 66 pour les tissus d'habitat collectif continu et 62 pour les tissus d'habitat collectif discontinu. Les tissus d'habitat pavillonnaire comprennent, en outre, 15 espèces différentes dont 3 correspondent à plus de 75% des individus récoltés : *Cerneuella virgata* (36%), une espèce invasive mondialement distribuée, *Rumina decollata* (26,6%) et *Xerotricha conspurcata* (14%). Les tissus urbains composites se caractérisent par 14 espèces dont 4 correspondent à plus de 68% des individus récoltés : *Xerotricha Microxeromagna* (20,3%), *Cornu aspersum* (18,8%), *Xeropicta derbentina* (15,9%) et *Microxeromagna lowei* (13%). Les tissus d'habitat collectif discontinu se caractérisent par 6 espèces, dont 3

correspondent à plus de 90% des individus récoltés : *Helix melanostoma* (45,2%), *Cerņuella virgata* (25,8%) et *Cerņuella neglecta* (19,3%). *Helix melanostoma* est inféodée aux terres cultivées et notamment aux olivettes. Elle se disperse très peu et s'enterre pour échapper aux conditions climatiques difficiles (froid, chaleur). De fait, dans les rues où elle est présente, cette espèce relève très certainement de populations relictuelles, maintenues malgré l'urbanisation de terres alentour anciennement cultivées. Enfin, les tissus d'habitat collectif continu se caractérisent par 6 espèces dont 1 est largement majoritaire (72,7 %) : *Xeropicta derbentina*. Cette dernière est présente dans plusieurs types de tissus urbains (pavillonnaire, composite et habitat collectif continu où elle domine). Envahissante et très répandue en Provence, elle a une forte propension à la dispersion passive, notamment via les véhicules motorisés. Par conséquent, la distribution de cette espèce dépend de la présence des voies de communication, en plus du transport de terres. De cette analyse, il ressort donc que la majorité des espèces abondantes de l'étude sont liées aux activités humaines. En outre, il est très clair que les tissus d'habitat pavillonnaire se distinguent par l'abondance des espèces observées.

Les analyses montrent qu'il existe une relation entre les types de tissus urbains et les espèces d'arbres plantés et la nature de la litière observée. Cependant les variables environnementales n'expliquent que 30,7% de l'abondance des espèces de gastéropodes. Même si aucune variable identifiée n'a d'influence particulière sur cette dernière, il est à noter que les pieds d'arbres à proximité d'un ECN présentent une richesse spécifique significativement supérieure aux autres.

Avec 23 espèces identifiées sur 12 tronçons de rue, les pieds d'arbres d'Aix-en-Provence semblent donc présenter une richesse spécifique relativement importante, au regard de la littérature scientifique. Cet état de fait s'explique sans doute par la diversité des habitats que sous-tend la matrice urbaine aixoise. De fait, cette richesse spécifique est préférentiellement périphérique, car plus marquée dans les tissus urbains composites et, surtout, dans les tissus d'habitat pavillonnaire. Ce dernier, caractérisé par une plus grande abondance des gastéropodes, se distingue souvent par des constructions implantées au milieu de la parcelle ou en mitoyenneté qui libèrent de la place pour la végétation et favorisent l'installation des escargots. Ce résultat n'est pas surprenant et rejoint plusieurs travaux antérieurs démontrant une augmentation de la richesse en escargots du centre-ville vers la périphérie (Hodges et McKinney, 2018) et attribuant la cause de ce phénomène à la dégradation de l'habitat en fonction de la densité urbaine. Nombre de chercheurs ont constaté une plus grande fréquence d'habitats dégradés dans les espaces centraux de villes. Aix-en-

Provence n'échappe pas à cette règle. Dans les secteurs de fortes densités urbaines, les arbres subissent effectivement une plus grande pression anthropique qu'ailleurs : les espaces de plantation des arbres sont tassés par des véhicules, piétinés par les citadins, souillés par les déjections canines et niés par les terrasses des restaurants ou les conteneurs à ordures. En conséquence, ces micro-habitats sont souvent dépourvus de végétation et sont caractérisés par des sols fortement compactés. Cela ne favorise en rien le maintien des gastéropodes. En revanche, quel que soit les tissus urbains considérés, les pieds d'arbres situés aux alentours d'un ECN (moins de 25 m), présentent un plus grand nombre d'espèces. Cela s'explique sans doute par une meilleure connectivité de ces micro-habitats entre eux. Ainsi, les ECN situés à proximité de pieds d'arbres, qu'ils soient de plus ou moins grande taille et de différentes natures (parcs, jardins, friches, bandes enherbées, etc.), semblent servir de milieux sources et/ou de zones refuge (Clergeau, 2007). Ils permettent sans doute aux gastéropodes d'accéder à plus de ressources et favorisent l'implantation d'espèces en plus grand nombre.

Par-delà le gradient d'urbanisation, l'influence de la morphologie urbaine

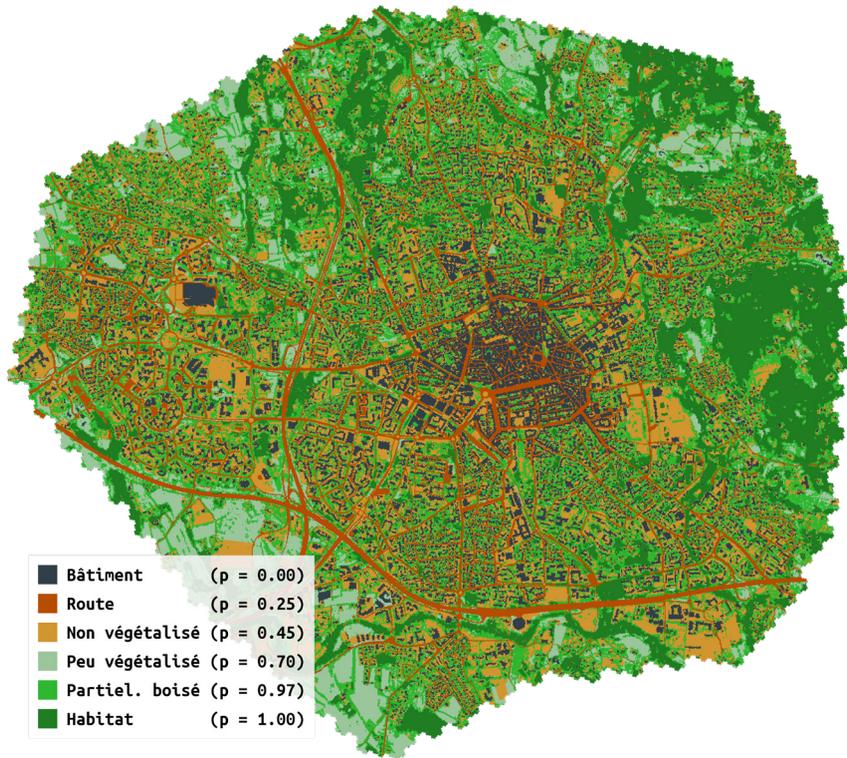
L'analyse croisée des résultats des études de la flore et de la malacofaune montre combien l'influence de la morphologie urbaine vient se superposer à celle du gradient d'urbanisation. La richesse spécifique totale des communautés, mais également la richesse en espèces méditerranéennes, montrent en effet une diminution importante entre les zones pavillonnaires et le centre urbain dense, témoignant de l'impact du gradient d'éloignement des réservoirs périphériques de biodiversité situés à l'extérieur de la ville et des fortes barrières à la dispersion au sein de la matrice urbaine. Toutefois, les tissus urbains intermédiaires, d'habitat collectif continu et composites, situés géographiquement au même niveau du gradient, montrent des variations de richesse spécifique qui ne peuvent être mis en relation uniquement avec ce gradient. En outre, l'évaluation quantitative du recouvrement des espèces végétales, de leur contribution spécifique et de l'abondance des individus pour les gastéropodes révèle que des facteurs inhérents au type de tissu urbain viennent s'interposer dans l'explication des patrons floristiques et faunistiques observés aux pieds des arbres d'alignement. La proximité d'espaces à caractère de nature, les conditions physico-chimiques des pieds d'arbre (compacité du sol, pollution, ensoleillement), l'âge de l'aménagement et les perturbations liées aux usages (piétinement, stationnement, ...) apparaissent comme des facteurs discriminants. Leur représentation (nombre, fréquence, intensité) variant au sein des tissus urbains, on peut en conclure que la morphologie urbaine impacte plus ou moins fortement la biodiversité du réseau viaire.

**LE TRONÇON DE RUE
POUR OPTIMISER LES
CONNECTIVITÉS
ÉCOLOGIQUES**

Parallèlement aux démarches entreprises pour interroger l'influence de la morphologie du tronçon de rue sur la flore spontanée et la malacofaune, il s'est également agi de considérer le tronçon en tant qu'élément d'un réseau viaire interconnecté. Pour ce faire, le travail s'est centré sur l'identification des tronçons de rues sur lesquels il serait théoriquement plus pertinent de planter des arbres afin d'améliorer les connectivités écologiques sur le territoire. En pratique, cette approche de modélisation s'est fondée sur la simulation de l'accroissement de l'aire d'habitat atteignable par l'écureuil roux. Cette espèce commune de rongeurs arboricoles a, en effet, été choisie pour sa propension à utiliser les arbres du réseau viaire comme vecteurs de déplacement à travers la ville. En intégrant les connaissances scientifiques sur les modes de dispersion propres à cette espèce, un algorithme d'aide à la décision a alors été développé (Hamon et *al.*, 2023). Son application aux caractéristiques morphologiques du territoire aixois a conduit à l'identification d'un ensemble de 1569 tronçons de rue dit « à potentiel de renaturation », afin d'améliorer la connectivité écologique des canopées, et ainsi favoriser les déplacements de l'écureuil roux.

Le choix a été fait de s'appuyer sur un graphe hexagonal dont la forme permet de conserver au mieux les distances entre deux points dans l'espace. L'aire d'étude a alors été pavée de 688401 hexagones de 3,77 m de côté (37 m²), pour un total de 25,47 km². Ces choix résultent d'un compromis entre le nombre maximal d'hexagones à traiter et la finesse de la résolution spatiale (cf. figure 11).

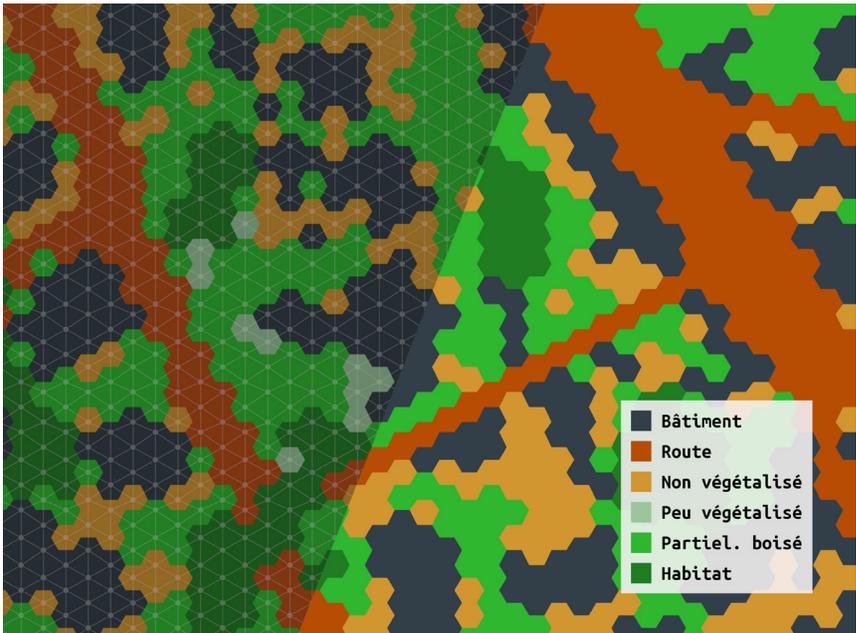
Figure 11 : Cartographie de la ville sous la forme d'hexagones auxquels est attribuée une valeur de probabilité de traverser pour l'écureuil roux, de 1 en vert à 0 en noir.



En fonction du niveau de sa surface arborée, chaque hexagone a été associé à un potentiel d'habitat. Chaque hexagone a également été associé à une probabilité de connexion (qui correspond à la probabilité qu'un individu écureuil réussisse à le traverser, sur la base d'une capacité moyenne de dispersion de 1500 m) dépendant du couvert sous-jacent : 1 pour de l'habitat, 0.97 pour des zones partiellement boisées, 0.7 pour des zones avec peu de végétation, 0.45 pour des zones non végétalisées, 0.25 pour les routes et 0 pour les bâtiments. Le graphe a ensuite été simplifié pour ne garder que les éléments susceptibles d'avoir une influence sur la valeur de l'indice de connectivité, et ce, sans que les surfaces totales en habitat et les probabilités de passer d'un nœud à un autre ne soient modifiées. Les

hexagones infranchissables (type bâti avec probabilité de passage de 0) qui ne pourront jamais contribuer à un chemin de moindre coût entre deux nœuds ont été supprimés (cf. figure 12).

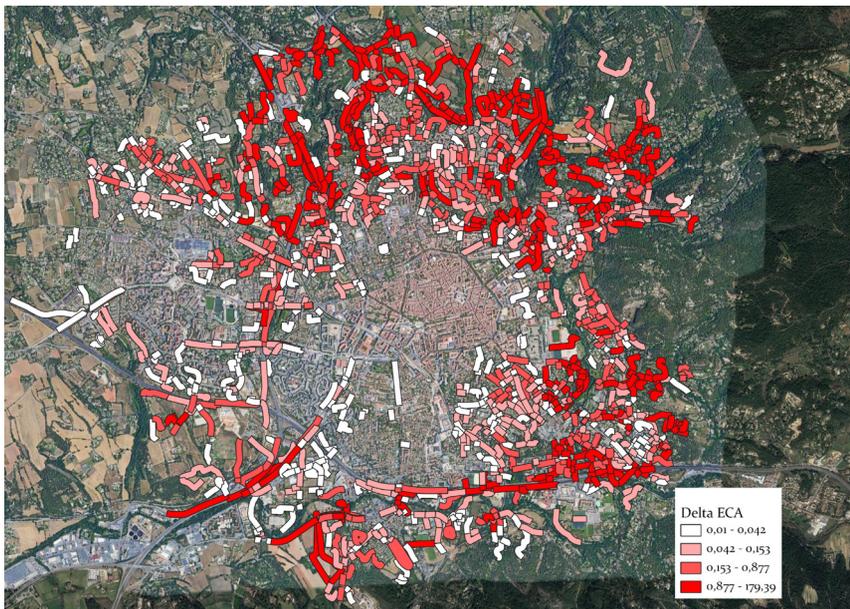
Figure 12 : Zoom sur une petite surface d'hexagones. À gauche - le graphe représentant les connexions entre les hexagones, utilisé pour le calcul des indices de connectivité écologique et dont les arêtes sont pondérées par la résistance des hexagones traversés. À droite - les couleurs correspondant aux niveaux de résistance au déplacement de l'écureuil roux du plus faible (habitat en vert foncé) au plus fort (zones de bâti en noir).



A partir du graphe décrit ci-dessus, l'importance des différents tronçons de rue et leur potentielle contribution à la connectivité globale du graphe de l'écureuil roux a été testée. Ici, la connectivité a été considérée comme l'aire équivalente connectée du graphe qui est une mesure de quantité d'habitat atteignable (ou l'aire d'habitat qui serait disponible pour l'espèce si toutes les connexions étaient de bonne qualité, sans barrières ou zones difficiles à franchir) (Saura et al., 2011). La question qui se pose alors est de savoir dans quels tronçons de rue il est le plus efficace de planter des arbres afin d'améliorer l'aire d'habitat atteignable par les écureuils roux dans la ville d'Aix-en-Provence. Sans prendre en compte les effets cumulés que pourrait engendrer une végétalisation simultanée d'une plurali-

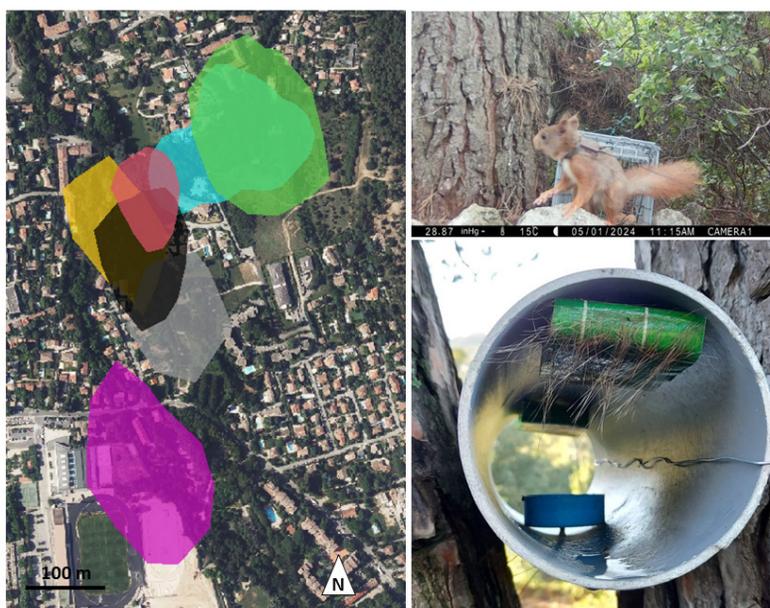
té de tronçons de rue, une manière de répondre à cette question est de tester indépendamment l'effet de plantations dans chaque tronçon de rue. On suppose ici que ces plantations augmentent la perméabilité des hexagones par un facteur 6 ; cela correspond à faire passer la probabilité de connexion d'un hexagone non végétalisé (0.45) à un hexagone partiellement arboré (0.9). On modifie donc la perméabilité pour l'ensemble des hexagones d'un tronçon de rue, et ceci est testé pour chaque tronçon de rue susceptible d'être végétalisé (Bodin et al., 2010). La valeur de connectivité équivalente du graphe est calculée avant et après ces modifications. Les changements relatifs dans la connectivité équivalente donnent un rang de priorité pour chaque tronçon de rue (ces changements relatifs sont notés delta ECA). On peut ainsi identifier les tronçons de rue dans lesquels les plantations d'arbres auraient le plus d'effet sur la connectivité globale pour l'écureuil roux (cf. figure 13). Le nombre de tronçons de rue choisis peut être déterminé en fonction des capacités d'investissement de la collectivité concernée dans le réaménagement de son réseau viaire.

Figure 13 : Sélection des tronçons de rue sur lesquels le potentiel de renaturation est le plus important et sur lesquels la densification du réseau écologique pourrait être la plus efficace pour favoriser les déplacements de l'écureuil roux dans la ville.



La spatialisation de ces tronçons de rue à potentiel met clairement en exergue l'importance des situations de franges ville-nature et de liaisons de périphérie à périphérie. De tels résultats invitent alors à ne pas seulement envisager les démarches de végétalisation urbaine comme de simples formes de compensation de la minéralité des espaces centraux, mais plutôt comme des sources d'interpénétration entre ville et nature (Chalas, 2010). Ces résultats sont désormais testés sur le terrain avec la mise en œuvre de suivis GPS et d'analyses de génétique des populations sur les écureuils roux dans la ville d'Aix-en-Provence, pour identifier les potentielles barrières au mouvement pour cette espèce *in natura* (cf. figure 14).

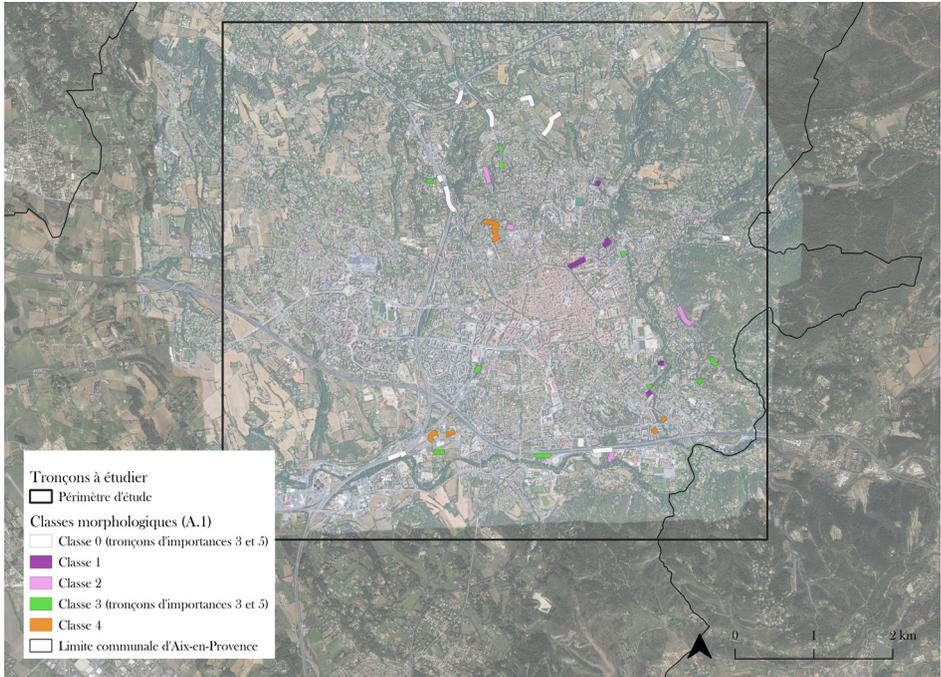
Figure 14 : Suivis des mouvements et des flux génétiques d'écureuils roux dans la ville d'Aix-en-Provence. Image de gauche : Utilisation de l'espace par 7 individus équipés de colliers GPS dans les parcs urbains de la Torse et de la Cortesine, les domaines vitaux (surfaces colorées, une par individu, indiquent les zones où l'individu se trouve le plus fréquemment) sont petits et centrés sur les espaces boisés. Image de droite, en haut : Ecureuil équipé d'un GPS devant une cage-piège, vue d'un piège photographique. Image de droite, en bas : Tube collecteur de poils installé dans un parc pour analyser les liens de parenté entre les individus et en déduire les flux de gènes et d'individus, permettant d'identifier les barrières aux mouvements des individus. On distingue un échantillon de poils sur le scotch Pelton® placé à l'extrémité du tube (tube PVC, diamètre 10 cm, longueur 30 cm), le bouchon bleu sert à disposer une noix en guise d'appât. Crédits : Cécile Albert, Victorine Demiralp, Aurélie Coulon, projet SCALED ERC-STG no 949812.



Ce travail a également contribué au développement d'un outil d'aide à la décision innovant mis à la disposition des partenaires de la ville d'Aix afin d'accompagner la mise en œuvre de sa politique de végétalisation du réseau viaire. L'outil, appelé GECOT pour *Graph-based Ecological Connectivity Optimization Tool*, a maintenant évolué pour prendre en compte les effets cumulés des actions de végétalisation sur la connectivité des habitats, permettant ainsi de trouver la combinaison de tronçons à végétaliser menant à la plus forte augmentation de l'aire atteignable d'habitat (Hamonnic et al., 2023, Hamonnic et al., 2025). Il offre également la possibilité d'intégrer en même temps les besoins de différentes espèces en traitant plusieurs graphes d'habitat en parallèle. D'une manière générale, l'outil est flexible et applicable à d'autres espèces dans d'autres villes, mais peut aussi être utilisé pour traiter d'autres questions de connectivité comme celles des réseaux de mobilité douce par exemple.

A partir de ce travail de modélisation et de simulation informatiques, le projet BioRev'Aix s'est ensuite intéressé à évaluer les conditions concrètes d'une renaturation des tronçons de rue à potentiel identifiés, tant en matière d'acceptabilité par les parties prenantes territoriales impliquées que de faisabilité technique dans le contexte aixois. Pour ce faire, il s'est agi d'identifier des tronçons de rue à potentiel à étudier de manière plus qualitative. Il a pour cela été décidé de sélectionner des tronçons de rue à potentiel à la fois représentatifs des 4 classes morphologiques précédemment identifiées, mais aussi des différents types de voies considérées, ici interrogées du point de vue du trafic routier. Cette donnée a été intégrée par la prise en compte du niveau d'« Importance » associé à chaque tronçon de rue au sein de la BD TOPO, allant du niveau 2 (« voies de liaisons inter-départements »), au niveau 5 (« voies circulables permettant de desservir l'intérieur d'une commune ») (IGN, 2021, p. 334). Sur la base du croisement de ces 2 critères, 35 tronçons de rue à potentiel de renaturation représentatifs de l'ensemble ont été sélectionnés (cf. figure 15), afin de faire l'objet d'analyses plus fines.

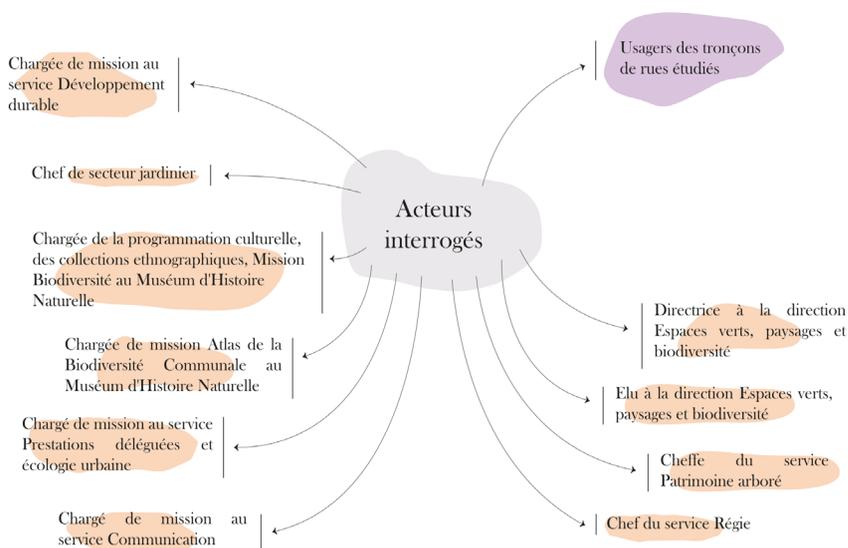
Figure 15. Localisation des 35 tronçons de rue à potentiel retenus.



**LE TRONÇON DE RUE POUR
RÉVÉLER LA GOUVERNANCE
DE LA NATURE EN VILLE ET
DE LA BIODIVERSITÉ
URBAINE**

A partir de ces 35 tronçons de rue à potentiel de renaturation statistiquement déterminés, une série d'enquêtes a ensuite été réalisée auprès d'une diversité d'acteurs aixois afin de déterminer leurs attentes, leurs compétences et leurs représentations en matière de nature et de biodiversité urbaines. Pour ce faire, des entretiens semi-directifs approfondis ont été menés auprès d'un ensemble de parties prenantes territoriales (cf. figure 16) : élus (1 entretien), techniciens (9 entretiens allant du chef de service au jardinier), habitants et usagers (19 entretiens réalisés *in situ* sur les tronçons de rue à potentiel de renaturation précédemment identifiés).

Figure 16 : Les acteurs aixois interrogés.



Sur la base des 19 entretiens réalisés, il est apparu que les habitants et les usagers du territoire aixois ont des considérations assez communes de la nature et de la biodiversité urbaines, si l'on en croit la littérature scientifique (Marco et al., 2014). Pour eux, elle est principalement représentée par les parcs, les jardins et les arbres appartenant au domaine public. Si l'arbre urbain, chargé de valeurs positives, apparaît au coeur des attentes des populations (cf. figure 17), ces dernières n'accordent, en revanche, que peu d'intérêt à la végétation spontanée (cf. figure 18). Pour la plupart des personnes enquêtées, il est en outre important que les expressions de la nature et de la biodiversité soient encadrées et maîtrisées par les gestionnaires urbains, afin qu'elles n'empiètent pas sur les fondements et les fonctionnements anthropiques de la ville.

Figure 17 : Perceptions des habitants et usagers à l'égard de l'arbre urbain.

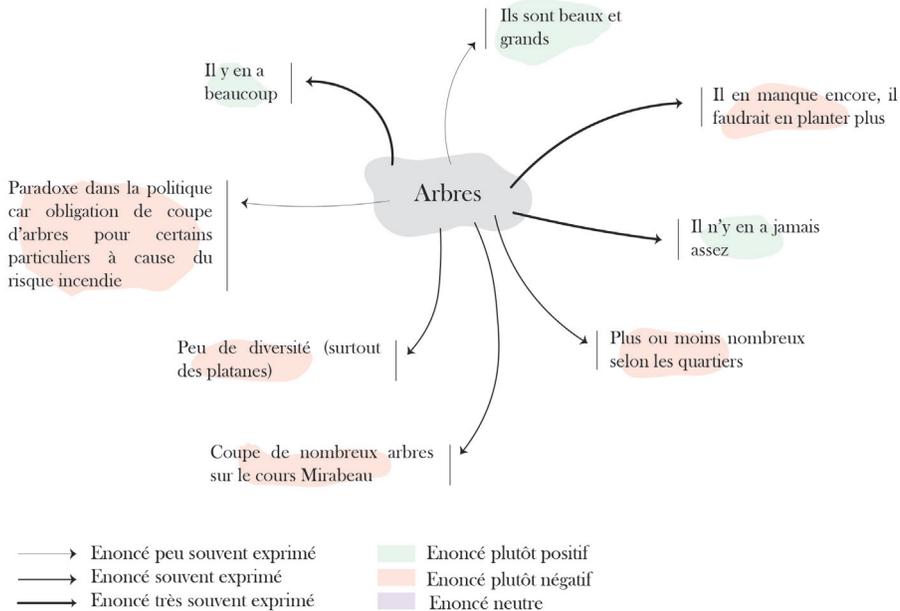
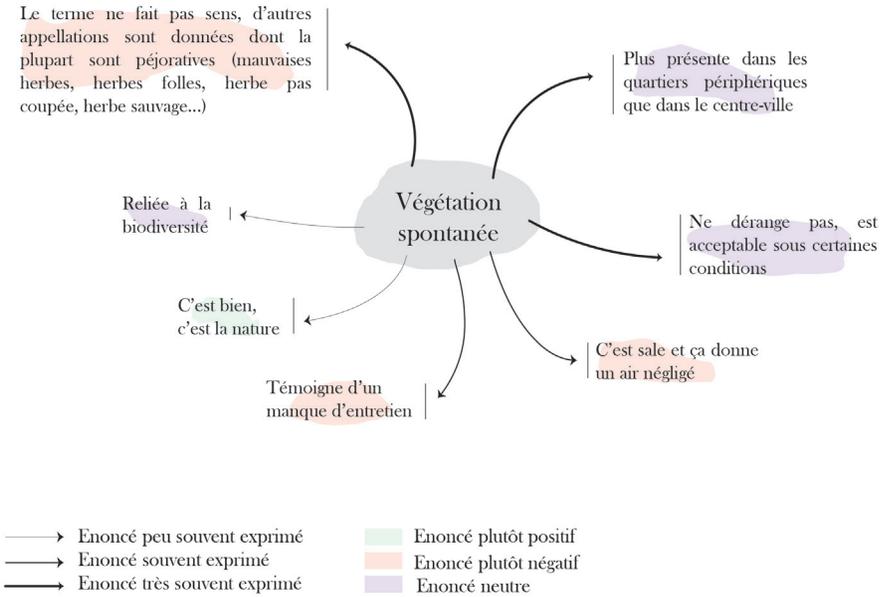


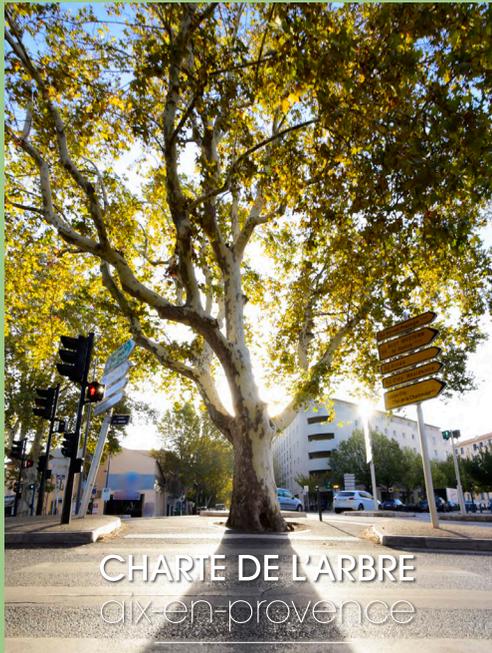
Figure 18 : Perceptions des habitants et usagers à l'égard de la végétation spontanée.



Parallèlement aux entretiens effectués auprès des habitants et usagers des 35 tronçons de rue sélectionnés, 10 entretiens ont été réalisés auprès de différents acteurs institutionnels. Cette démarche a permis de mieux comprendre les tenants et les aboutissants de la gestion de la nature. De façon générale, ces acteurs ont une vision assez homogène et élargie de cette dernière. En effet, lorsqu'ils tâchent de la définir, ils ne l'associent pas seulement aux parcs et jardins mais également aux arbres, aux plantes et aux parterres, c'est-à-dire à l'ensemble des formes végétales sises au sein des tissus urbains. Tous soulignent que les actions en faveur de la nature urbaine sont fondamentales non seulement pour le maintien et le développement de la biodiversité, mais aussi pour le bien-être des usagers de la ville. En outre, ces acteurs institutionnels précisent que la végétation spontanée est importante pour la biodiversité urbaine. Néanmoins, pour la majorité des acteurs municipaux, c'est l'augmentation de la plantation

d'arbres et éventuellement la végétalisation au pied de certains arbres qui constituent, en réalité, l'avenir de la nature urbaine à Aix-en-Provence. L'arbre et son pied tiennent donc une place centrale dans la stratégie biodiversitaire d'Aix-en-Provence, comme en témoigne l'emblématique Charte de l'arbre de la ville (cf. encadré n°3).

Encadré n°3 : La charte de l'arbre d'Aix-en-Provence



La Charte de l'arbre urbain à Aix-en-Provence est un document qui vise à encadrer la gestion du patrimoine arboré de la ville. Elle a été adoptée en 2017, afin notamment de travailler au renouvellement d'un patrimoine arboré remarquable, mais néanmoins fragilisé. Ainsi près de la moitié des arbres aixois a plus de 150 ans, et certains, comme les platanes, sont menacés par des maladies (chancre coloré). Bien qu'envisagée depuis plusieurs années déjà, la mise en place effective de la charte a en effet été accélérée par les polémiques suscitées par l'abattage dans le courant des années 2010 de platanes atteints par le chancre coloré sur l'emblématique Cours Mirabeau. Un ensemble de collectifs citoyens se montent alors, remettant en question le bien-fon-

dé de ces démarches et, par extension, la gestion opérée par la municipalité sur son patrimoine arboré (Lagane, 2019). Cette polémique a incité l'exécutif municipal à donner plus de moyens pour la gestion du patrimoine arboré, conduisant à la création de ladite charte dont les objectifs principaux consistent à :

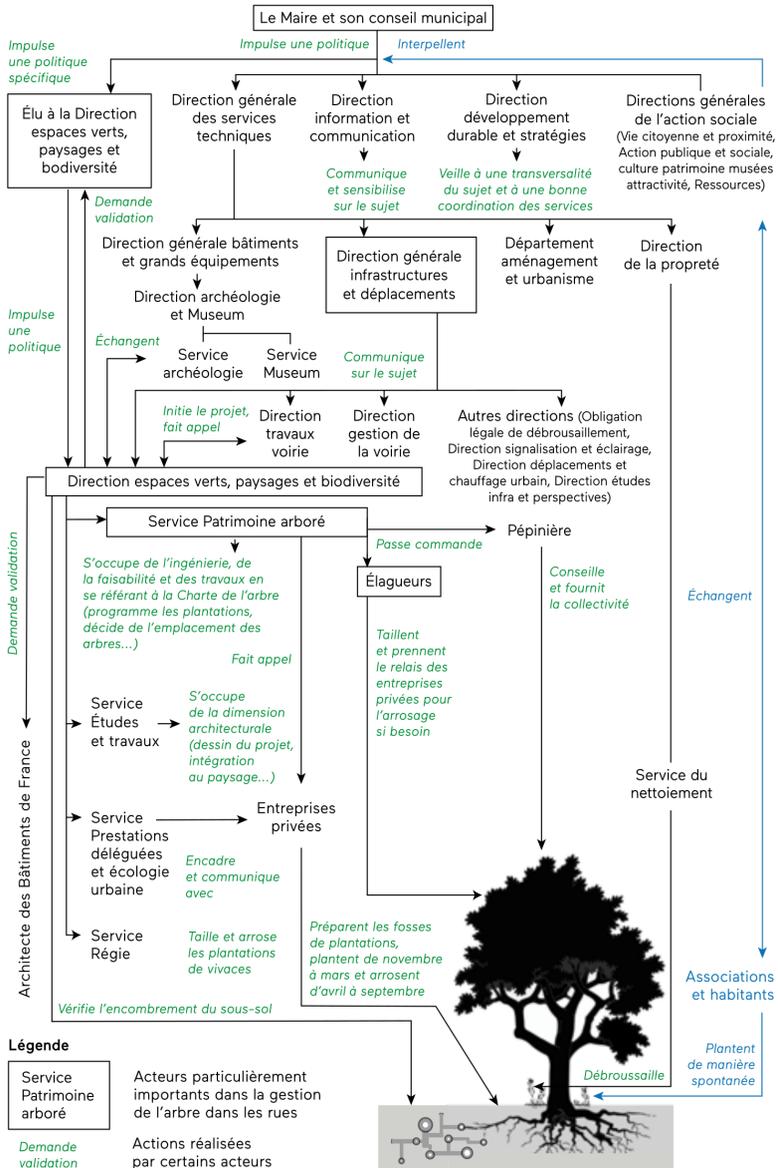
- Sensibiliser à l'importance de l'arbre en ville, notamment face au réchauffement climatique.
- Intégrer les avancées scientifiques sur la biologie et la gestion des arbres.
- Adapter et faire évoluer les pratiques, en privilégiant ce qui est bénéfique.
- Préparer l'avenir en planifiant le renouvellement (choix des espèces, modes et lieux de plantation).
- Changer de paradigme : placer l'arbre, être vivant difficilement remplaçable, au cœur des décisions d'aménagement public.
- Faire de l'arbre un vecteur de biodiversité et de nature en ville.
- Développer la communication et la sensibilisation auprès du public.

La charte se décline en trois axes concrets :

- Planter plus et mieux : développer le patrimoine arboré, choisir l'arbre adapté à chaque site, garantir des conditions de plantation optimales.
- Maintenir un patrimoine arboré durable : accompagner les jeunes arbres, pratiquer une taille douce et raisonnée, surveiller la santé des arbres.
- Placer l'arbre au cœur des projets urbains : limiter les abattages, compenser ceux qui sont nécessaires, renforcer la nature en ville et mieux encadrer les chantiers pour protéger les arbres existants.

En écho à ces orientations, l'adoption de la Charte de l'arbre a été suivie en septembre 2018 par la création d'une Mission dédiée à la Gestion du patrimoine arboré. Intégrée à la Direction des Espaces Verts (parallèlement transformée en Direction des Espaces Verts, Paysage et Biodiversité), sa mise en place s'est accompagnée du recrutement, longtemps attendu en interne, d'une technicienne de l'arbre et d'un surveillant de travaux. Cette mission Gestion du patrimoine arboré a pour objectif de superviser l'ensemble des opérations liées aux arbres (suivi phytosanitaire, organisation et contrôle des travaux d'abattage, élagage, plantation) et de piloter la politique de l'arbre (suivi des doléances, recensement, assistance technique, marchés publics). La charte est un outil collectif : elle engage la municipalité, mais invite aussi les citoyens, entreprises et associations à contribuer à la préservation et à la valorisation des arbres urbains, dans une démarche de responsabilité partagée et de transmission de ce patrimoine vivant aux générations futures.

Figure 19 : L'écosystème complexe des acteurs de l'arbre à Aix-en-Provence (réalisation : Noémie Montel).



Malgré cette apparente forme de consensus, la gestion quotidienne de ces éléments de nature urbaine, et *a fortiori* de l'arbre de voirie, n'en demeure pas moins complexe (cf. figure 19). Elle implique en effet de très nombreuses parties prenantes, et ce, malgré l'intégration de nombreuses actions en régie. Pas moins de 5 directions municipales (directions Espaces verts, paysage et biodiversité ; Travaux et voirie ; Archéologie et Museum ; Propreté ; Action sociale) sont en effet plus ou moins directement impliquées dans la gestion des arbres de rue aixois. A celles-ci, il faut rajouter les entreprises paysagistes privées chargées de leur entretien, mais également les sociétés responsables des réseaux enterrés qui peuvent influencer les choix et les tracés des plantations, ou encore l'architecte des bâtiments de France qui intervient dans les secteurs sauvegardés.

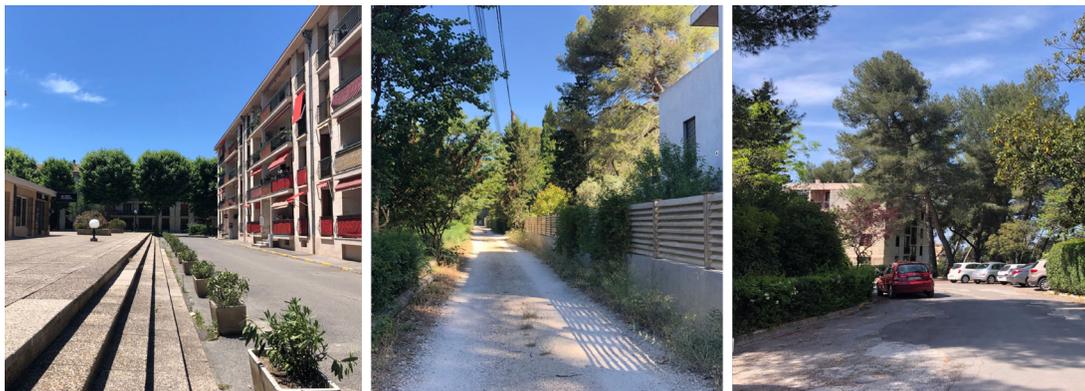
De fait, pour une ville comme Aix-en-Provence, affirmer une politique en faveur de la biodiversité urbaine passe obligatoirement par des efforts de décloisonnement de sa gestion et par de nouveaux modes de gouvernance des différentes formes de nature urbaine. Cela passe aussi par l'élaboration de projets de végétalisation démonstrateurs des plus-values du développement de la biodiversité urbaine, prenant appui sur les valeurs unanimement positives que revêtent les plantations d'arbres. C'est sur cette base d'enquête auprès des parties prenantes territoriales (habitants, usagers et acteurs institutionnels) que des propositions d'amélioration des connectivités écologiques au sein des tronçons de rue identifiés par l'algorithme ont été établies, en cohérence avec leurs attentes et les capacités d'intervention des différents acteurs institutionnels.

**LE TRONÇON DE RUE
POUR (A)MÉNAGER LA
BIODIVERSITÉ URBAINE**

En lien avec leurs contextes périphériques d'insertion, les premiers arpentages des 35 tronçons de rue à potentiel investigués ont rapidement mis en lumière la place prépondérante occupée en leur sein par la végétation sise dans l'espace privé (cf. figure 20). Afin de bien prendre cet élément en considération dans l'analyse, il a été décidé de soumettre cet échantillon à une grille d'analyse permettant une caractérisation *in situ* (i) de leur potentiel écologique, (ii) de leur valeur d'usage, et (iii) de leur contexte morphologique intégrant la question des interfaces entre espaces publics et espaces privés. Pour pallier le manque, constaté dans la littérature, d'outils globaux permettant une étude conjointe et normée des valeurs écologiques, des valeurs d'usage, et des caractéristiques morphologiques de tronçons de rue, l'enjeu a alors été de développer une grille d'analyse spécifiquement applicable à cette échelle. Afin que celle-ci soit la plus répliquable possible tout en bénéficiant des apports d'outils ayant déjà fait l'objet d'une validation scientifique, le choix a été fait de prendre autant que possible appui sur des outils déjà existants. Après différentes recherches, comparaisons et tests d'outils, deux ont été retenus, du fait de leur bonne adaptation à l'échelle du tronçon de rue, de leur complémentarité, et de leur relative simplicité d'utilisation :

- l'indicateur RENATU (Pech et al., 2022), centré sur la composante écologique ;
- et l'outil Pedestrian Environmental Data Scan (PEDS) (Clifton et al., 2007), mettant l'accent sur la valeur d'usage.

Figure 20 : Exemples de situations rencontrées au cours des premiers arpentages au sein des 35 tronçons de rue retenus.



Encadré n°4 : Présentation de l'indicateur RENATU

L'indicateur RENATU

Pour caractériser la valeur écologique des tronçons de rue étudiés, il a été décidé d'utiliser l'indicateur Renatu (pour RENATUration) développé dans le cadre du projet éponyme, lauréat de l'appel à projets 2014 du programme Infrastructures de transports, territoires, écosystèmes et paysages (ITTECOP). La grille d'analyse correspondante (Pech et al., 2022) a été développée pour caractériser la biodiversité potentielle des espaces verts intégrés aux infrastructures de transport urbaines, industrielles et linéaires (ITUIL). Composée de neuf indices à évaluer sur une échelle de 0 à 5, cette grille est apparue répondre aux problématiques propres à BioRev'Aix. D'une part, elle a déjà été testée sur plus de 100 sites différents et bénéficie donc d'une certaine robustesse scientifique. D'autre part, elle a été pensée pour être rapide à mettre en place et facilement appropriable. Ses concepteurs recommandent de l'utiliser en période de floraison, ce qui correspond à la période des relevés de terrain effectués.

Encadré n°5 : Présentation de l'outil PEDS

L'outil *Pedestrian Environmental Data Scan* (PEDS)

Développée dans le courant des années 2000 par Andrea D. Livi Smith et Kelly J. Clifton au sein de l'université du Maryland (États-Unis) (Clifton et al., 2007), la grille d'analyse Pedestrian Environmental Data Scan (PEDS) a été conçue pour mesurer les caractéristiques environnementales liées à la marche dans divers contextes urbains aux États-Unis. Cet outil s'appuie sur une grille d'analyse comprenant 35 critères normés. Conçu pour pouvoir être rapidement mis en œuvre, cet outil se trouve cité dans de nombreux articles scientifiques. Parmi l'ensemble des grilles et outils consultés, celle-ci s'est révélée être la plus adaptée aux besoins, car succincte, complète, scientifiquement validée et accompagnée d'un protocole d'observation clair pour l'analyse des tronçons de rue.

S'ils ont permis de valider la pertinence d'une application conjointe des grilles RENATU et PEDS à la qualification des tronçons de rue à potentiel, les différents essais réalisés ont également mis en lumière le manque d'éléments de caractérisation de la nature des interfaces entre espaces publics et espaces privés. Afin de compléter le volet morphologique de ces deux premiers outils, un troisième a été créé *ex nihilo* pour l'occasion : la grille « frontage ».

Cette question des relations entretenues entre l'ensemble bâti-parcellaire et le réseau viaire a depuis plusieurs années fait l'objet d'un fort réinvestissement dans le champ de l'urbanisme. Ceci notamment au travers de la question des « rez-de-chaussée » qui, pris comme éléments d'interface entre domaine public et espace privé, ont fait l'objet de nombreuses publications ces dernières années (Masbouni, 2013). Ce regain d'intérêt s'est également accompagné de la diffusion des idées et travaux de l'architecte-urbaniste danois Jan Gehl autour du concept de « ville à échelle humaine » (Gehl, 2012), mettant en particulier l'accent sur l'importance des façades urbaines comme éléments d'animation urbaine, génératrices d'usages et de pratiques.

Si de telles conceptions sur l'importance des interfaces entre ensemble bâti/parcellaire et espaces publics s'appliquent de manière assez évidente aux secteurs urbains les plus centraux où le bâti tend à s'aligner sur la rue au niveau de la limite de propriété, celles-ci peuvent également être étendues à des secteurs où l'implantation du bâti à l'alignement n'est plus forcément l'usage. Les différents retraits en présence peuvent alors ménager de la place pour d'autres formes d'usages et d'appropriations qui, malgré leurs régimes privés, peuvent pourtant pleinement participer de l'agrément de l'espace public en termes de sociabilité, mais aussi de végétalisation. Ainsi, et, quel que soit l'espace urbain considéré, la question de l'interface publique/privée entre ensemble bâti/parcellaire et espaces publics apparaît, en tant qu'échelle intermédiaire entre le logement et la ville, à la croisée de multiples enjeux d'ordres tant urbanistiques qu'écologiques. L'encouragement à la réappropriation « citoyenne », mais accompagnée par la collectivité, de ces espaces privés de bord de rue constitue d'ailleurs le cœur du propos de l'architecte-urbaniste Nicolas Soulier dans son ouvrage « Reconquérir les rues » (Soulier, 2012). Afin de favoriser leur prise en considération, celui-ci propose de remobiliser à leur sujet la notion nord-américaine de « frontage », qu'il définit comme suit :

« Un frontage est formé par le terrain privé situé entre la limite de propriété et la façade du bâtiment en retrait tournée vers la rue ; les éléments de cette façade jusqu'à la hauteur du 2^e étage ; les entrées orientées vers la rue ; une combinaison d'éléments architecturaux tels que clôtures, perrons, vérandas et galeries d'entrée » (Soulier, 2012, p. 126).

Figure 21. Extrait de la caractérisation des typologies de frontages privés du Smart Code (Duany Sorlien et Wright, 2012).

	SECTION	PLAN
	LOT PRIVATE FRONTAGE ← R.O.W. PUBLIC FRONTAGE	LOT PRIVATE FRONTAGE ← R.O.W. PUBLIC FRONTAGE
<p>a. Common Yard: a planted Frontage wherein the Facade is set back substantially from the Frontage Line. The front yard created remains unfenced and is visually continuous with adjacent yards, supporting a common landscape. The deep Setback provides a buffer from the higher speed Thoroughfares.</p>		 T2 T3
<p>b. Porch & Fence: a planted Frontage wherein the Facade is set back from the Frontage Line with an attached porch permitted to Encroach. A fence at the Frontage Line maintains street spatial definition. Porches shall be no less than 8 feet deep.</p>		 T3 T4
<p>c. Terrace or Lightwell: a Frontage wherein the Facade is set back from the Frontage line by an elevated terrace or a sunken Lightwell. This type buffers Residential use from urban Sidewalks and removes the private yard from public Encroachment. Terraces are suitable for conversion to outdoor cafes. Syn: Dooryard.</p>		 T4 T5
<p>d. Forecourt: a Frontage wherein a portion of the Facade is close to the Frontage Line and the central portion is set back. The Forecourt created is suitable for vehicular drop-offs. This type should be allocated in conjunction with other Frontage types. Large trees within the Forecourts may overhang the Sidewalks.</p>		 T4 T5 T6
<p>e. Stoop: a Frontage wherein the Facade is aligned close to the Frontage Line with the first Story elevated from the Sidewalk sufficiently to secure privacy for the windows. The entrance is usually an exterior stair and landing. This type is recommended for ground-floor Residential use.</p>		 T4 T5 T6
<p>f. Shopfront: a Frontage wherein the Facade is aligned close to the Frontage Line with the building entrance at Sidewalk grade. This type is conventional for Retail use. It has a substantial glazing on the Sidewalk level and an awning that may overlap the Sidewalk to within 2 feet of the Curb. Syn: Retail Frontage.</p>		 T4 T5 T6
<p>g. Gallery: a Frontage wherein the Facade is aligned close to the Frontage line with an attached cantilevered shed or a lightweight colonnade overlapping the Sidewalk. This type is conventional for Retail use. The Gallery shall be no less than 10 feet wide and should overlap the Sidewalk to within 2 feet of the Curb.</p>		 T4 T5 T6
<p>h. Arcade: a colonnade supporting habitable space that overlaps the Sidewalk, while the Facade at Sidewalk level remains at or behind the Frontage Line. This type is conventional for Retail use. The Arcade shall be no less than 12 feet wide and should overlap the Sidewalk to within 2 feet of the Curb. See Table 8.</p>		 T5 T6

Nicolas Soulier complète par ailleurs cette définition en différenciant le frontage public, le frontage privé et la ligne de frontage, que constitue « la limite d'une propriété privée qui la sépare du domaine public de la voirie » (Soulier, 2012, p. 126). Au regard d'un contexte urbain périphérique d'investigation où les alignements sur rues sont minoritaires, l'apport d'une grille dédiée à la qualification de ces espaces de frontage apparaît donc pertinente à mobiliser en complément des grilles RENATU et PEDS.

Les recherches bibliographiques opérées n'ayant pas permis d'identifier de grille d'analyse « clé en main », répondant aux attentes, le choix a alors été fait de créer une grille *ad hoc*, à la fois inspirée de travaux existants et capitalisant sur les retours de terrains issus des arpentages. Parmi les principales sources d'inspiration ayant présidé à l'élaboration de cette troisième grille, plusieurs travaux peuvent en particulier être cités, au premier rang desquels le *Smart Code* (Duany Sorlien et Wright, 2012) (cf. figure 21), outil nord-américain d'aménagement issu du courant du New Urbanism et structuré autour d'un *transect* rural-urbain mettant au cœur de sa réflexion la notion de frontage, ainsi qu'un mémoire de fin d'études de l'Institut d'urbanisme de Grenoble s'intéressant à l'analyse des frontages du Plateau-Mont-Royal à Montréal (Vettorel, 2017).

Certains critères d'observation des frontages proposés par ce dernier (qualification de leur appropriation paysagère, sociale, et le rapport que les bâtiments entretiennent avec le sol) ont notamment été adaptés au contexte aixois. Les essais et arpentages de terrains ont également permis de faire remonter l'absence de certains critères pourtant jugés importants au sein des grilles RENATU et PEDS, tels que la présence de flore spontanée en pied d'arbres. Pour ne pas effectuer de modifications au sein de ces deux premières grilles, ces quelques critères dont l'absence a été jugée préjudiciable ont ainsi été ajoutés à la grille dite frontage (cf. figure 22). L'outil résultant se compose de quatre grandes parties : caractérisation du réseau viaire, caractérisation du frontage public, caractérisation de l'interface entre les frontages public et privé et caractérisation du frontage privé. Pour chacune de ces parties, il est possible de passer certains éléments qui ne seraient pas pertinents. À titre d'exemple, si le tronçon de rue étudié se trouve dans une résidence privée (ce qui était le cas de près d'un tiers des tronçons de rue étudiés), il est possible de ne pas tenir compte de la partie relative à la caractérisation du frontage public.

Figure 22 : Grille d'analyse des frontages.

Cette grille se remplit selon un frontage type pour chaque tronçon de rue. S'il n'y a aucun frontage représentatif, la grille peut être remplie plusieurs fois.

A. CARACTÉRISATION DU RÉSEAU VIAIRE

1. Présence d'une voie publique ?

1.1 Si oui, qualifier l'importance de la voie : 1, 2, 3, 4, 5, 6

1.2 Si oui, qualifier la largeur de la voie publique (en mètre) : 0 à 2m ; 2 à 4m ; 4 à 6m ; > 6m

2. Présence d'une voie privée ?

2.1 Si oui, qualifier l'importance de la voie : 1, 2, 3, 4, 5, 6

2.2 Si oui, qualifier la largeur de la voie privée (en mètre) : 0 à 2m ; 2 à 4m ; 4 à 6m ; > 6m

2.3 Si oui, présence d'un trottoir ?

2.3.1 Si oui, largeur du trottoir (en mètre) : 0 à 1m ; 1 à 2m ; 2 à 3m ; > 3m

B. CARACTÉRISATION DU FRONTAGE PUBLIC

1. Largeur du trottoir (en mètre) : 0 à 1m ; 1 à 2 m ; 2 à 3m ; > 3m

2. Typologie du frontage public : absence de frontage public (si absence, sauter les questions suivantes et passer au C.), trottoir, piste cyclable, chemin, etc.

3. Largeur du frontage public (en mètre) : 0 à 1,5m ; 1,5 à 3m ; 3 à 4,5m ; > 4,5m

4. Dynamique du frontage : stérilisé (par quoi : présence de parking, autres), en cours de stérilisation (par quoi : futur parking), en cours de vitalisation (début de flore spontanée en pieds d'arbres), vivant (par quoi : bacs enherbés, appropriation habitante)

5. Végétalisation du frontage public ? (oui ou non)

5.1 Si oui, qualifier : strate muscinale, strate herbacée, strate arbustive, strate arborée

5.2 Si oui, présence de pieds d'arbres ? (si oui, qualifier : inerte, végétalisé, jardiné, présence de flore spontanée)

6. Appropriation du frontage par les passants ou les habitants ?

6.1 Si oui, qualifier : appropriation fonctionnelle (rangement de vélos, d'objets divers)

7. Visibilité de la présence d'un animal ? (déjections, piétinement, etc.)

8. Présence de déchets ou de produits chimiques (dés herbant, etc.) ?

C. INTERFACE ENTRE LES FRONTAGES PUBLIC ET PRIVÉ

1. Quel rapport au frontage privé ? visibilité sur le frontage privé (qualifier ce que l'on voit), présence d'une clôture (ornementale, grillage, végétalisée, maçonnerie, autre), présence d'un mur, autre

2. Contribution du privé sur la végétalisation du public ? (si oui, qualifier : arbre qui dépasse sur la chaussée, visibilité de la végétation privée, ombrage, haie séparative)

Grille d'analyse des frontages variés, appropriation sociale (présence de mobilier, bancs, chaises, éléments témoins interactions sociales), appropriation paysagère (présence d'une ou plusieurs strates de végétation, résultant de jardinage).

D. CARACTÉRISATION DU FRONTAGE PRIVÉ

1. Typologie du frontage privé (catégorisation issue du Smart Code - à compléter si besoin) : absence de frontage privé (si absence, skipper les questions qui viennent), Common Yard (façade en retrait avec petit jardin sans clôture), Porch et Fence (porche et clôture), Terrace or Lightwell, Forecourt (parvis qui peut servir de parking), Stoop (façade alignée sur la rue avec fenêtre surélevée), Shopfront (façade avec une ou des vitrines), Gallery, Arcade

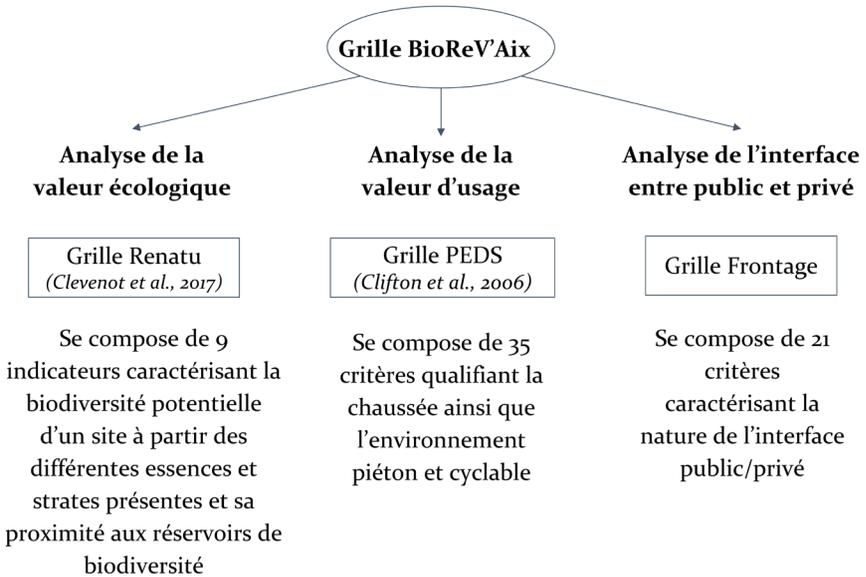
2. Largeur du frontage privé (en mètre) : 0 à 1,5m ; 1,5 à 3m ; 3 à 4,5m ; > 4,5m

3. Homogénéité du frontage privé ? très homogène, plutôt homogène, peu homogène (Si peu homogène, choisir le frontage le plus représentatif du tronçon de rue et l'analyser)

4. Dynamique du frontage : stérilisé (par quoi : présence de parking, autres), en cours de stérilisation (par quoi : dalle béton), en cours de vitalisation (début de flore spontanée en pieds d'arbres), vivant (par quoi : jardin, autre)

5. Caractérisation du bâtiment (À compléter seulement s'il y a un bâtiment, sinon passer cette étape)
- 5.1 Typologie de bâtiment (école, résidentiel, commerces, etc.)
- 5.2 Hauteur du bâtiment (en mètre)
- 5.3 Qualification de la distance entre le bâtiment et le frontage public (à la limite du frontage public ou en retrait du frontage public) (en mètre)
- 5.4 Qualification du rez-de-chaussée : ouvert (vitrines), fermé, fenêtres, entrée
- 5.5 Matériau(x) de façade
- 5.6 Accessibilité du bâtiment : en façade, en retrait (en recul, ou en hauteur à cause d'un escalier ou perron), à l'arrière du bâtiment
- 5.7 Rapport au sol : absence d'éléments au sol, présence de cave, présence de parking, présence de sous-sols
- 5.8 Qualité du bâtiment à accueillir de la végétation : présence de balcons, de matériaux de façade particuliers, d'une forme de toit favorable ?
6. Végétalisation du frontage privé ? (oui ou non)
- 6.1 Si oui, qualifier : strate muscinale, strate herbacée, strate arbustive, strate arborée
- 6.2 Si oui, présence de pieds d'arbres ? (si oui, qualifier : inerte, végétalisé, jardiné, flore spontanée)
7. Appropriation par les passants ou les habitants ?
- 7.1 Si oui, qualifier : appropriation fonctionnelle (rangement de vélos, d'objets divers et variés), appropriation sociale du frontage (présence de mobilier, bancs, chaises, éléments témoins d'interactions sociales), appropriation paysagère du frontage (présence d'une ou plusieurs strates de végétation résultant de jardinage)
8. Visibilité de la présence d'un animal ? (déjections, piétinement)
9. Présence de déchets, de produits chimiques (désherbant) ?

Figure 23 : Composition de la grille BioRev'Aix.



L'outil BioRev'Aix (cf. figure 23) spécifiquement développé dans le cadre de ce projet se compose alors de l'addition des trois grilles RENATU, PEDS et frontage.

Les 35 tronçons de rue à potentiel retenus pour l'étude de terrain ont ainsi été analysés grâce à la grille BioRev'Aix. Pour cela, un questionnaire agrégeant les critères des trois grilles a été créé avec l'outil Google Forms, puis rempli directement sur le terrain. À la suite de cette caractérisation croisant considérations écologiques, considérations d'usages, et considérations morphologiques permises par la grille BioRev'Aix, une recherche des principaux axes de ressemblance et de distinction entre les 35 tronçons de rue à potentiels analysés a été opérée. Pour ce faire, une analyse statistique multivariée de type analyse des correspondances multiples (AMC) a été conduite sur l'ensemble des données obtenues par l'application des trois grilles. Une nouvelle approche de *clustering* a ensuite conduit à l'identification de trois situations-types, dont les photographies des figures 24, 25 et 26 ci-après témoignent. Ces dernières représentent les cinq tronçons de rue les plus représentatifs de chaque classe (les « parangons ») relevés par le logiciel de statistiques R à nouveau utilisé pour cette analyse.

Figure 24 : Les tronçons de rue les plus représentatifs de la situation de routes périurbaines.



Tronçon n°3741 (parangon 1)



Tronçon n°4168 (parangon 2)



Tronçon n°3740 (parangon 3)



Tronçon n°3578 (parangon 4)



Tronçon n°674 (parangon 5)

Figure 25 : Les tronçons de rue les plus représentatifs de la situation de voies de desserte privées.



Tronçon n°4985 (parangon 1)



Tronçon n°2545 (parangon 2)



Tronçon n°2056 (parangon 3)



Tronçon n°2360 (parangon 4)



Tronçon n°4065 (parangon 5)

Figure 26 : Les tronçons de rue les plus représentatifs de la situation de boulevards périurbains et des voies de desserte publiques.



Tronçon n°3824 (parangon 1)



Tronçon n°1046 (parangon 2)



Tronçon n°524 (parangon 3)



Tronçon n°590 (parangon 4)



Tronçon n°664 (parangon 5)

La classe 1 a ainsi été associée à des situations de routes périurbaines, la classe 2 à des situations de voies de desserte privées, et la classe 3 à des situations de boulevards périurbains et de voies de desserte publiques. Ces trois situations de projet ont ensuite été interrogées en termes de préconisations spécifiques de renaturation, toujours dans une optique de l'amélioration des connectivités écologiques pour l'écureuil roux, elles-mêmes nourries par un ensemble de recherches bibliographiques, un travail de *benchmark* et des observations de terrain. Au regard des spécificités propres à chacune des 3 situations de projets ainsi identifiées, les perspectives de renaturation des routes périurbaines ont ainsi été envisagées au travers de références de projet de l'ordre de l'ingénierie écologique ; celles des voies de desserte privées au travers de préconisations mobilisant outils incitatifs et partenariaux, et celles des boulevards périurbains et des voies de desserte publiques, au travers de propositions d'interventions spatiales.

Les routes périurbaines

Les arpentages et relevés de terrains ont montré que la plupart des tronçons de rue relevant de la situation des routes périurbaines se caractérisent par un niveau de végétalisation déjà assez substantiel (cf. figure 24). Leur fonction de liaison périphérique se traduit néanmoins par la présence d'un trafic important et de vitesses de circulation élevées qui limitent les possibilités de traversée de la faune. Du fait du caractère éminemment routier des tronçons de rue considérés et de l'absence constatée de pratiques piétonnes sur ces espaces ne présentant pas de riveraineté bâtie, les leviers d'intervention envisagés se sont focalisés sur l'amélioration, pour la faune, des connectivités longitudinale et transversale de la voie. Puisant dans le champ de l'ingénierie écologique, les préconisations formulées en matière de connectivité longitudinale visent d'une part le renforcement des corridors écologiques présents le long de ces axes, par la création de haies multi-strates sur les talus et bas-côtés et, d'autre part, la diversification des essences plantées. Ceci afin de reconnecter les milieux naturels et de limiter les effets négatifs induits par la fragmentation des habitats. En ce qui concerne la connectivité transversale, les recommandations portent sur la mise en place des corridors écologiques transversaux aux axes routiers. L'aménagement de passage à faune afin de compenser la rupture des écosystèmes engendrée par les axes routiers serait ainsi à envisager. Ces passages à faune existent sous différentes formes, souterraines et aériennes, afin de permettre les déplacements d'espèces de tous types et de toutes tailles (écoducs, crapauduc, passages à micro-faunes voire éco-ponts sur les autoroutes, etc.). Il est toutefois nécessaire de bien cibler les espèces attendues afin d'ajuster les caractéristiques du

passage à leur morphologie et à leur comportement. A cet égard l'écreuil roux qui a présidé à l'identification des tronçons de rue à potentiel de renaturation bénéficie de son dispositif de passage dédié : l'écuroduc.

Les voies de desserte privées

Les tronçons de rue associés aux situations de voies de desserte privées se sont révélés être le plus souvent situés dans des résidences privées inaccessibles depuis l'espace public (cf. figure 25). Il s'agira alors ici de présenter des outils permettant à la puissance publique d'exercer une influence positive sur la gestion de la végétation dans ces espaces sur lesquels elle ne dispose pas de la maîtrise foncière, au-delà du seul éventail d'outils offerts aux collectivités, en particulier dans le cadre des plans locaux d'urbanisme communaux (PLU) ou intercommunaux (PLU-I) (Larramendy et Chollet, 2022). Portant sur la mise en place d'actions incitatives et partenariales de préservation des continuités écologiques situées au-delà de l'espace public, les leviers de végétalisation présentés ici se fondent sur diverses expériences françaises conduites par des établissements publics de coopération intercommunale (EPCI), et en particulier des métropoles. Parmi celles-ci, le plan de végétalisation du parc résidentiel collectif mis en place dans le cadre du plan Nature adopté en 2021 par la métropole de Lyon peut constituer une source d'inspiration majeure. Partant du constat que plus de 70 % de ses espaces verts se trouvent dans l'espace privé, la métropole de Lyon a de son côté amorcé une nouvelle politique publique de végétalisation de son parc résidentiel collectif, et ce, tant dans les copropriétés privées que dans les espaces gérés par des bailleurs sociaux. Pour inciter les acteurs concernés à s'impliquer, cette collectivité finance ainsi une partie des travaux de végétalisation sur les espaces collectifs en pleine terre, allant de 30 à 65 % du prix du projet (cf. figure 27). Le pourcentage de prise en charge varie selon la priorité des quartiers en termes de végétalisation, des essences et de la provenance des végétaux plantés. Si l'exemple de la métropole de Lyon est particulièrement ambitieux, d'autres démarches incitant le secteur privé à végétaliser les espaces dont il est gestionnaire ont été développées dans d'autres métropoles françaises. Ainsi en est-il de la charte « Tous unis pour plus de biodiversité » mise en place par l'Eurométropole de Strasbourg afin de lancer des actions en faveur de la biodiversité en partenariat avec des communes, des bailleurs sociaux et des entreprises. Ou encore du pacte « bas carbone » développé par la ville de Lille afin de faire adopter des engagements concrets, notamment en faveur de la végétalisation, aux acteurs publics et privés de la fabrique urbaine. Prenant conscience du rôle clé des acteurs privés dans la végétalisation, les métropoles françaises ont donc de plus en plus recours à des projets de végétalisation incitatifs et partenariaux afin d'amener les

acteurs à se mobiliser en faveur de la végétalisation des espaces dont ils ont la gestion.

Les boulevards périurbains et voies de desserte publiques

Figure 27 : Eléments de communication issus de la politique de végétalisation du parc résidentiel collectif du Grand Lyon.

**Passer du rêve
à la verdure!**

PLAN NATURE

**Vous habitez un immeuble collectif
ou un lotissement ?**
La Métropole de Lyon participe au financement
de votre projet de végétalisation en pleine terre.

**MÉTROPOLE
GRAND LYON**

CAUE
CONSEIL
D'ARCHITECTURE
D'URBANISME
ET DE ENVIRONNEMENT

Les tronçons de rue associés aux situations de boulevards périurbains et de voies de desserte publiques peuvent être décomposés en deux sous-classes distinctes : les boulevards périurbains et les voies de desserte publiques (cf. figure 26). Les premières se distinguent des secondes par une plus grande largeur et par un trafic automobile plus important. Du fait de leur double statut de tronçon de rue habité et appartenant au domaine public, la question de la renaturation de ces deux situations de projet a ici été abordée au travers d'un ensemble de propositions spatialisées de végétalisation. Sur la base d'une revue de projets similaires développés sur le territoire national, les principaux leviers identifiés en la matière concernent la plantation, la diversification des strates et des essences existantes, la préservation de la flore spontanée, l'élargissement des pieds d'arbres en bandes plantées, la connectivité entre les canopées, et enfin la végétalisation des abords de voirie incluant les bas-côtés, les terre-pleins centraux, les places de parkings, les bandes de séparation entre modes doux et circulation automobile, etc. Il s'agira ici de s'intéresser à la manière dont ces préconisations générales ont pu être appliquées aux spécificités des tronçons de rue considérés.

Larges et marqués par un trafic automobile important, les boulevards périurbains n'en sont pas moins bordés d'habitations. Leur renaturation devrait alors intégrer les propositions d'aménagements suivantes :

- Planter des arbres sur les trottoirs afin d'augmenter la surface de la canopée et sa connectivité,
- Diversifier les essences et augmenter le nombre de strates existantes,
- Favoriser le développement de dynamiques végétales spontanées,
- Transformer les pieds d'arbres en bandes plantées,
- Végétaliser les terre-pleins centraux,
- Végétaliser les talus et les bas-côtés des axes routiers,
- Séparer les voies douces et automobiles par des bandes plantées et des arbres d'alignement (cf. figure 28).

Figure 28 : Propositions de renaturation des boulevards périurbains (réalisation : Mathilde Pham).

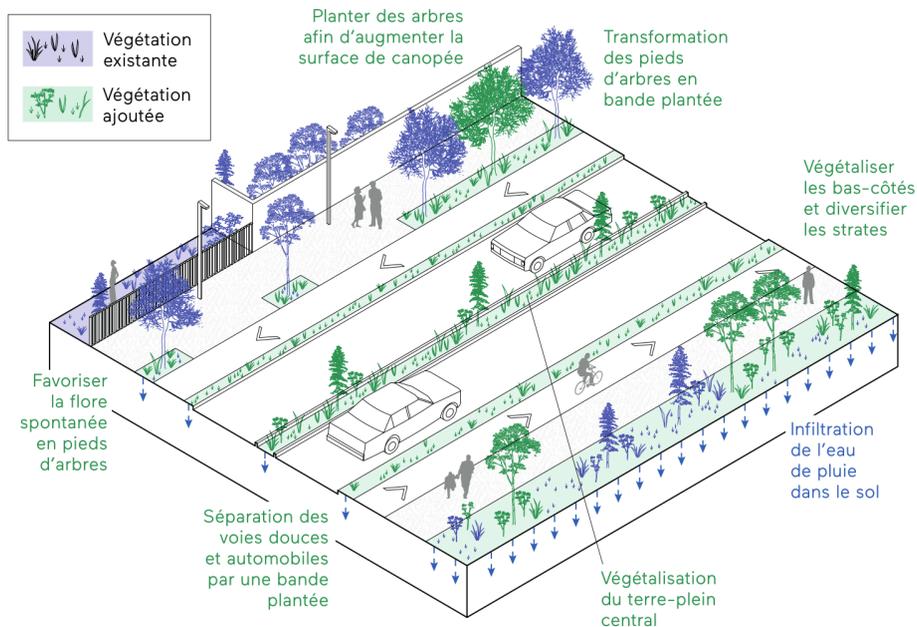
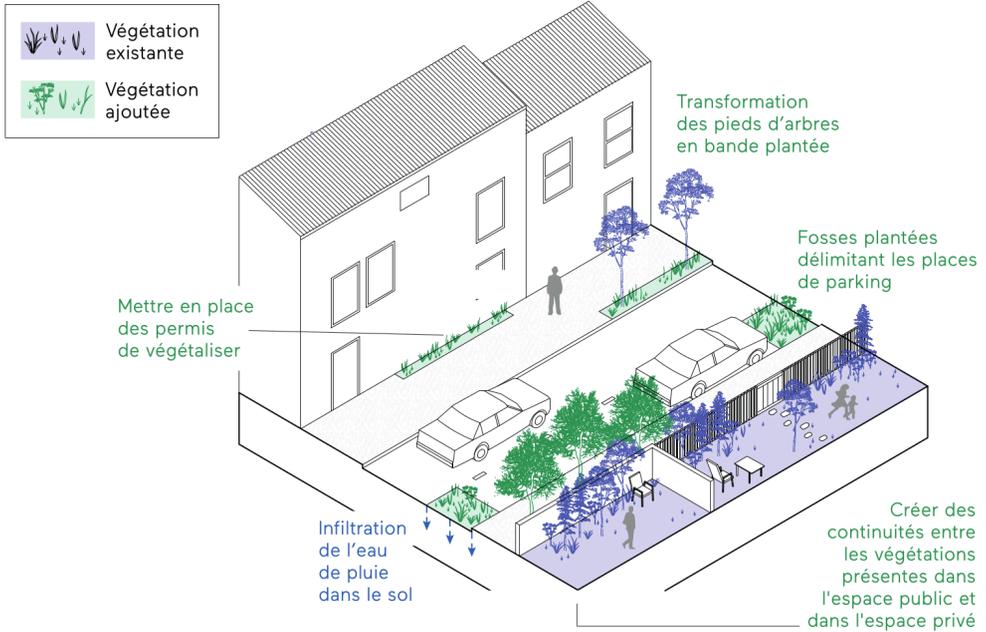


Figure 29 : Propositions de renaturation des voies de desserte publiques (réalisation : Mathilde Pham).



Caractérisées par des profils en travers plus étroits et des flux circulatoires de moindre importance, les voies de desserte publiques réclament d'autres types de propositions d'intervention :

- Créer des continuités entre les végétations présentes dans l'espace public et dans l'espace privé,
- Transformer les pieds d'arbres en bandes plantées,
- Délimiter les places de parking par des fosses plantées,
- Diversifier les essences et augmenter le nombre de strates existantes,
- Mettre en place des permis de végétaliser (cf. figure 29).

Encadré n°6 : Le dispositif « permis de végétaliser ».

Les « permis de végétaliser » sont des dispositifs publics qui mêlent l'encadrement et l'accompagnement des initiatives de jardinage citoyen dans l'espace public. Ayant connu un fort développement au cours de la dernière décennie, ces derniers peuvent être définis comme des « dispositifs autorisant les citoyens qui le souhaitent à jardiner dans les rues » (Ramos, 2024, p. 19). Dans la commune d'Aix-en-Provence, un permis de végétaliser a été mis en place en 2021, mais il n'est pas forcément connu des habitants et usagers aixois. Si ces dispositifs permettent de faire participer les habitants et usagers à la production de la ville, leur fonctionnement nécessite donc un important travail de sensibilisation auprès du grand public. À noter que ces démarches « par le bas » de végétalisation des rues peuvent également être mises en place par des associations ou des collectifs intéressés aux enjeux de biodiversité urbaine et/ou de qualité de l'environnement urbain (telles que Strasbourg ça Pousse, Belle de Bitume à Nantes, Guerrilla Gardening à Paris, etc.). Dans les contextes périphériques étudiés, marqués par la présence de nombreux jardins privés, l'intérêt des riverains à s'impliquer dans du jardinage public n'est toutefois pas garanti et devrait donc être envisagé au cas par cas.

**CONCLUSION :
LE TRONÇON DE RUE,
UN NOUVEL OUTIL DE
RECHERCHE-ACTION**

Le projet BioRev'Aix s'est intéressé aux liens entre morphologie urbaine et biodiversité à travers l'étude du réseau viaire, considéré comme la matrice première d'agencement et d'évolution des tissus urbains. Support privilégié d'appropriations humaines et de dynamiques floristiques et faunistiques multiples, celui-ci constitue un potentiel considérable d'espaces mobilisables au service de la transition écologique. Dans sa quête d'évaluation de la capacité des voies urbaines à être supports de fonctionnements urbanistiques et écologiques, la démarche de recherche entreprise a mis en exergue la production d'une unité d'analyse morphologique originale : le « tronçon de rue ». Cet élément permet d'appréhender les différentes formes de natures urbaines de manière multiscale et contextuelle, associant la prise en compte de la rue comme lieu/habitat et comme lien/corridor. Le tronçon de rue apparaît alors comme un élément de recherche-action prometteur pour l'analyse des rapports entre morphologie urbaine et biodiversité.

A partir du cas d'Aix-en-Provence, l'utilisation du tronçon de rue a ainsi permis de démontrer que les relations morphologie-biodiversité ne peuvent s'envisager que de façon multiscale :

- A l'échelle du territoire, le maintien des populations d'écureuils roux apparaît dépendant de l'existence de continuités écologiques, en particulier dans les situations périphériques de franges ville-nature.
- A l'échelle de la ville, la présence de la flore spontanée, par-delà le seul gradient d'urbanisation, est tributaire d'une certaine influence de la morphologie urbaine,
- A l'échelle locale, la malacofaune (escargots) demeure principalement inféodée aux agencements urbains et à la proximité d'autres espaces à caractère naturel pouvant servir de relais.

L'utilisation du tronçon de rue a en outre permis de souligner l'importance du système de l'arbre (l'arbre et la végétation sise à son pied) dans une approche biodiversitaire de la morphologie urbaine qui doit, par ailleurs, composer avec des logiques intégrant les espaces privés. Les résultats d'enquêtes auprès des habitants, usagers et acteurs institutionnels confirment non seulement l'importance de l'arbre dans les représentations de la nature urbaine et dans la fourniture de services écosystémiques mais aussi l'intérêt du tronçon de rue comme support concret d'analyse et de gestion. Une nouvelle gouvernance plus intégrative de l'arbre, pris en tant que socio-écosystème de proximité, est donc souhaitable pour dépasser les complexités et les tensions qui caractérisent actuellement la gestion de différentes formes de natures urbaines.

L'appréhension du tronçon de rue comme élément d'un réseau viaire interconnecté a enfin permis le développement d'un outil d'aide à la

décision innovant mis à la disposition des partenaires de la ville d'Aix-en-Provence afin d'accompagner la mise en œuvre de sa politique de végétalisation. L'outil proposé offre ainsi des éléments concrets de priorisation sur les tronçons de rue offrant le plus fort potentiel d'amélioration des connectivités écologiques du territoire. Actuellement fondé sur le modèle théorique de dispersion de l'écureuil roux, cet outil est en phase d'expérimentation *in situ* pour le mettre à l'épreuve de relevés de terrain. Il offre également des perspectives de développement par l'intégration d'autres modèles faune/flore relevant d'autres échelles et d'autres modes de dispersion en vue de le rendre plus efficient. Il peut aussi, à terme, permettre l'intégration d'autres types de trames relevant des besoins de mobilités des non-humains (trame brune, noire, ...) et des humains (réseau de mobilités douces piétons, cyclistes), dans une logique de co-optimisation.

Pour toutes ces raisons, le tronçon de rue, pris à la fois comme objet d'études interdisciplinaires et comme échelle d'intervention urbanistique tangible, mérite d'être scientifiquement affiné et développé dans le cadre de recherches-actions, notamment pour sa capacité à soutenir l'amélioration des connectivités écologiques et, ce faisant, l'aménagement de trames vertes urbaines véritablement fonctionnelles.

BIBLIOGRAPHIE

Agence d'urbanisme de l'agglomération marseillaise (2021), Formes urbaines. Vers une qualité urbaine, architecturale et paysagère Marseille : AGAM.

Allain, R. (2004). Morphologie urbaine. Géographie, aménagement et architecture de la ville. Paris : Armand Colin.

Alonzo, E. (2020). L'architecture de la voie : histoire et théories. Marseille : Parenthèses.

Appleyard, D. (1981). Livable streets. Berkeley : University of California Press.

Araldi, A., Fusco, G. (2019). From the street to the metropolitan region: Pedestrian perspective in urban fabric analysis. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 46(7), 1243-1263. <https://doi.org/10.1177/2399808319832612>

Benvenuti, S. (2004). Weed dynamics in the Mediterranean urban ecosystem: Ecology, biodiversity and management. *Weed Research*, 44, 341-354. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3180.2004.00410.x>

Bodin, O., Saura, S. (2010). Ranking individual habitat patches as connectivity providers: Integrating network analysis and patch removal experiments. *Ecological Modelling*, 221(19), 2393-2405.

Chalas, Y. (2010). La ville de demain sera une ville-nature. *L'Observatoire*, 37, 3-10. <https://doi.org/10.3917/lobs.037.0003>

Clergeau, P. (2007). Une écologie du paysage urbain. Rennes : Apogée.

Clergeau, P. (dir.) (2020). Urbanisme et biodiversité. Vers un paysage vivant structurant le projet urbain. Rennes : Apogée.

Clifton, K. J., Livi Smith, A., Rodriguez, D. (2007). The development and testing of an audit for the pedestrian environment. *Landscape and Urban Planning*, 80(1-2), 95-110. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2006.06.008>

Consalès, J.-N. (2024). Aménager ou ménager les natures urbaines : les injonctions paradoxales d'un urbanisme en quête d'écologie. *Espaces et sociétés*, 192(2), 161-170. <https://doi.org/10.3917/esp.192.0161>

Cooper, C. H. V., Chiaradia, A. J. F. (2020). sDNA: 3-d spatial network analysis for GIS, CAD, Command Line & Python. *SoftwareX*, 12, 100525. <https://doi.org/10.1016/j.softx.2020.100525>

Duany, A., Sorlien, S., Wright, W. (2012). Smartcode Version 9.2. CreateSpace.

Fleischmann, M. (2019). momepy: Urban Morphology Measuring Toolkit. *Journal of Open Source Software*, 4(43), 1807. <https://doi.org/10.21105/joss.01807>

Flégeau, M. (2020). *Formes urbaines et biodiversité – Un état des connaissances*. Paris : Éditions du PUCA.

Gehl, J. (2012). *Pour des villes à échelle humaine*. Montréal : Écosociété.

Godefroid, S., Koedam, N. (2007). Urban plant species patterns are highly driven by density and function of built-up areas. *Landscape Ecology*, 22, 1227–1239. <https://doi.org/10.1007/s10980-007-9102-x>

Groupe sur l'urbanisme écologique. (2022). *Réinventer la ville avec l'écologie*. Frottements interdisciplinaires. Rennes : Apogée.

Hamonic, F. (2023). *Algorithmes pour la conservation et la restauration des habitats et paysages écologiques (Thèse de doctorat en Informatique)*. Aix-Marseille Université.

Hamonic, F., Couëtoux, B., Vaxès, Y., Albert, C. (2023). Cumulative effects on habitat networks: How greedy should we be? *Biological Conservation*, 282, 110066. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2023.110066>

Hamonic, F., Vaxès, Y., Couëtoux, B., Albert, C. (2025). GECOT: Graph-based Ecological Connectivity Optimization Tool. *Methods in Ecology and Evolution*, 16(9), 1914–1922, <https://doi.org/10.1111/2041-210X.70055>

Harvey, C., Aultman-Hall, L., Troy, A., Hurley, S. E. (2017). Streetscape skeleton measurement and classification. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 44(4), 668–692. <https://doi.org/10.1177/0265813515624688>

Héran, F., Clergeau, P., Younès, C. (2022). Revivifier les rues. In Groupe sur l'urbanisme écologique (Ed.), *Réinventer la ville avec l'écologie*. Frottements interdisciplinaires (pp. 86–103). Rennes : Apogée.

Hillier, B., Hanson, J. (1984). *The Social Logic of Space*. Cambridge : Cambridge University Press.

IGN. (2021). *BD TOPO® Version 3.0 Descriptif de contenu*. Saint-Mandé : IGN.

Jones, P., Boujenko, N., Marshall, S. (2007). *Link and Place: A Guide to Street Planning and Design*. Londres : Landor Press.

Kostof, S. (1992). *The city assembled; The Elements of Urban Form Through History*. Londres : Thames and Hudson.

- Lagane, J. (2019), Aménagement urbain et mobilisation citoyenne autour des arbres à Aix-en-Provence, *Espaces et sociétés*, n° 178(3), 157-173. <https://doi.org/10.3917/esp.178.0157>
- Lagesse, C. (2015). Lire les lignes de la ville : Méthodologie de caractérisation des graphes spatiaux (Thèse de doctorat en Géographie). Université Paris Diderot-Paris VII.
- Larramendy, S., Chollet, M. (2022). Végétal et espaces de nature dans la planification urbaine – Recueil de fiches actions. Angers : Plante & Cité.
- Marco, A., Menozzi, M.-J., Léonard, S., Provendier, D., Bertaudière-Montès, V. (2014), « Nature sauvage pour une nouvelle qualité de vie. Perception citadine de la flore spontanée dans les espaces publics », *Méditerranée*, n° 123, p. 133-143. <https://doi-org/10.4000/mediterranee.7483>
- Martinez, L. (2010). Diversité de la flore adventice au pied des arbres d'alignement de la ville de Dijon (Mémoire de Master STS, spécialité Biologie des Organismes et des Populations). Université de Bourgogne.
- Masbounji, A. (dir.) (2013). (Ré)aménager les rez-de-chaussée de la ville. Marseille : Parenthèses.
- Moudon, A. V. (1997). Urban morphology as an emerging interdisciplinary field. *Urban Morphology*, 1(1), 3-10.
- Moxon, S. (2019). Drawing on nature: A vision of an urban residential street adapted for biodiversity in architectural drawings. *City, Territory and Architecture*, 6(6). <https://doi.org/10.1186/s40410-019-0105-0>
- Panerai, P., Castex, J., Depaule, J.-C., Samuels, I. (2004). *Urban Forms: The death and life of the urban block*. Oxford : Architectural Press.
- Pech, P., Lefèbure, A., Thuillier, L., About, C., Frascaria-Lacoste, N., Jacob, P., Riboulot-Chetrit, M., Simon, L. (2022). RENATU : un outil d'évaluation du potentiel écologique d'un site industriel ou urbain pour des utilisateurs non spécialisés. *Revue Française de Gestion Industrielle*.
- Ramos, A. (2024). Institutionnaliser le jardinage tactique dans la rue : les permis de végétaliser des villes françaises (2004 et 2018) *Espaces et sociétés*, 192(2), 19-37. <https://doi.org/10.3917/esp.192.0019>
- Rode, S. (2023). Écologiser l'urbanisme. Pour un ménagement de nos milieux de vie partagés. Bordeaux : Le Bord de l'eau.
- Romeyer, B. (2017). Refaire la rue pour recomposer la ville ? Mise en regard de deux projets de réaménagement de rues artérielles à Londres et Lyon. *Flux*, 109-110, 142-166. <https://doi.org/10.3917/flux1.109.0142>

Romeyer, B., Consalès, J.-N. (2024), Le jardin japonais d'Aix-en-Provence : une conception hybride entre Japon et Méditerranée », *Projets de paysage*, n° 29, <https://doi.org/10.4000/paysage.32893>

Rudnick, D. A., Ryan, S. J., Beier, P., Cushman, S. A., Dieffenbach, F., Epps, C. W., Gerber, L. R., Hartter, J. N., Jenness, J. S., Kintsch, J. A., Merenlender, A. M., Perkl, R. M., Preziosi, D. V., and Trombulak, S. C. The role of landscape connectivity in planning and implementing conservation and restoration priorities, *Issues Ecol.* 16 (2012), 1–23.

Saura, S., Estreguil, C., Mouton, C., Rodríguez-Freire, M. (2011). Network analysis to assess landscape connectivity trends: Application to European forests (1990–2000). *Ecological Indicators*, 11, 407–416.

Soulier, N. (2012). *Reconquérir les rues : exemples à travers le monde et pistes d'actions*. Paris : Ulmer.

Vettorel, L. (2017). *Frontage : Le Plateau-Mont-Royal, Un Paysage Résidentiel (Projet de fin d'études)*. Institut d'urbanisme de Grenoble, Université Grenoble-Alpes.

BIOGRAPHIES DES AUTEUR(E)S

Jean Noël Consalès est professeur (HDR) à l'Université Lumière Lyon 2 et au Laboratoire d'Etudes Rurales. Ses travaux portent sur les paysages des "Métropoles-Jardins", concept qui structure sa démarche de recherche. Il se penche plus spécifiquement sur la place de la nature, notamment de l'agrobiodiversité, dans la planification et l'aménagement des territoires.

Benoit Romeyer est maître de conférences en aménagement et urbanisme à l'Université d'Aix-Marseille et chercheur au Laboratoire Interdisciplinaire Environnement et Urbanisme LIEU UR 889. Ses recherches concernent l'aménagement du réseau viaire, la conception des espaces publics et la planification paysagère.

Cécile Albert est directrice de recherche (HDR) du CNRS à l'Institut Méditerranéen de Biodiversité et d'Ecologie marine et continentale. Ses travaux portent sur les effets de la perte et de la fragmentation des habitats naturels sur la biodiversité, en lien avec les questions d'aménagement des territoires et l'adaptation aux changements climatiques.

Valérie Bertaudière-Montès est maîtresse de conférences en écologie végétale, au Laboratoire Population-Environnement-Développement d'Aix-Marseille Université. Ses travaux de recherches portent sur la dynamique de la biodiversité en milieux fortement anthropisés, notamment dans les territoires urbanisés ; elle y développe des démarches de recherche interdisciplinaires SHS/sciences du vivant visant à une approche intégrée des déterminants des communautés floristiques en place.

Bruno Vila est maître de conférences en écologie et botanique, au Laboratoire Population-Environnement-Développement à l'Université d'Aix-Marseille. Il travaille en systématique végétale dans les hotspots de biodiversité mais ses travaux portent également sur la structure et la composition de la biodiversité en milieu urbain. Il étudie différentes communautés et leurs capacités de maintien en portant une attention particulière aux milieux relictuels pouvant subsister en ville et jouer le rôle de zones refuges.

Magali Deschamps-Cottin est maîtresse de conférences en écologie urbaine au Laboratoire Population-Environnement-Développement à l'Université d'Aix-Marseille. Elle étudie la dynamique des communautés animales dans les écosystèmes anthropisés et notamment les mécanismes de maintien ou de colonisation des espèces en relation avec les modes de gestion de ces espaces. Ses recherches sont conduites en interdisciplinarité avec des sociologues, géographe et urbanistes en collaboration avec des gestionnaires d'espaces urbanisés.

François Hamonic est postdoctorant en informatique et écologie à l'Institut Méditerranéen de Biodiversité et d'Écologie marine et continentale (IMBE, UMR 7263). Ses recherches portent sur les problèmes d'optimisation liés à la planification de la conservation et de la restauration de la biodiversité, en tenant compte de contraintes budgétaires.

Christine Robles est maîtresse de conférences en écologie végétale au Laboratoire Population Environnement Développement d'Aix Marseille Université. Ses recherches portent sur les communautés végétales spontanées en milieu urbain ou plus généralement dans les écosystèmes fortement anthropisés dont elle étudie la composition et la dynamique en relation avec les caractéristiques fonctionnelles de l'écosystème.

Stagiaires du projet

Maia Barrère est chargée d'études au SAMU de l'environnement Alsace, une association centrée sur l'analyse des pollutions ponctuelles et l'accès au diagnostic environnemental. Les travaux présentés ici ont été réalisés lorsqu'elle était en stage de Master 2 de Biodiversité, Ecologie et Evolution à l'Université d'Aix-Marseille.

Marybel Bernardet est chargée de missions écologue au sein de l'Agence Occitanie Méditerranée du Bureau d'études Biotope. Les travaux présentés ici ont été réalisés lorsqu'elle était en Master 1 Biodiversité Ecologie Evolution dans le parcours Ecologie pour la gestion des villes et des territoires à l'Université d'Aix-Marseille.

Florine Francotte est co-directrice de l'association Les Jardins du Cygne, association d'éducation à l'environnement et de reboisement dans le Nord de la France. Elle contribue à développer la protection de la nature grâce à la sensibilisation de différents publics et participe à la préservation du patrimoine bocager.

Baptiste Le Guen est chargé de mission Natura 2000 au sein du Service biodiversité terrestre Marine et aires protégées à la Métropole Aix Marseille Provence. Les travaux présentés ici ont été réalisés lorsqu'il était en Master 1 Biodiversité Ecologie Evolution dans le parcours Ecologie pour la gestion des villes et des territoires à l'Université d'Aix-Marseille.

Noémie Montel est chargée d'études en urbanisme et environnement au bureau d'études IAD en Haute-Saône. Elle y réalise des diagnostics urbains et paysagers ainsi que des études écologiques. Son travail consiste principalement à accompagner les collectivités dans la réalisation de leur document d'urbanisme (PLU, carte communale, ...).

Mathilde Pham est chargée de mission habitat au sein du bureau d'études Urbanis. Elle travaille sur des études de faisabilité concernant la rénovation de l'habitat privé sur les quartiers de Belsunce et Grands-Carmes Vilette à Marseille ainsi que sur l'OPAH LHI du centre ville de Marseille.

Romain Wilmes continue des études sur l'éducation à la nature et à l'environnement. Désireux de partager ses connaissances et son expérience, il s'investit également dans l'enseignement.

CONSEIL SCIENTIFIQUE DU PROGRAMME BAUM

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

POUR ALLER PLUS LOIN

