

FRANÇOIS-MARIE MARTIN

BIODIVERSITÉ, AMÉNAGEMENT URBAIN ET MORPHOLOGIE : QUELS ENSEIGNEMENTS MÉTHODOLOGIQUES DE L'ÉTUDE ÉCOLOGIQUE DES FORMES URBAINES ?

CAHIER BIODIVERSITÉ, AMÉNAGEMENT URBAIN ET MORPHOLOGIE N°7

**BIODIVERSITÉ,
AMÉNAGEMENT URBAIN
ET MORPHOLOGIE :
QUELS ENSEIGNEMENTS
MÉTHODOLOGIQUES DE
L'ÉTUDE ÉCOLOGIQUE
DES FORMES URBAINES ?**

FRANÇOIS-MARIE MARTIN

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 : 978-2-11-139353-0

Photos : couverture : "Trudotoren, Strijp-S, Eindhoven, Netherlands" par RoelofA,
CC BY-ND 2.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nd/2.0/>) non modifiée, via
Flickr.

p. 84 : © Bénédicte Bercovici, PUCA

octobre 2025

SOMMAIRE

Avant-propos	4
Introduction	8
Contexte et objectifs	9
Organisation de la synthèse	13
Résumé des approches déployées dans les six projets baum	14
Projet MORPHOBIOT (Toulouse)	15
Présentation générale	15
Sélection et description des sites d'étude	16
Projet RÉAUMUR (Dijon et France entière)	18
Présentation générale	18
Sélection et description des sites d'étude	19
Projet TRAM'BIOSOL (Palaiseau)	22
Présentation générale	22
Sélection et description des sites d'étude	23
Projet FRUGACITÉ (région parisienne)	30
Présentation générale	30
Sélection et description des sites d'étude	31
Projet BIOREV'AIX (Aix-en-Provence)	33
Présentation générale	33
Sélection et description des sites d'étude	34
Projet ÉVOLVILLE (Strasbourg)	36
Présentation générale	36
Sélection et description des sites d'étude	37

Motivations et implications des choix de conception des projets BAUM	40
Justifications des choix de conception	41
Pertinence vis-à-vis des objectifs	41
Implications de l'ordre des choix de conception	43
Justifications techniques, complexité et contrainte de « réappropriation »	48
Ajustements et imprévus	51
Evaluation a posteriori des démarches descriptives et écueils méthodologiques	54
Avantages et inconvénients perçus des approches descriptives	55
L'approche qualitative de MORPHOBIOT	55
Les approches quantitatives	56
Les approches « semi-quantitatives »	58
Difficultés rencontrées dans les projets BAUM	59
Problèmes méthodologiques généraux	59
Écueils liés à la nature transdisciplinaire du programme BAUM	60
Références citées	72
Biographie de l'auteur	76
Conseil scientifique du programme Baum	78



"Natural Promenade" par La Citta Vita, CC BY-SA 2.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.0/>) non modifiée, via Flickr.

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 septième 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

INTRODUCTION

CONTEXTE ET OBJECTIFS

À l'heure où l'humanité doit faire face aux conséquences des changements globaux qu'elle a elle-même engendrées, de nombreux défis s'offrent à elle. Parmi ceux-ci, celui de l'évolution des modèles urbains est particulièrement d'actualité puisque la majorité de la population mondiale vit déjà en ville et que les citoyens représenteront les deux tiers de l'humanité à l'horizon 2050 (United Nations, 2019). Les acteurs qui font et qui décident la ville doivent ainsi répondre à un double enjeu, celui de la **mitigation** des impacts négatifs de l'urbanisation et celui de l'**adaptation** des systèmes urbains aux changements globaux.

La mitigation implique notamment de réduire l'étalement urbain afin de préserver de l'artificialisation les sols agricoles et les écosystèmes naturels qui abritent la majorité de la biodiversité terrestre, et dont le bon état est indispensable à la prospérité des sociétés rurales, mais aussi citadines. Il convient également de mitiger la dégradation des différents habitats semi-naturels urbains, ces « espaces à caractère de nature » peuplés d'une biodiversité ordinaire très importante, mais qui peuvent aussi servir de refuge à des espèces rares ou vulnérables dans certains contextes, et qui délivrent un grand nombre de services écosystémiques aux populations citadines. L'adaptation, quant à elle, implique de trouver des façons d'augmenter la résilience des villes face à des forçages pratiquement inexorables tels que les changements climatiques, notamment les épisodes météorologiques extrêmes (vagues de chaleur, pluies torrentielles, etc.), les pollutions (des sols, de l'air, de l'eau, ou encore sonores et lumineuses), ou les invasions biologiques et les risques qu'elles occasionnent (impacts écologiques, transmissions de maladies, incendies, dégradations matérielles, nuisances, etc.). La « végétalisation » des villes (ou « verdissement » - *urban greening* en anglais), et donc l'augmentation des espaces semi-naturels, est de plus en plus mise en avant comme solution pour mitiger les impacts intra-urbains des villes ou pour favoriser leur adaptation aux changements globaux. Cependant, les biologistes alertent depuis longtemps sur le fait que « **végétalisation** » n'est pas forcément synonyme de « **biodiversité** ». Or la biodiversité est indispensable au bon fonctionnement des écosystèmes, qu'ils soient urbains ou non, et donc à la fourniture des services écosystémiques sur lesquels sont fondées bon nombre de stratégies de mitigation ou d'adaptation. Par ailleurs, laisser plus de place à la nature et à la biodiversité urbaine implique de restreindre l'espace alloué à la densification des villes, alors même que l'on doit loger de plus en plus de citoyens tout en limitant l'étalement urbain. Ces injonctions contradictoires soulignent donc l'urgence à **remettre en question** nos façons de concevoir et de bâtir les villes, ainsi que **d'approfondir**

nos connaissances sur les liens existants entre densité et morphologie urbaine, et biodiversité et fonctionnement écosystémiques des espaces semi-naturels urbains.

La nécessité de concevoir des villes plus écologiques implique d'établir un dialogue productif entre les spécialistes du vivant et les spécialistes de la ville. Les écologues doivent informer l'urbanisme en étudiant les processus biologiques au regard d'éléments urbains qui soit pertinents pour les concepteurs. En retour, les concepteurs doivent intégrer aux paysages urbains une biodiversité fonctionnelle qui va bien au-delà de la simple végétalisation. Cependant, cette ambition se heurte encore actuellement à d'importants cloisonnements disciplinaires qui rendent difficile le dialogue attendu. Les conséquences sont que nos connaissances sur les liens entre *formes urbaines*, densité et biodiversité restent extrêmement lacunaires (Tratalos *et al.*, 2007; Flégeau, 2020). L'une des causes provient justement du fait que l'immense majorité des études en écologie urbaine tend à décrire la ville soit comme un tout relativement uniforme soit, au mieux, selon un simple *gradient d'urbanisation* généralement basé sur la « densité de bâti » ou la « proportion de sols artificialisés » dans un rayon donné (Beninde *et al.*, 2015; Norton *et al.*, 2016; Moll *et al.*, 2019). Or, de telles approches sont très insuffisantes pour correctement représenter la complexité des espaces urbanisés, et donc inférer les effets des caractéristiques urbaines sur les réponses biologiques étudiées. Cela provient notamment du fait que pour une même « densité » ou proportion de « sols artificialisés », qui sont des mesures de composition du paysage, peuvent correspondre différentes configurations spatiales des éléments urbains (e.g. bâtiments, voirie, espaces végétalisés), et donc différentes *formes urbaines* (Figure 1). Il faut cependant insister sur le fait que décrire la complexité des systèmes urbains n'est pas la spécialité des biologistes et écologues. En outre, il faut également dire que la *forme urbaine* est un concept relativement flou, associé à des termes et des échelles variables selon les disciplines ou les métiers qui l'emploient, et qu'il n'existe pas actuellement de consensus sur la façon de décrire la morphologie urbaine d'une façon qui soit à la fois pertinente écologiquement et pour la conception.

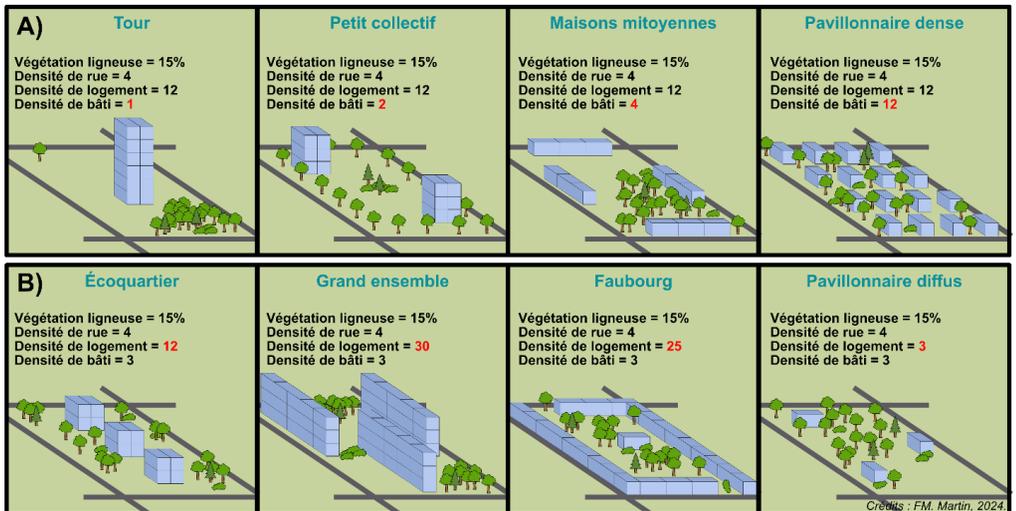
Inscrit dans ce contexte particulier, le programme « Biodiversité, Aménagement Urbain et Morphologie » (BAUM) s'est donné pour mission de contribuer à l'exploration des liens existants entre *densité*, *formes urbaines* et *biodiversité*. Si, à première vue, cet objectif peut sembler relativement simple, il s'avère en réalité d'une vertigineuse complexité tant les acceptations de ces termes et les façons de les relier sont nombreuses. En témoigne, d'ailleurs, la grande diversité des six projets de recherche du programme présentés dans les différentes publications associées au

programme BAUM (voir les *cahiers de recherche* des différents projets). C'est justement à cette diversité que le présent document va s'intéresser en proposant une **synthèse** doublée d'une **analyse comparée** des approches et outils de description des *formes urbaines* employés dans les six projets BAUM.

Figure 1 - Illustration schématique de la complexe relation qui existe entre densités, formes urbaines et occupation du sol (ou espaces semi-naturels). Crédit : FM.Martin (2024).

Tous les encadrés représentent un îlot viaire de surface équivalente et dont la *densité de rue* ou d'*intersection* est fixe. Tous les îlots viaires possèdent une couverture végétale identique, mais dont la configuration spatiale varie. Même si les *formes urbaines* représentées étaient similaires, il semble évident que les différentes configurations végétales présentées n'offriraient pas les mêmes opportunités de déplacement ou d'habitat pour une espèce arboricole. En outre, les encadrés de la ligne (A) montrent que, pour une même *densité de logement* ou de *population* (mesurée comme le nombre de logements par îlot), plusieurs *formes urbaines* et *densité de bâti* (mesurée comme le nombre de bâtiments par îlot) peuvent exister. Les encadrés « maisons mitoyennes » et « pavillonnaire dense » possèdent de surcroît le même pourcentage de surfaces artificialisées, bien que leurs configurations diffèrent fortement. À l'inverse, les encadrés de la ligne (B) montrent que, pour une même *densité de bâti*, des *densités de logement* variables peuvent exister selon la morphologie considérée.

Précisons que les noms de ces *formes urbaines* archétypales sont subjectifs et donc, tout



Cette **synthèse analytique** n'a pas pour but d'être un simple résumé de ce qui a été fait par les six équipes de recherche. Dans l'optique de dépasser le seul cadre du programme BAUM et de faire émerger des apports qui puissent être utiles au plus grand nombre, l'idée soutenant ce travail était **d'identifier des aspects remarquables ou communs** aux six projets qui amélioreraient la *compréhension de ces travaux* ou le *développement de nouvelles recherches* dans cette thématique en plein essor : de l'incidence des choix de conception et de leurs contraintes sous-jacentes, aux problèmes rencontrés et solutions originales mises en œuvre, en passant par les avantages et inconvénients perçus ou insoupçonnés des approches choisies – le tout en prenant en compte les objectifs et les spécificités de chaque projet. Il s'agit donc d'une **lecture transversale** épistémologique des méthodologies employées, mais qui n'a pas vocation à viser l'exhaustivité.

Il est important de comprendre que l'étude écologique des *formes urbaines* est une thématique pluridisciplinaire récente dont l'immaturation conceptuelle et méthodologique rend illusoire toute ambition de généralisation à court terme des résultats de recherche. Malgré toutes leurs qualités, les six projets BAUM ne sauraient être représentatifs de la multitude d'approches possibles ou recommandables pour décrire la *morphologie des quartiers urbains* et ses effets sur la *biodiversité* ou les *fonctionnements écosystémiques*, même dans des contextes similaires. Par conséquent, la présente synthèse s'intéressera moins aux résultats des projets BAUM¹ qu'à leurs méthodologies et aux **difficultés liées à la complexité et à la nature pluridisciplinaire de ce sujet**, et ce, afin d'aider à la conception de nouveaux projets de recherche ambitieux évitant ces écueils. Il s'agit donc d'un travail exploratoire et qui n'aborde qu'une partie de la thématique.

Pour plus de détails sur d'autres aspects de celle-ci, le lecteur est renvoyé aux autres travaux issus du programme BAUM :

- Pour les résultats contextualisés des projets BAUM, se référer aux publications dédiées de ces projets.
- Pour un « état des connaissances sur le lien entre *formes urbaines* et *biodiversité* », se référer à Flégeau (2020).
- Pour une clarification des termes et concepts autour des *formes urbaines*

¹ D'autres raisons peuvent être évoquées pour expliquer l'absence d'une synthèse plus ample des résultats des six projets : i) ça n'était pas initialement prévu dans la mission qui m'a été confiée ; ii) la temporalité de ce travail s'accordait mal avec celle des projets BAUM puisque la plupart de ceux-ci n'avaient pas finalisé leurs résultats, voire leurs méthodes, au moment des entretiens et de la rédaction de cette synthèse ; et iii) il m'aurait été éthiquement difficile de traiter les résultats sans être critique, ce qui m'aurait mis dans une position délicate en tant que chercheur postdoctorant.

accompagnée d'un tour d'horizon plus général des méthodes de description de la morphologie urbaine et recommandations méthodologiques, se référer au « référentiel pour l'étude écologique et environnementale des formes urbaines », Martin (2026 - en cours de finalisation).

ORGANISATION DE LA SYNTHÈSE

Il n'est pas simple de *synthétiser* ou *d'analyser* six projets de recherche pluridisciplinaires de trois ans, réalisés sur des questions différentes, dans des contextes et terrains différents, avec des méthodologies et des équipes différentes. Pour aider le lecteur à trouver l'information pertinente, voici comment cette synthèse s'articulera :

Pour commencer, un **résumé factuel** des approches déployées dans chaque étude sera présenté, projet par projet. Il résumera ainsi les objectifs et questions de recherche, les modèles biologiques étudiés, les méthodes de description des *formes urbaines* rencontrées ainsi que les échelles et les données mobilisées. Cette partie est « factuelle » dans le sens où les approches seront résumées sans véritable analyse des choix effectués.

Suivra une **analyse des motivations initiales** des *choix de conception* des projets BAUM et de leurs **implications**. Un intérêt particulier sera porté aux conséquences de la chronologie de ces choix et à leurs contraintes sous-jacentes, qu'elles soient liées à cette chronologie, aux objectifs des projets, aux modèles biologiques étudiés, à l'appropriation des méthodes ou encore à des aspects techniques.

Ensuite, une partie portera sur **l'évaluation a posteriori** des démarches engagées, basée notamment sur les avis et perceptions mêmes des équipes de recherche. Il y sera question des avantages et inconvénients des méthodes utilisées, des difficultés rencontrées, et d'éventuelles confusions engendrées par la collaboration entre personnes venant de disciplines ou de métiers différents.

Enfin, un **regard** sera porté sur les **enseignements méthodologiques issus des résultats** des projets BAUM ainsi que sur les **perspectives** qui émergent de ces travaux.

À l'exception du *résumé factuel* qui est détaillé projet par projet, l'analyse réalisée dans les parties suivantes abordera les projets alternativement de manière conjointe ou séparée, selon la pertinence des rapprochements qui pourront être faits. Il faut ici souligner que les approches des différents projets ne peuvent être classées sur un critère unique (les approches tantôt se rapprochant, tantôt s'éloignant, selon l'aspect considéré - cf. partie 3). Il n'y a pas non plus de sens à les hiérarchiser, aucune approche n'étant « meilleure » qu'une autre, elles permettent seulement de répondre à certaines questions et pas à d'autres.

RÉSUMÉ DES APPROCHES DÉPLOYÉES DANS LES SIX PROJETS BAUM

Dans cette partie, une présentation succincte de chacun des six projets BAUM est proposée. Il est évident que bien des choses intéressantes pourraient être dites sur chaque projet. Tous présentent des particularités et des résultats qui mériteraient d'être mis en avant et discutés. Cependant, pour rester fidèle aux objectifs de cette synthèse, on ne s'intéressera dans cette partie qu'aux généralités concernant le cadrage des projets, ainsi qu'aux aspects méthodologiques liés au choix des sites d'étude et à la description des *formes urbaines* ou des environnements dans lesquels ces sites se trouvent. Les seuls résultats qui seront abordés ici concerneront donc les résultats des approches d'identification ou de caractérisation des espaces urbains investigués.

PROJET MORPHOBIOT (TOULOUSE)

Présentation générale

Le projet MORPHOBIOT porte sur l'étude de la relation entre la morphologie de cinq types de tissus résidentiels issus de modèles urbains d'époques différentes, la végétation qui s'y développe, et les oiseaux qui y vivent. En réalité, l'étude de cette relation a servi de cadre de travail pour remplir divers objectifs :

- Fondamentaux – En visant à déterminer des moyens d'intégrer la biodiversité à la conception urbaine, ainsi qu'à remettre en question les façons de travailler des acteurs appartenant aux différentes disciplines impliquées dans le projet dans le but de créer une « culture commune » de prise en compte simultanée du vivant et des formes bâties dans la conception ou la représentation. Un questionnaire additionnel sur l'intégration du rapport au temps dans ces travaux est également recherché.
- Appliqués – En cherchant à transmettre ces réflexions fondamentales en direction des acteurs opérationnels.
- Pédagogiques – En s'attachant, à plus long terme, à transmettre les enseignements de ce projet auprès d'un public plus large composé d'habitants et d'étudiants-architectes, pour les sensibiliser aux questions de biodiversité urbaine.

L'idée générale étant de fournir de l'aide aux divers acteurs de l'urbanisme et de l'environnement urbain qui cherchent à s'orienter vers plus d'interdisciplinarité. Une partie du travail consiste donc à remettre en cause les façons de travailler de chaque métier, pour développer des méthodes où les réflexions communes prévalent sur le retranchement disciplinaire et l'empilement cloisonné de compétences individuelles. Ce projet am-

bitionne ainsi de toucher un large public, allant des concepteurs (architectes, paysagistes, urbanistes et acteurs institutionnels), aux chercheurs, aux spécialistes du vivant (écologues, naturalistes) en passant par les habitants, les associations locales et les étudiants. Pour ce faire, l'équipe MORPHOBIOT est composée d'architectes, d'urbanistes, de paysagistes, d'écologues, de botanistes et d'historiennes de l'architecture.

Dans le cadre de sa recherche, l'équipe MORPHOBIOT s'est donc intéressée à la diversité des typologies de « formes bâti-végétal » ainsi qu'à la diversité spécifique et fonctionnelle des oiseaux qui cohabitent avec ces formes. Le choix d'étudier la végétation paraissait évident puisque c'est le groupe taxonomique le plus visible dans la matrice urbaine et que les végétaux, en tant que producteurs primaires, supportent la vie de la plus grande part de la biodiversité urbaine. Les oiseaux, quant à eux, forment un modèle d'étude bien pratique, car très connu, facile à suivre, apprécié des habitants, et qui présente l'avantage additionnel d'interagir en trois dimensions avec la végétation et le bâti. Toutefois, il a été jusqu'à présent appréhendé dans les recherches en écologie urbaine et dans sa relation avec le bâti principalement au niveau *spécifique* (celui de l'espèce). Il s'agit donc ici pour l'équipe d'explorer ces relations au niveau de la « communauté » et selon sa dimension fonctionnelle.

Les hypothèses de travail sont exploratoires. Si l'équipe suppose qu'il existe, dans chacun des modèles urbains investis, des situations relationnelles « bâti-végétal » témoignant de compositions spécifiques plus favorables aux oiseaux que d'autres, du fait d'une plus grande proportion de végétation pluristratifiée, il est difficile de formuler des hypothèses précises tant les connaissances existantes sur le lien entre bâti et avifaune sont minces.

Sélection et description des sites d'étude

Pour mener à bien son étude, l'équipe MORPHOBIOT a sélectionné cinq quartiers toulousains qu'elle connaissait déjà et qui correspondaient à ses attentes. Ces quartiers représentent cinq tissus urbains différents plus ou moins anciens : un *faubourg*, un *quartier pavillonnaire*, une *citée-jardin*, un *grand ensemble*, et un écoquartier. Ces tissus urbains résidentiels incarnent tous une certaine forme de relation « Ville-Nature », liée à leurs époques respectives de construction. Ils forment ainsi à la fois un gradient d'âge et de densité de bâti articulé à des types de végétation relativement matures et importantes, le tout formant donc, potentiellement, des formes propices à l'accueil et au maintien d'une avifaune variée. Il est intéressant de souligner que MORPHOBIOT est le seul des six projets BAUM dans lequel les *formes urbaines* étudiées ont été choisies a priori, grâce aux

connaissances propres aux membres de l'équipe, pour des raisons explicites. Cela a son importance (cf. partie 2).

Dans ce projet, les *formes urbaines* ont été décrites à l'échelle du quartier et à l'échelle architecturale, selon une **approche qualitative** qui comporte plusieurs étapes :

- La première a consisté en une **démarche d'observation descriptive**, à plusieurs échelles : d'abord en collaboration avec l'Agence d'urbanisme et d'aménagement Toulouse aire métropolitaine (AUAT) dans le but d'évaluer les potentialités écologiques des sites et leur proximité aux corridors métropolitains à large échelle (via l'outil « Pot'Eco » de l'AUAT) ; puis, grâce aux archives cartographiques et cadastrales, une phase de description de l'historique des quartiers et de leurs trajectoires de transformation a été menée, impliquant notamment l'identification des *permanences* dans les formations bâties ou végétales.
- La deuxième phase comporte diverses **campagnes de terrain**. Terrain d'abord, dans le cadre d'un stage, pour relever les *formes architecturales*, cartographier les emprises bâties, et identifier les matérialités des sols et des façades de toutes les formes bâties des cinq sites. Terrain aussi, pour relever les formes végétales via les strates de végétation (herbacée, arbustive, arborée, buissonnante et lianescente), cartographier leurs emprises au sol et inventorier certaines de leurs caractéristiques favorables à l'avifaune (e.g. identité, structure, persistance du feuillage, type de fructification). Terrain encore, pour déterminer le « sociotope » des sites en enquêtant sur les pratiques de gestion, l'accessibilité des espaces semi-naturels, leurs usages et leur fréquentation. Terrain enfin, pour décrire la diversité spécifique et fonctionnelle des communautés aviaires locales.
- La troisième et dernière partie de ce travail de caractérisation des *formes urbaines*, peut-être la plus compliquée, fut l'étape de **formalisation et de représentation des observations** des phases précédentes. Il s'est agi d'un travail de réflexion et de vulgarisation réellement transdisciplinaire, visant à trouver comment décrire et représenter graphiquement le vivant de manière aussi fine que le bâti l'est habituellement dans les documents d'urbanisme, et ce, en trois dimensions.

Ces phases descriptives, au tropisme équilibré entre prise en compte du minéral et du vivant, ont donné naissance à une typologie de **18 « formes bâties-végétales »**, qui représentent autant de types de rencontres entre des morphologies construites et des formations végétales. Cette approche

de description, d'une remarquable finesse de représentation, intègre en outre les *dimensions temporelles* et *architecturales* de la *forme urbaine* de par la prise en compte des différentes époques de construction ainsi que les formes végétales actuelles et celles héritées du passé. En revanche, la prise en compte de la *configuration spatiale* des éléments décrits n'a pas explicitement été au cœur de ses investigations, même si l'équipe de recherche en a relevé la pertinence et espère en analyser les variations et leurs conséquences dans de futurs projets.

• Pour plus de détails sur les données utilisées dans le projet MORPHO-BIOT, se référer à la Table 1. Pour plus de détails sur les résultats du projet, se référer à sa publication dédiée (Leger-Smith *et al.*, 2025).

PROJET RÉAUMUR (DIJON ET FRANCE ENTIÈRE)

Présentation générale

Le projet RÉAUMUR a été pensé pour explorer comment la configuration spatiale des tissus urbains et des réseaux d'habitats herbacés impacte la diversité des insectes pollinisateurs et les réseaux d'interactions entre plantes et pollinisateurs, indépendamment de la densité du *gradient urbain*. Ce projet affiche ainsi une vocation plutôt fondamentale en écologie urbaine en cherchant à améliorer les connaissances existantes sur les facteurs qui président à l'assemblage des communautés pollinisatrices en milieux urbains et aux variations de leurs interactions avec les plantes à fleurs. RÉAUMUR s'adresse donc principalement à un public académique, en écologie ou en urbanisme, bien qu'en urbanisme, la dimension opérationnelle ne soit jamais très loin.

Le choix de s'intéresser aux réseaux d'interactions plantes-pollinisateurs et aux *formes urbaines* n'est pas fortuit. L'équipe de recherche considère en effet comme plus prometteur de s'intéresser aux formes urbaines plutôt qu'aux simples effets du « gradient urbain » sur la *diversité* des pollinisateurs. Si l'utilité ou le capital sympathie des pollinisateurs sont généralement admis, et leur diversité largement étudiée, les interactions fonctionnelles que ces taxons tissent avec la végétation sont particulièrement méconnues en ville, permettant ainsi d'envisager de nombreuses pistes d'investigation inédites.

Pour explorer ces relations, l'équipe RÉAUMUR – composée d'écologues, de géographes-aménageurs et d'un informaticien – a construit le projet autour de deux volets correspondants à deux types de données biologiques : i) un « volet local », centré sur Dijon, où les données ont été recueillies directement sur le terrain au sein de sites soigneusement sélectionnés ;

et ii) un « volet national », en exploitant les collections urbaines du programme de sciences participatives *Spipoll* (<https://www.vigienature.fr/fr/spipoll-0>), initié par le Muséum national d'Histoire Naturelle.

Sélection et description des sites d'étude

Pour le « volet local » de RÉAUMUR, l'équipe a travaillé sur un réseau d'espaces verts dominés par de la végétation herbacée, plus favorable aux pollinisateurs, au sein de la métropole de Dijon. Ces sites ont été sélectionnés car ils présentent des *densités urbaines* et des degrés de *connectivité* (des habitats herbacés) comparables. L'idée étant ici de se concentrer sur les **effets de la configuration morphologique du bâti** plutôt que sur ceux de la *densité* ou de la *connectivité* des habitats. Plus précisément, la procédure stratifiée d'échantillonnage qui a permis de sélectionner les sites s'est déroulée de la manière suivante :

- Pour commencer, les îlots viaires de l'agglomération dijonnaise ont d'abord été délimités par SIG. Pour chacun de ces îlots viaires, **une dizaine de métriques** caractérisant l'environnement urbain ou l'occupation du sol a ensuite été calculée (e.g. densité, surface, hauteur et contiguïté du bâti ; proportion de trouées entre les bâtiments ; proportion de surface arborée ou herbacée ; distance au centre-ville, etc. ; détails dans la Table 1). Ces métriques ont été calculées à partir d'un modèle d'occupation du sol très détaillé, créé pour l'occasion.
- Ces métriques ont alors été intégrées dans une Analyse en Composantes Principales (ACP), ce qui a permis de « projeter » les îlots viaires le long d'axes factoriels synthétisant lesdites métriques. Le premier axe de cette ACP représente ainsi un gradient multivarié de *densité urbaine*, alors que les axes suivants différencient les îlots viaires selon des aspects liés à la configuration spatiale de leur bâti. Un sous-ensemble d'îlots viaires a alors été choisi au sein des îlots localisés approximativement au même niveau du premier axe de l'ACP, c.-à-d. dans **une même gamme de densité urbaine**.
- Pour ce sous-ensemble d'îlots viaires, des **métriques de connectivité des habitats herbacés** ont ensuite été calculées avec le logiciel Graphab (développé au sein du laboratoire ThéMA, qui gère le projet RÉAUMUR), afin d'identifier les zones différenciées selon leur connexion aux réseaux d'habitats à l'échelle paysagère.
- Des espaces verts accessibles ont finalement été sélectionnés au sein de ces zones, en prenant soin qu'ils soient équitablement répartis spatialement pour éviter les effets d'autocorrélation spatiale (c.-à-d. d'avoir des ressemblances biologiques simplement liées à la proximité géographique).

Cette procédure quantitative assez élaborée a ainsi permis d'identifier les sites potentiels au sein desquels une campagne de relevés biologiques a alors pu être mise en place. Cette campagne de terrain, nécessitant à la fois des relevés floristiques et des captures de pollinisateurs (qu'il a fallu identifier), était objectivement assez lourde et chronophage. En conséquence, seuls 35 des sites potentiels ont ainsi pu être échantillonnés.

La morphologie urbaine des sites dijonnais retenus a par la suite été décrite via une **approche quantitative** faisant appel **au même ensemble de métriques** précédemment citées (métriques de composition et de configuration du paysage urbain, et métriques de connectivité). Ainsi, il fut associé à chaque site un jeu de métriques dont les valeurs correspondent aux valeurs médianes de ces métriques calculées à l'échelle de l'*unité spatiale de référence* choisie. Cette *unité spatiale de référence* était initialement l'îlot viaire dans lequel se trouve le site d'étude. Ce choix avait été motivé par la volonté d'utiliser une *unité spatiale* qui soit pertinente pour les urbanistes. Cependant, il s'est avéré que les îlots viaires de Dijon sont de tailles très variables. Cela soulevait des questions concernant la représentativité et donc la comparabilité des sites (un problème très fréquent en analyse spatiale, dénommé MAUP pour « *Modifiable Areal Unit Problem* »), ce qui est statistiquement problématique. En conséquence, il a finalement été choisi de changer d'*unité spatiale de référence* et de calculer les valeurs des métriques à différentes échelles, en utilisant des cercles de voisinage de différents rayons autour des sites. Ces différents rayons reflétant l'incertitude existant sur les capacités réelles de déplacement de l'entomofaune urbaine.

Pour le « volet national », l'équipe RÉAUMUR a tiré parti des relevés géolocalisés (appelés « collections ») du programme de science participative Spipoll. Pour sélectionner les sites à étudier parmi les plus de 5000 relevés de la base de données Spipoll, une nouvelle procédure stratifiée d'échantillonnage a été développée :

- Tout d'abord, il a fallu exclure les collections qui ne sont pas localisées dans des aires urbaines. Des critères de pertinence biologique, non liés aux questions de morphologie urbaine, ont également été utilisés, tels que le fait de se concentrer sur les quatre ordres principaux d'insectes que sont les diptères, les hyménoptères, les coléoptères et les lépidoptères.
- Dans un rayon de 300 m autour de chaque collection ainsi retenue, une carte d'occupation du sol a ensuite été **générée automatiquement** à partir des données OSO du pôle Theia, et du Registre Parcellaire Graphique de l'IGN. Ces cartes ont permis de calculer des mé-

triques de *densité* et de *composition du bâti* autour des collections (e.g. pourcentages de maisons individuelles, d'immeubles, de bâtiments industriels, etc. ; détails dans la Table 1).

- À partir de ces métriques, il a alors été possible d'exclure les collections situées dans les zones urbaines situées **aux deux extrémités du gradient de densité de bâti**. Une ACP suivie d'une Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) sur les collections restantes a, par la suite, permis de répartir celles-ci en cinq classes relativement homogènes : le *pavillonnaire diffus*, le *pavillonnaire dense*, l'*habitat collectif*, le tissu mélangé de *pavillonnaire et de bâti industriel et commercial*, et le tissu mélangé de *grand collectif et de bâti commercial*.
- Les collections urbaines réparties dans les cinq classes ont finalement été échantillonnées aléatoirement pour éviter les effets de grappe et donc d'autocorrélation spatiale.
- Des métriques de *connectivité* des habitats herbacés ont également été calculées pour chaque collection, approximant la quantité de ressources atteignables dans le paysage en fonction de capacités de déplacement moyennes des insectes pollinisateurs.

Au total, ce sont 665 sites urbains répartis dans toute la France qui ont ainsi été sélectionnés, décrits et classés.

Pour résumer, dans les deux volets du projet RÉAUMUR, les sites d'étude ont d'abord été sélectionnés, grâce à des procédures stratifiées d'échantillonnages, avant d'être décrits à l'aide de diverses **métriques quantitatives**. Il est important de souligner que ces métriques ont été choisies selon leur pertinence écologique supposée pour les insectes pollinisateurs, à la suite d'une revue de littérature sur le sujet. Dans le « volet local », les métriques ont ensuite été gardées telles quelles pour caractériser les *formes urbaines* rencontrées, alors qu'elles ont été agrégées par analyses multivariées pour donner des classes de *tissus urbains* dans le « volet national ».

L'approche quantitative employée dans RÉAUMUR, complexe, mais rigoureuse dans sa représentation, exclut volontairement toutes considérations pour les dimensions temporelles, architecturales ou sociales des *formes urbaines*. L'idée assumée est d'explorer prioritairement les dimensions descriptives les plus simples avant de chercher à complexifier les choses, puisque même les relations les plus simples sont encore mal connues et documentées sur ce sujet. Cela étant dit, comme pour la plupart des projets BAUM, les types de *tissus urbains* identifiés représentent des âges de construction et des styles architecturaux différents. On pourrait dire que ces aspects sont donc indirectement pris en compte. Les

métriques utilisées, quant à elles, décrivent explicitement une partie de la configuration spatiale du bâti et des taches d'habitat nécessaires au déroulement du cycle de vie des organismes étudiés.

• Pour plus de détails sur les données utilisées dans le projet RÉAUMUR, se référer à la Table 1. Pour plus de détails sur les résultats du projet, se référer à sa publication dédiée (Foltête *et al.*, 2024).

PROJET TRAM'BIOSOL (PALAISEAU)

Présentation générale

Le projet TRAM'BIOSOL s'intéresse à la façon dont les *formes urbaines* conditionnent l'assemblage des communautés lombriciennes (c'est-à-dire des « vers de terre ») de par leur effet sur l'habitabilité et la continuité des sols, notamment en mobilisant le concept de « trame brune ». Pour ce faire, ce travail implique la poursuite de différents sous-objectifs :

- Fondamentaux – En cherchant à circonscrire conceptuellement la notion de « trame brune » et les paramètres qui en découlent, jusqu'alors très peu représentés dans la littérature scientifique. Et en examinant, sur un territoire donné, l'effet de certains facteurs urbanistiques (e.g. formes urbaines, époque d'urbanisation comme estimation de l'âge des sols) et pédologiques (propriétés physico-chimiques, degré d'anthropisation, type de sol) sur les communautés lombriciennes. Il s'agit ainsi d'évaluer si les espaces végétalisés urbains et périurbains (parcs, jardins, bordures de voirie, etc.) peuvent agir comme réservoirs de biodiversité lombricienne, et d'évaluer les barrières à leur connectivité.
- Appliqués et méthodologiques – En s'intéressant aux potentiels leviers d'intégration des sols et de leur biodiversité dans les documents de planification à l'échelle territoriale, en proposant une méthode simple d'évaluation de la biodiversité des sols, ou en recherchant des solutions innovantes pour préserver ou restaurer la « trame brune » dans les projets d'aménagement urbain.
- Pédagogiques – En sensibilisant élus et habitants à la biodiversité des sols et à son importance pour la fourniture de services écosystémiques.

Le projet TRAM'BIOSOL aborde donc la thématique de la « trame brune » et de la biodiversité des sols sous des angles d'attaque complémentaires, en cherchant à toucher aussi bien les publics académiques (en écologie et en aménagement) ou opérationnels, que les habitants. L'équipe de re-

cherche intègre, pour ce faire, des biologistes des sols et pédologues, des aménageurs-paysagistes spécialistes des sols, des architectes, et spécialistes du droit de l'urbanisme.

L'ambition est d'approfondir nos connaissances sur un compartiment méconnu, le sol urbain, dont la santé et la faune sont pourtant essentielles puisqu'elles sont à la base des réseaux trophiques desquels dépend toute la biodiversité terrestre. Si ce travail comporte indubitablement une dimension exploratoire, il cherche tout de même à tester l'hypothèse selon laquelle il est des *formes urbaines* qui impliquent la présence de sols défavorables aux lombriciens, puisque très fragmentés et dégradés en termes d'habitabilité.

Sélection et description des sites d'étude

L'équipe TRAM'BIOSOL a choisi d'étudier le plateau de Saclay, en région parisienne. Ce choix n'est pas le fruit du hasard, mais s'appuie sur des études pédologiques exploratoires réalisées sur l'ensemble du bassin parisien qui ont identifié cette zone comme potentiellement favorable aux vers de terre, du fait de la présence de sols fertiles de types « luvisols ». C'est donc sur la commune de Palaiseau que se sont déroulées les investigations de ce projet.

Afin d'élaborer un plan d'échantillonnage des sols sur la partie de Palaiseau qui occupe le plateau de Saclay, un processus de description de la zone d'étude en plusieurs étapes a été mis en place. Pour cette tâche, l'équipe a joué du concours d'un stagiaire architecte qui, sous la supervision des architectes du projet, s'est chargé des différentes cartographies successives ayant permis d'identifier les sites potentiels d'échantillonnage :

- Tout d'abord, une première série de cartographies a été réalisée grâce aux informations historiques contenues dans le « diagnostic et état initial de l'environnement » du Plan Local d'Urbanisme (PLU) de Palaiseau, et des bases de données BD TOPO® de l'IGN et EVOLUMOS de l'Institut Paris Région. Il a ainsi été possible d'illustrer, à différentes dates (entre 1850 et 2020), **la progression du processus d'urbanisation** de la commune. Cette information est importante pour localiser des zones dont l'urbanisation est ancienne afin d'augmenter les chances **d'exclure les sols récemment perturbés** par la construction, puisque le remaniement des sols est un facteur connu pour être défavorable aux lombriciens.
- Une **analyse typomorphologique des formes bâties** a ensuite été réalisée, se basant principalement sur l'exploitation de la BD TOPO®.

Des requêtes conditionnelles successives ont en effet permis d'identifier individuellement les bâtiments selon leur usage (e.g. habitation, commercial), leur dimension (e.g. hauteur, nombre de logements), leur âge, ou la matérialité de leur toiture. Ces requêtes, combinées à des vérifications manuelles par photo-interprétation, ont facilité la détermination d'une typologie de 17 types de *formes urbaines*, représentées à une résolution correspondant globalement à celle de la parcelle.

- Il a alors été possible de **recouper cette typologie** avec certaines des cartes historiques précédemment créées, plus précisément pour chaque décennie entre 1950 et 2020.

- L'étape suivante a consisté en **l'identification des « trames » du territoire d'étude** : la « trame verte » d'une part, comprenant principalement les espaces occupés par des pelouses ouvertes – plus favorables aux vers de terre que les zones arborées –, et la « trame grise » d'autre part, comprenant le bâti, le réseau viaire, ainsi que toutes sortes d'obstacles aux déplacements lombriciens – sorte de négatif de la « trame brune ». Cette étape fut également réalisée par SIG, en tirant à nouveau avantage de différentes bases de données ouvertes (cf. Table 1). Il a alors été possible de localiser les potentiels « réservoirs » de biodiversité des sols situés en lisière et au sein de quartiers urbanisés, et les éventuels corridors de dispersion.

- Enfin, le croisement des résultats des différentes étapes précédentes a permis de cibler les parcelles à échantillonner, situées à proximité des zones réservoirs pour la dispersion des vers de terre, et dépourvues d'obstacles majeurs à leurs déplacements (e.g. routes, murets, fossés) afin de pouvoir se concentrer sur l'effet de la seule *forme urbaine*. En définitive, grâce au recoupement de ces critères, ce sont 66 sites qui ont été échantillonnés, répartis au sein de cinq types de *formes urbaines* : les *habitats individuels continus* ou *discontinus*, et les *habitats collectifs continus* ou *discontinus*, et les *équipements et services*. De plus, des sites non associés à une forme urbaine en particulier ont été également échantillonnés tels que les boisements et les linéaires d'accompagnement de voirie.

Au-delà des 66 sites d'échantillonnage des communautés lombriciennes, ce sont plus d'une centaine de relevés pédologiques qui ont été effectués dans la zone pour caractériser les types de sols, leur degré d'anthropisation et niveau d'habitabilité.

Il est intéressant de noter que pour identifier son territoire d'étude, l'équipe de TRAM'BIOSOL a tiré avantage de plusieurs campagnes de terrain pré-

alables, ce qui n'est pas toujours possible. Pour ensuite sélectionner ses sites d'échantillonnage, il a d'abord fallu décrire les *formes urbaines* du territoire d'étude via une **approche** « **semi-quantitative** » basée sur le recoupage de bases de données spatialisées ou textuelles (e.g. PLU). Le « temps » fait partie intégrante de la démarche, puisque le processus d'urbanisation de Palaiseau a été explicitement cartographié et utilisé dans la sélection des sites et, dans une certaine mesure, dans la caractérisation des *formes urbaines* rencontrées. On pourrait même presque dire que la dimension architecturale est indirectement présente de par la distinction des différentes époques de construction. Enfin, la notion de configuration est présente dans cette démarche d'au moins deux manières : d'une part, de par la description des patrons d'étalement urbain au fil du temps et, d'autre part, simplement par la qualification de tissus « continu » ou « discontinu », supposés plus ou moins favorables à la « trame brune » et donc perméables aux dynamiques spatiales des communautés lombriciennes.

- Pour plus de détails sur les données utilisées dans le projet TRAM'BIO-SOL, se référer à la Table 1. Pour plus de détails sur les résultats du projet, se référer à sa publication dédiée (Maréchal *et al.*, 2025).

Table 1 – Aspects clés des méthodologies descriptives des six projets BAUM. Ce tableau résume notamment : l'ordre des choix (des modèles biologiques étudiés, des sites échantillonnés, des formes urbaines [FU] décrites) ; le nombre de sites étudiés et décrits ; l'étendue de l'échelle descriptive (et si la caractérisation des formes urbaines couvre des espaces discrets du territoire d'étude, comme des zones tampons autour des sites [buffers], ou l'intégralité de la zone) ; le grain de l'échelle descriptive (c.-à-d. le plus petit espace dont la morphologie est décrite, ce qui correspond à « l'unité spatiale de référence ») ; le type d'approche descriptive employée ; les métriques ou indicateurs utilisés dans les approches descriptives ; la résultante de l'approche descriptive (c.-à-d. généralement une typologie de formes urbaines) ; les données sources utilisées et leur résolution spatiale approximative. NA = non applicable ; FU = formes urbaines ; îlot = îlot viaire ; OS = modèle d'occupation du sol (que l'on retrouve dans MOS, EVOLUMOS, OSO, etc.) ; TUF = tissus urbains franciliens.

Projet	Territoire	Modèles biologiques étudiés	Ordre des choix méthodologiques	Nombre de sites étudiés	Echelle descriptive (étendue)	Unité spatiale de référence (grain)	Type d'approche descriptive	Métriques descriptives utilisées	Résultante	Données sources	Résolution spatiale des données
MORPHBIOT	Toulouse	Oiseaux	FU + sites > modèle biologique	5	Quartier (caractérisation spatialement continue)	Forme bâtie-végétale (infra-parcelle)	Qualitative (basée expertise)	NA	> 5 types de FU : faubourg, habitat pavillonnaire, cité-jardin, grand ensemble, écoquartier > 18 types de formes bâties-végétales	Cadastres, données Opidéa, relevés architecturaux et de végétation (+ données Pot'éco)	Métrique à décamétrique
RÉAUMUR	Dijon	Insectes pollinisateurs	Modèle biologique > FU > sites	35	Ville entière puis buffer (caractérisation spatialement discrète)	Îlot puis buffer (plusieurs tailles)	Quantitative (basée métriques)	Métriques de bâti (proportion, contiguïté, fréquence, hauteur, rapport hauteur/largeur, surface moyenne, variabilité de surface); proportion de trouées; métriques relative aux taches d'habitat herbacées ou arborées (proportion, nombre, surface, variabilité de surface)	> Jeu de métriques de composition ou de configuration urbaine	OS ad hoc (base BD TOPO + Pléiades + LiDAR), BD TOPO + RPG (IGN)	Métrique
	France entière	Insectes pollinisateurs	Modèle biologique > sites > FU	665	Buffer (caractérisation spatialement discrète)	Buffer (300 m de rayon)	Quantitative (typologie basée métriques)	Densité du bâti; proportions de types de bâti (maisons individuelles, maisons mitoyennes, petit collectif, grand collectif, bâti industriel, bâti commercial, bâti agricole, bâti religieux, bâti sportif)	> 5 types de FU : pavillonnaire diffus, pavillonnaire dense, habitat collectif, mélange pavillonnaire et industriel-commercial, mélange grand collectif et commercial	OSO (Pôle Théia) + RPG	Décamétrique

TRAM'BIOSOL	Palaiseau	Lombriciens	Modèle biologique > FU > sites	66	Infra-communale (caractérisation spatialement continue)	Infra-îlot (taille variable)	Semi-quantitative (basée recoupement de bases de données)	Usage du bâti (habitat, commerce, etc.); caractéristiques du bâti (hauteur, nombre de logements, âge, type de toiture, etc.)	> 4 types de FU échantillonnées : habitat individuel continu ou discontinu, habitat collectif continu ou discontinu > 17 types de FU au total	EVOLUMOS (Institut Paris Région), PLU, BD TOPO (IGN), données Open Street Map, relevés de terrain	Métrique
FRUGACITÉ	Région parisienne (échelle locale)	Espèces virtuelles	Sites > FU > modèle biologique	4	Buffer (caractérisation spatialement discrète)	Infra-îlot (taille variable)	Semi-quantitative (basée recoupement de bases de données)	Type de bâti; présence de végétation; présence d'obstacles; éléments architecturaux ou techniques	> 36 classes de TUF-amélioré	MOS + TUF (Institut Paris Région), BD TOPO + RPG (IGN)	Métrique
	Région parisienne (échelle paysagère)	Espèces virtuelles	Sites > FU > modèle biologique	33	Ville entière (caractérisation spatialement continue)	Infra-îlot (taille variable)	Mixte (basée recoupement de bases de données)	Type de bâti; présence de végétation; présence d'obstacles; éléments architecturaux ou techniques	> 36 classes de TUF-amélioré	MOS + TUF (Institut Paris Région), BD TOPO + RPG (IGN)	Métrique
BIOREV'AIX	Aix-en-Provence (échelle locale)	Plantes et gastéropodes	Unité spatiale + modèle biologique > FU > sites	96	Ville entière puis buffer (caractérisation spatialement continue)	Tronçon de rue (taille variable)	Quantitative (typologie basée métriques)	Métriques de bâti (proportion, hauteur, contiguité, degré d'ouverture); métriques viaires (largeur moyenne du tronçon; profil du tronçon)	> 4 types de FU : habitat pavillonnaire, habitat collectif continu ou discontinu, tissu composite	BD TOPO (IGN), LiDAR (Kermap), base FREDON, relevés de terrain	Métrique
	Aix-en-Provence (échelle paysagère)	Ecureuils	NA	NA	Ville entière (caractérisation spatialement continue)	Hexagone (12 m de diamètre)	Quantitative (basée métriques)	Proportion de végétation arborée	> Degré de perméabilité aux mouvements	BD TOPO (IGN), LiDAR (Kermap), base FREDON	Métrique
ÉVOLVILLE	Strasbourg	Plantes	Modèle biologique > sites > FU	60	Buffer (caractérisation spatialement discrète)	Buffer (300 m de rayon)	Quantitative (typologie basée métriques)	Métriques édaphiques (proportions d'azote et de sable); température; compacité du bâti; gestion	> 4 groupes de position sur un gradient environnemental	BD TOPO (IGN), NDVI, relevés de terrain	Métrique à décamétrique

PROJET FRUGACITÉ (RÉGION PARISIENNE)

Présentation générale

Le projet FRUGACITÉ a pour ambition d'étudier comment les « quartiers de gare » affectent la connectivité des habitats pour la biodiversité, afin d'évaluer comment les continuités écologiques peuvent être intégrées dans la conception de ces quartiers, tout en prenant en compte les contraintes techniques propres à ces espaces (e.g. sécurité, gestion des flux). À cela s'ajoute le développement d'une interface-métier pour l'aide à la décision et à la communication sur ce sujet. Ce projet présente donc des considérations plutôt appliquées et méthodologiques, s'adressant à des acteurs opérationnels (e.g. concepteurs, métiers du ferroviaire) ou académiques dans le domaine de l'aménagement ou de la conservation de la biodiversité urbaine. Ce projet a en outre la particularité intéressante d'avoir inclus ses partenaires opérationnels tout au long de la conception de sa méthodologie, via la tenue d'ateliers participatifs récurrents ainsi que la réalisation d'une thèse CIFRE hébergée chez l'un de ces partenaires.

L'idée qui sous-tend ce projet tient du fait que les concepteurs et exploitants des « quartiers de gare », ou d'autres quartiers à fortes contraintes techniques (e.g. ports, aéroports), doivent intégrer de nombreux enjeux environnementaux (e.g. mobilité et intermodalité, énergie, gestion des déchets), alors que la composante liée à la biodiversité n'est actuellement que peu prise en compte. Par ailleurs, l'effet des gares sur les flux biologiques n'a fait l'objet que de peu de recherches en écologie du paysage. Pour mener à bien ses ambitions, ce projet inclut donc une équipe composée principalement de géographes, d'architectes-urbanistes, et de concepteurs et maîtres d'ouvrage provenant des métiers du ferroviaire et de l'aménagement.

Contrairement aux autres projets BAUM, le projet FRUGACITÉ n'a pas ciblé de modèle biologique en particulier, mais s'est orienté vers la modélisation d'*espèces virtuelles*. Loin d'être déconnectées de la réalité, les espèces virtuelles représentent en fait diverses caractéristiques représentatives de certains groupes d'espèces : par exemple, la modélisation d'une *espèce virtuelle* représentative des « mammifères forestiers à faible capacité de dispersion » donnera des résultats pertinents pour différents taxons réels partageant ces caractéristiques (e.g. loir gris, campagnol roussâtre, martre). Une grande attention a été portée sur le fait de ne pas surestimer les capacités de déplacement ou de tolérance écologique des espèces représentées. Si ce type d'approche se justifie parfaitement, il implique des hypothèses exploratoires plutôt généralistes, même si l'équipe de recherche suppose que les « quartiers de gare » ont un effet fragmentant et

sont assez défavorables aux déplacements de la plupart des taxons, à plus forte raison dans les zones les plus urbanisées.

Sélection et description des sites d'étude

Comme évoqué ci-dessus, l'équipe FRUGACITÉ s'est largement appuyée sur des **ateliers participatifs multi-acteurs** pour élaborer ou valider certaines étapes de sa méthodologie. Le processus de création des *16 espèces virtuelles* étudiées s'est par exemple déroulé de manière concertée grâce à un tel atelier. Pour évaluer les effets des « quartiers de gare » sur la connectivité des habitats de ces espèces, deux niveaux d'analyse ont été retenus : une à l'échelle paysagère, l'autre à l'échelle locale.

Le choix a été fait de se focaliser sur la ligne du transilien N, dans l'ouest de la région parisienne, car celle-ci représente un continuum entre des zones urbaines très denses et des zones rurales sur une distance assez réduite. Cependant, pour identifier plus précisément les sites d'études des deux échelles d'analyse et caractériser leurs *formes urbaines*, plusieurs étapes ont été nécessaires :

- Pour commencer, il a d'abord fallu circonscrire et définir, via un atelier participatif, ce qu'est exactement un « quartier de gare » et quels sont ses enjeux.
- L'étape suivante a consisté en la création d'une **typologie des « quartiers de gare »**. Pour ce faire, une analyse des contextes paysagers des gares de la ligne étudiée a été réalisée. Autour de chaque gare de la ligne, l'occupation du sol, les hauteurs de bâti, certains éléments architecturaux, et les typologies d'espaces naturels et agricoles ont été extraits à différentes distances à partir des données du MOS (Institut Paris Région), de la BD TOPO® et du Registre Parcellaire Graphique (IGN). Ces données ont ensuite été agrégées via une ACP puis discrétisées grâce à une CAH (cf. la présentation du projet RÉAUMUR) pour obtenir **quatre grands types de gares** représentant un certain gradient d'urbanité : *gares en urbain dense, urbain collectif, périurbain résidentiel, et zone rurale*. Les profils de chaque gare étaient également complétés par des informations concernant leur potentiel d'accueil pour la biodiversité, leurs perspectives d'évolution (e.g. projets de développement), et des évaluations en termes de transit et d'intermodalité. Ces types de gares ont alors été utilisés pour l'analyse à l'échelle paysagère.
- En parallèle, de nouveaux échanges participatifs avec les partenaires du projet ont été engagés pour sélectionner les gares à retenir pour les analyses à l'échelle locale, grâce aux profils établis à l'étape précé-

dente. Ces échanges ont abouti à la sélection des « quartiers de gare » suivants (par ordre décroissant d'urbanité) : Paris-Montparnasse, La Verrière, Rambouillet et Epône-Mézières.

- Pour décrire la morphologie de ces quatre territoires, l'équipe de recherche a tiré profit de la **base de données spatialisée des Tissus Urbains Franciliens** (TUF ; Watkin et al., 2020), caractérisant les formes bâties d'Île-de-France et leurs usages à l'échelle de l'infra-îlot (c.-à-d. plus fine que celle de l'îlot viaire). L'environnement autour des quatre gares sélectionnées a ainsi été décrit grâce aux TUF dans un rayon de 5 km. Le TUF a ensuite été **enrichi** par l'ajout de la végétation (issue du MOS) et par des observations de terrain visant à inclure des éléments techniques et architecturaux propres à ces espaces.
- Enfin, chacune des catégories de ces *TUF améliorés* a fait l'objet d'une interprétation en termes de **perméabilité aux déplacements des espèces virtuelles étudiées** (e.g. présence et type de végétation, présence d'obstacles), afin de paramétrer les valeurs de résistance associées à ces occupations du sol dans la modélisation de la connectivité paysagère des « quartiers de gare » effectuée via le logiciel Graphab.

En définitive, ce sont 36 classes d'occupation du sol issues de ces TUF améliorés qui ont été générées pour les analyses à l'échelle locale.

L'approche descriptive utilisée dans FRUGACITÉ peut être qualifiée **d'approche « semi-quantitative »**, puisqu'elle allie exploitation de bases de données spatialisées et analyses quantitatives multivariées. Elle intègre explicitement une certaine prise en compte des dimensions architecturales, mais aussi sociales des *formes urbaines*, de par la prise en compte des usages et des fonctions des espaces ainsi décrits. La configuration des éléments urbains, quant à elle, est implicite dans les TUF. Enfin, il est intéressant de noter que les perspectives du projet intègrent différents scénarios prospectifs d'évolution des « quartiers de gare » pour restaurer la connectivité de ces espaces, ce qui s'apparente à une prise en compte, tournée vers l'avenir, de la dimension temporelle de la morphologie urbaine.

- Pour plus de détails sur les données utilisées dans le projet FRUGACITÉ, se référer à la Table 1. Pour plus de détails sur les résultats du projet, se référer à sa publication dédiée (Auvray *et al.*, 2025).

PROJET BIOREV'AIX (AIX-EN-PROVENCE)

Présentation générale

Le projet BIOREV'AIX s'est donné pour ambition d'évaluer comment le réseau viaire peut être le support de fonctionnements urbanistiques et écologiques de par sa structuration topologique, d'une part, en tant que réseau de « liens », et morphologique d'autre part, en tant que réseau de « lieux ». Le projet a ainsi été axé vers l'étude du « système arbre » à deux échelles spatiales :

- À l'échelle paysagère, c'est le réseau des *arbres de rue* qui a été considéré pour étudier les dynamiques spatiales des écureuils.
- À l'échelle locale, ce sont les pieds d'arbres qui ont été examinés, notamment en tant que support de communautés végétales et de gastéropodes.

La prise en compte des *formes urbaines* a, quant à elle, été abordée au niveau du tronçon de rue. Par ces choix, BIOREV'AIX propose donc un projet avec une dimension non seulement fondamentale, que ce soit en écologie ou en urbanisme, mais aussi appliquée et pédagogique, puisque des interactions fortes étaient prévues avec la municipalité (des résultats opérationnels initiaux devaient servir de base à des aménagements paysagers qui devaient ensuite nourrir de nouvelles analyses) et que des étudiants ont été impliqués dans ces travaux. Un large public a ainsi été visé, des habitants aux élus, en passant par les acteurs traditionnels de la gestion des espaces verts et de la maîtrise d'ouvrage urbaine. En conséquence, l'équipe de recherche est composée d'aménageurs-urbanistes, d'écologues, et d'un informaticien-écologue.

Ce positionnement de l'étude du « système arbre » contenu dans le « tronçon de rue » se justifie par le fait qu'il est à la croisée d'un grand nombre de parties prenantes territoriales. La trame viaire est une composante urbanistique essentielle tout en étant un support connu pour le fonctionnement écologique, que ce soit comme habitat, conduit ou barrière aux déplacements des espèces. En outre, l'étude des pieds d'arbres complète les recherches existantes sur d'autres types d'espaces semi-naturels, comme les friches, les jardins ou les parcs. Le choix de taxons aux capacités de dispersion décroissantes, et de l'arbre comme support de ces dispersions, forme un élégant emboîtement d'échelles. Les hypothèses formulées dans ce cadre demeurent relativement exploratoires puisque l'on suppose que les relations entre biodiversité et *formes urbaines* sont contraintes à la fois par la morphologie territoriale et urbaine des espaces bâtis et semi-naturels, ainsi que par la gestion des espaces semi-naturels situés en bord de voirie.

Sélection et description des sites d'étude

Dans BIOREV'AIX, la conception d'un plan d'échantillonnage pour sélectionner les sites d'études a préalablement nécessité la description des *formes urbaines* du territoire examiné : Aix-en-Provence. L'un des postulats de ce projet étant que **la trame viaire peut servir d'élément révélateur de la morphologie urbaine**, c'est le « tronçon de rue » (c.-à-d. un segment de rue compris entre deux intersections) qui a servi d'*unité spatiale de référence*.

De premières tentatives de modélisation du réseau viaire et de description de ses *formes urbaines* attenantes ont d'abord été initiées. Celles-ci se basaient soit sur l'usage de graphes spatiaux (Lagesse *et al.*, 2016), soit sur la méthode du *Multiple Fabric Assessment* développée par Araldi & Fusco (2019). Cependant, face à la complexité d'appropriation et de mise en œuvre de ces méthodes quantitatives, ces pistes furent finalement abandonnées pour favoriser l'adoption d'une approche développée spécifiquement pour ce projet :

- Pour commencer, des zones de voisinage (des *buffers*) autour des « tronçons de rue » ont été utilisées pour **extraire 26 métriques urbaines et écologiques** par SIG, à partir de différentes sources telles que la BD TOPO°, des données LiDAR, et la base de données FREDON qui recense l'ensemble des arbres et espaces verts gérés par les services municipaux d'Aix-en-Provence. Le calcul de ces métriques a notamment fait appel à la librairie Python de morphométrie urbaine *Momepy* développée par Fleischmann (2019).
- Par la suite, un tri dans ces métriques a été opéré pour retirer celles qui étaient trop redondantes ou qui ne décrivaient pas suffisamment la morphologie du *tissu urbain* autour du tronçon. **Un jeu réduit de six métriques** a ainsi été constitué (e.g. proportion de bâti, hauteur moyenne du bâti, largeur moyenne du tronçon, etc. ; détails dans la Table 1).
- Une ACP a ensuite été appliquée pour agréger ces métriques, puis une classification des quelque 5000 « tronçons de rue » analysés a fait émerger **quatre grands types de tissus urbains** : *l'habitat collectif continu* ou *discontinu*, *l'habitat pavillonnaire* et *le tissu composite* (hétérogène). Cette classification a ensuite été validée en étant qualitativement confrontée à une typologie existante de la morphologie urbaine réalisée par l'agence d'urbanisme locale.
- Une **deuxième typologie** différenciant les tronçons selon le **degré de végétalisation ligneuse de leurs abords** à deux échelles (20 et 100 m) a ensuite été réalisée par SIG. Cette classification permet de

donner une approximation de la quantité d'habitats arborés ou arbus-tifs atteignable par les gastéropodes de la zone ou, pour les plantes, de la pression de colonisation potentielle.

- À partir de ces deux classifications, un plan d'échantillonnage stratifié a alors pu être élaboré. Il fallait trouver des répliques de « tronçons de rue » possédant au moins 10 arbres d'alignement consécutifs pour chaque recoupement de catégorie des deux classifications. Le nombre d'arbres avait été préalablement identifié comme pertinent grâce à des courbes d'accumulation d'espèces réalisées dans le cadre d'une étude exploratoire. Il s'est cependant avéré qu'une telle stratification était trop contraignante sur ce territoire, même avec une réserve de plus de 5000 tronçons, et ne permettait pas de localiser suffisamment de répliques recoupant tous ces critères. La contrainte de rechercher des sites possédant des degrés similaires de végétation environnante fut donc alléger pour permettre de localiser suffisamment de sites.

Au final, ce sont 96 « tronçons de rue » qui furent échantillonnés pour les analyses à l'échelle locale. Pour ce qui est de l'analyse à l'échelle paysagère, celle sur les dynamiques de déplacement des écureuils, elle a été réalisée sur l'ensemble du territoire aixois par le développement d'un modèle spatial spécifique basé sur la théorie des graphes. Toutefois, ce modèle n'intégrant que la proportion de sols urbanisés et pas de véritables mesures de la morphologie urbaine, il ne sera pas décrit en détail ici. Son utilisation a toutefois permis d'identifier des « tronçons » évalués comme importants pour la connectivité paysagère des habitats arborés. Certains de ces « tronçons » ont par la suite fait l'objet d'une description qualitative plus poussée qui a servi de base à une **analyse des frontages** (c.-à-d. des relations à l'interface entre le réseau viaire et les parcelles) ainsi qu'à des enquêtes concernant la gestion et la perception des espaces semi-naturels situés dans ces espaces.

Il est intéressant de noter que le projet BIOREV'AIX a abordé la morphologie urbaine aixoise, ou tenté de le faire, de bien des façons : que ce soit par l'utilisation de méthodes quantitatives existantes, le développement d'une **typologie quantitative basée métriques**, ou encore par la description qualitative de certains « tronçons de rue » et le développement d'une grille de lecture des *frontages*. Il en ressort une assez bonne prise en compte des dimensions sociales et configurationnelles des *formes urbaines* du territoire d'étude. Une lecture temporelle et architecturale simple de la morphologie peut également se faire à travers l'analyse des âges de construction différents des quatre types de *tissus urbains* identifiés. En outre, l'évolution du paysage urbain devait également être prise en compte de par les prescriptions d'aménagement et la modélisation

subséquente de leurs impacts qui devait être faite. Cette partie du projet a malheureusement dû être abandonnée du fait du revirement de l'équipe municipale.

• Pour plus de détails sur les données utilisées dans le projet BIOREV'AIX, se référer à la Table 1. Pour plus de détails sur les résultats du projet, se référer à sa publication dédiée (Consalès *et al.*, 2025).

PROJET ÉVOLVILLE (STRASBOURG)

Présentation générale

Le projet ÉVOLVILLE cherche à comprendre les réponses des communautés et populations végétales au gradient d'urbanisation, notamment en termes d'adaptation, de plasticité ou de recombinaison des communautés. Ce projet comporte deux volets : un volet étudiant la composition spécifique et fonctionnelle des communautés herbacées ; et un volet s'intéressant aux réponses évolutives, adaptatives et fonctionnelles des populations de quatre espèces de plantes herbacées (le plantain lancéolé, le dactyle aggloméré, la luzerne lupuline et le trèfle des prés). Ce projet est donc un clair exemple de recherche fondamentale en écologie urbaine, bien qu'il implique également une certaine dimension appliquée orientée vers la gestion des espaces herbacés urbains, de par les liens étroits entretenus entre l'équipe de recherche et les différents gestionnaires des espaces étudiés (e.g. Eurométropole de Strasbourg, Port autonome de Strasbourg). Ce sujet semble d'autant plus pertinent que relativement aux « arbres », les surfaces herbacées sont souvent le parent pauvre des politiques de gestion et de conservation des espaces verts urbains, malgré leur grande importance écologique et leur richesse taxonomique.

L'une des volontés fortes qui a présidé à l'orientation de ces questions de recherche était de se trouver au plus proche des mécanismes qui causent les réponses biologiques investiguées. L'accent a donc été mis sur l'étude de variables locales et paysagères connues pour influencer directement sur le fonctionnement des écosystèmes (e.g. température, caractéristiques du sol, gestion de la végétation) plutôt que sur des variables ayant une influence indirecte (des *proxies*), comme la plupart des indicateurs traditionnellement utilisés en morphologie urbaine. La valeur de ce projet réside donc plus dans les connaissances écologiques fondamentales engrangées que dans ses enseignements urbanistiques appliqués. ÉVOLVILLE implique en outre l'utilisation d'approches fonctionnelles et évolutives assez originales en milieux urbains, ainsi qu'une remarquable gamme d'échelles d'investigation biologique, allant des communautés

jusqu'aux individus et aux gènes. En conséquence, l'équipe du projet est principalement composée d'écologues et de géographes.

Trois mécanismes de réponse des plantes au gradient urbain ont été explorés dans ce projet, correspondant à autant d'hypothèses de travail : « l'extinction locale », qui doit se traduire par une recombinaison des communautés ; la « plasticité », qui doit induire des modifications de traits fonctionnels réversibles et donc non transmissibles à la descendance ; et « l'adaptation », si les modifications observées sont génétiquement fixées et transmissibles. Pour tester ces hypothèses, les relevés de terrain ont été confrontés à des observations faites en jardin expérimental sur les quatre espèces communes sélectionnées. Ces espèces sont complémentaires puisqu'elles possèdent des formes, ainsi que des stratégies d'hivernage et de pollinisation variées.

Sélection et description des sites d'étude

Pour identifier les sites d'étude du projet au sein de l'Eurométropole de Strasbourg, l'équipe ÉVOLVILLE a procédé à une sélection d'espaces herbacés mésophiles selon deux gradients d'urbanisation : un gradient d'imperméabilisation du paysage allant de contextes forestiers à urbanisés (basé sur le NDVI, un indice de végétation qui a été calculé à partir d'une image satellite Sentinel 2) et un gradient de pression de gestion allant d'espaces non-gérés à des espaces fauchés plus de 10 fois par an.

Pour caractériser les conditions locales et l'environnement urbain des sites, différentes **variables de composition et de configuration paysagères** ont été calculées dans des rayons variants entre 100 et 300 m autour de chaque site (quantité et continuité de la végétation, compacité du bâti, densité de population, densité de routes), complétées par des mesures de température, d'hygrométrie, de fertilité et de structuration du sol et de gestion de la végétation. Après un retrait des variables fortement corrélées entre elles, celles présentant des relations bivariées significatives avec les indices taxonomiques et fonctionnels étudiés furent alors utilisées dans une ACP pour **reprojeter les sites dans un gradient environnemental multivarié**. L'étude de la position des sites dans cet espace multivarié a alors permis d'**identifier quatre types d'environnements**. L'analyse *qualitative* subséquente de leur occupation du sol et de leur morphologie urbaine a alors servi à l'interprétation des réponses écologiques étudiées.

Au total, ce sont 60 sites qui ont ainsi été étudiés. L'ordre des choix effectués et l'approche descriptive utilisée dans ÉVOLVILLE constituent une originalité au sein du programme BAUM. En effet, ici, la *forme urbaine* n'a pas été décrite en amont pour établir un plan d'échantillonnage ou pour être utilisée comme variable explicative dans les analyses, mais les

résultats écologiques des analyses ont servi à **caractériser quantitativement** la position des sites étudiés dans un gradient environnemental multivarié qui fut alors **interprété qualitativement** en termes urbanistiques. En conséquence, l'approche utilisée n'intègre la dimension sociale des espaces urbains étudiés qu'au prisme de la gestion de leur végétation, et n'aborde pas les dimensions architecturale ou temporelle, même si l'historique des sites peut, dans une certaine mesure, être déduit de l'étude de leurs caractéristiques édaphiques. La configuration spatiale des éléments urbains, elle, ne fut abordée que par l'analyse de la *compacité du bâti* entourant les communautés herbacées examinées.

Pour plus de détails sur les données utilisées dans le projet ÉVOLVILLE, se référer à la Table 1. Pour plus de détails sur les résultats du projet, se référer à sa publication dédiée (Hardion *et al.*, 2024).

MOTIVATIONS ET IMPLICATIONS DES CHOIX DE CONCEPTION DES PROJETS BAUM

Durant la conception de tout projet de recherche, les choix sont nombreux : choix du sujet d'étude et des questions de recherche, choix sémantiques ou conceptuels, choix des méthodes et de leurs différentes étapes, choix des résultats mis en avant, et bien d'autres encore. Les raisons qui poussent des chercheurs à faire ces choix sont plus nombreuses encore et méritent qu'on s'y attarde, car de ces décisions découlent une myriade d'effets dont les incidences ne sont pas toujours anticipées, ou même, remarquées.

On peut regrouper les principales raisons qui ont sous-tendu les choix méthodologiques lors de la conception des projets BAUM en trois groupes : les motivations relatives à la pertinence vis-à-vis des objectifs, les implications liées à la chronologie des choix, et les justifications techniques ou relatives à la complexité de se réappropriier les données et méthodes. Dans cette partie, on s'intéressera donc à certaines des justifications des choix méthodologiques opérés dans les projets BAUM, à leurs implications, anticipées ou non, ainsi qu'aux ajustements qui ont dû être apportés aux approches initialement prévues.

JUSTIFICATIONS DES CHOIX DE CONCEPTION

Pertinence vis-à-vis des objectifs

La plupart des décisions méthodologiques prises dans les projets BAUM l'ont été pour respecter les objectifs scientifiques que les équipes de recherche se sont fixés. Si la plupart des justifications avancées par les équipes BAUM tombent sous le sens et sont amplement discutées ailleurs (cf. partie 1), d'autres sont moins évidentes, mais méritent d'être soulignées du fait des conséquences qu'elles engendrent. Un bon exemple pourrait être le caractère pratiquement obligatoire d'adopter une **approche qualitative** (ou « semi-quantitative ») de description des *formes urbaines* lorsque l'on s'intéresse à des **aspects historiques ou architecturaux**, comme ce fut le cas pour les projets MORPHOBIOT, du fait de l'importance de l'architecture sur certains comportements des oiseaux (e.g. nidification, recherche alimentaire, observation), ou TRAM'BIO-SOL, à cause du besoin d'identifier des parcelles dont les sols n'avaient pas été remaniés depuis des décennies. En effet, il est difficile de décrire précisément les formes architecturales et les matérialités des bâtiments par des approches quantitatives, puisque les bases de données spatialisées sur ces aspects n'existent généralement pas. Similairement, s'il est théoriquement possible de décrire la morphologie urbaine d'un territoire à différentes dates grâce à une approche purement quantitative, les données historiques (e.g. cartes anciennes, archives cadastrales, couches

d'occupation du sol) ne disposent généralement pas des informations nécessaires au calcul des métriques sur lesquelles se basent la plupart des approches quantitatives, telles que le contour exact des bâtiments, leur hauteur, la largeur des rues, etc. Un fastidieux travail de numérisation et de recoupage de diverses sources historiques permettrait peut-être de reconstruire une base de données spatialisées possédant ces informations, mais, dans la plupart des cas, il semble tout de même plus simple et moins chronophage de décrire qualitativement la morphologie du territoire étudié aux dates souhaitées.

Lorsqu'un projet comporte un **objectif de sensibilisation, de vulgarisation ou de transmission des connaissances** à des acteurs non académiques, comme c'est le cas des projets FRUGACITÉ ou MORPHOBIOT par exemple, il peut être plus indiqué d'employer une **approche qualitative** de description des *formes urbaines* ou, tout du moins, d'aboutir à une **typologie**. Pour les publics non avertis, il est en effet plus facile de comprendre une méthode qualitative, basée sur des observations simples et parfois sensibles, que de saisir les complexes méthodes d'extraction de métriques et les algorithmes de classification chers aux méthodes quantitatives. Les typologies sont également plus incarnées et donc, plus faciles à se représenter que des gammes de métriques (cf. partie 3). Dans FRUGACITÉ, l'utilisation des TUF (*Tissus Urbains Franciliens*) pour décrire les « quartiers de gare » est en partie justifiée par le besoin d'employer une méthode et des données suffisamment simples et accessibles pour que les acteurs opérationnels de l'AREP puissent se les réapproprier (voir aussi la section « contrainte de réappropriation » ci-dessous), ainsi que par l'opportunité d'utiliser des données harmonisées à l'échelle francilienne, facilitant ainsi la diffusion et la réutilisation des méthodes et des résultats à une plus large échelle.

L'analyse des justifications citées par les équipes BAUM révèle un autre aspect intéressant lié aux **stratégies de publication**. À plusieurs reprises, les écologues de certaines équipes ont justifié le choix d'échantillonner des gradients ou de décrire la morphologie urbaine par des métriques du fait que les typologies ne sont pas en vogue en écologie urbaine, sous-entendant qu'il serait plus facile de publier une étude sur le « gradient urbain » que sur des types de *formes urbaines*. Si l'on peut regretter la soumission à un certain « effet de mode », cela demeure tout de même révélateur de la réalité et des pressions auxquelles sont confrontés les chercheurs académiques. Néanmoins, cela révèle aussi un léger amalgame méthodologique puisque l'on peut tout à fait étudier un gradient grâce à une typologie

(voir, par exemple, la figure 4 dans la partie 4)², avec l'avantage de pouvoir plus facilement communiquer auprès d'un public non scientifique, ce qui n'est pas négligeable lorsque l'on a pour **objectif de faire de la recherche appliquée** (qui implique généralement de transmettre des informations compréhensibles à des publics tiers). Cela soulève également l'épineuse question de savoir si l'on ne devrait pas remettre en cause les tendances et habitudes de publication lorsque celles-ci brident les possibilités de traiter efficacement des thématiques de recherche émergentes, telle que l'identification de *formes urbaines* maximisant diverses fonctions écologiques ou sociales.

Implications de l'ordre des choix de conception

Un aspect marquant qui ressort de l'analyse transversale des projets BAUM est l'importance de la chronologie des choix méthodologiques sur les étapes ultérieures d'acquisition ou de traitement des données. Dans la partie 1 de cette synthèse (ou Table 1), on peut voir que tous les projets n'ont pas opéré leurs « choix méthodologiques » (e.g. modèle biologique étudié, sites échantillonnés, description de la morphologie urbaine) dans le même ordre. Ce sont aux conséquences de ces choix et de leur chronologie que l'on va s'intéresser dans cette section, séparée en deux parties : les conséquences liées au(x) modèle(s) ou aux réponses³ biologiques, et celles relatives aux stratégies d'échantillonnage.

Conséquences liées aux « contraintes biologiques »

Lorsque l'on choisit ses **modèles biologiques en premier**, comme ce fut le cas dans différents projets (RÉAUMUR, TRAM'BIOSOL, et ÉVOLVILLE), on doit alors sélectionner des sites qui conviennent à l'étude de ces taxons. Dit comme cela, cela semble assez trivial. Néanmoins, il faut avoir conscience que cela a pour conséquence de **limiter le « pool »** (c.-à-d. le réservoir) **de sites d'étude possibles** et donc, en conséquence, les types de *formes urbaines* qui seront investigués. Dans TRAM'BIOSOL,

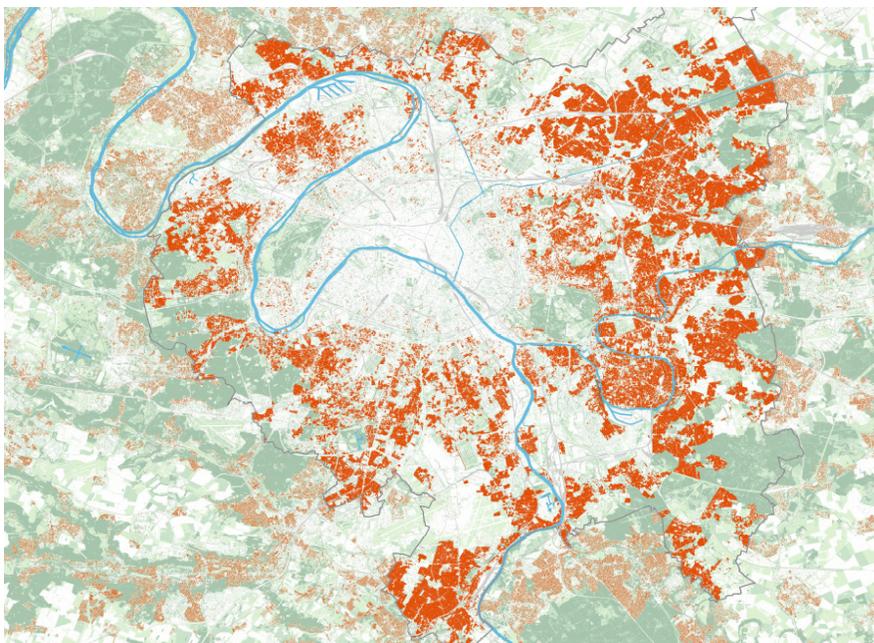
2 Les sites échantillonnés représentent presque toujours des gradients (continuum) de valeurs pour une ou plusieurs variables environnementales. Le choix de *discrétiser* (c.-à-d. de répartir les sites en classes *discrètes* = en groupes distincts = en types, donc de faire une « typologie »), ou non, dépend normalement de considérations purement statistiques ou, éventuellement, d'une volonté de simplification dans le but de faciliter la communication.

3 Le terme « réponse » fait ici référence au paramètre biologique ou écologique qui est étudié : par exemple, il peut s'agir de la « richesse spécifique » (c.-à-d. le nombre d'espèces observé) – comme la richesse en espèces herbacées mesurée dans ÉVOLVILLE – ou d'un degré de connectivité – comme mesuré par les métriques de *flux* ou de *centralité* étudiées dans FRUGACITÉ.

par exemple, l'accent mis sur les lombriciens a contraint l'équipe à sélectionner des sites possédant des sols assez évolués, non remaniés depuis longtemps, et si possible bien connectés aux réservoirs de biodiversité lombricienne. De ce fait, il n'aurait pas été possible de mener cette étude dans un quartier haussmannien en plein centre de Paris, à la Défense, ou dans bien d'autres zones de région parisienne. Similairement, dans ÉVOLVILLE ou RÉAUMUR, les modèles biologiques choisis ont contraint la gamme des sites d'études possibles puisqu'on ne retrouve pas forcément suffisamment de sites correspondant aux critères de sélection (e.g. surfaces herbacées non-boisées et situées à différents niveaux du gradient de gestion) **dans les mêmes proportions au sein de tous les types de tissus urbains existants**. Pour obtenir suffisamment de répliques qui correspondent à ces critères biologiques, on aura ainsi tendance à **suréchantillonner les formes urbaines fréquentes aux dépens des autres**. C'est sans doute l'une des raisons qui explique la surreprésentation des parcs ou des zones d'habitats résidentiels individuels (e.g. zones « pavillonnaires », faubourgs, maisons ouvrières) dans la littérature en écologie urbaine, les espaces d'habitats résidentiels individuels étant en outre les *formes urbaines* qui occupent le plus de surface dans la plupart des aires urbaines occidentales (figure 2).

Figure 2 - La surreprésentation des « tissus pavillonnaires » dans les villes occidentales favorise leur inclusion dans les études d'écologie urbaine. Crédit : Apur (2023) La ville pavillonnaire du Grand Paris. Enjeux et perspectives. Atelier Parisien d'Urbanisme : Paris (France). URL : <https://www.apur.org/fr/nos-travaux/ville-pavillonnaire-grand-paris-enjeux-perspectives>

Les *tissus pavillonnaires* représentent 18% de la surface du Grand Paris et jusqu'à 60% dans certaines communes de la métropole (Apur, 2023). De tels chiffres reflètent certainement la réalité de la plupart des agglomérations françaises. Cette prépondérance, ainsi que celle d'autres *tissus urbains* très répandus, biaise l'échantillonnage des *formes urbaines* existantes d'une double façon : d'une part, ces tissus sont plus facilement étudiés de par leur simple fréquence et, d'autre part, ces types de tissus ont moins de chance que d'autres d'être rejetés pour cause de manque de répliques (leur « pool de site » est uniformément important dans nombre de zones urbaines). Naturellement, il n'y a rien de foncièrement critiquable à plus fréquemment étudier les morphologies très communes. Il faut simplement en être conscient et ne pas surinterpréter les résultats qui ressortent de ces études. (Source figure : Apur, 2023).



Au-delà du seul choix du groupe biologique, la façon d'étudier ce groupe a également de lourdes conséquences sur ce qu'il est possible de faire par la suite. Ainsi, les réponses biologiques qui nécessitent de lourds protocoles d'échantillonnage impliquent généralement de ne pouvoir acquérir que de petits échantillons. Plus les échantillons sont petits, et plus il faut **contrôler en amont les facteurs confondants** qui pourraient brouiller les signaux écologiques étudiés. Cela implique donc de mettre en place des stratégies de sélection des sites complexes (e.g. échantillonnages aléatoires stratifiés), comme ce fut le cas dans divers projets, avec des implications non négligeables. Dans le « volet local » de RÉAUMUR, la chronophage évaluation des réseaux plantes-pollinisateurs a limité le nombre de sites qu'il était possible de visiter ce qui, couplé au choix de ne sélectionner que des sites possédant des valeurs comparables en termes de densité et de connectivité (c.-à-d. de *contrôler en amont* pour la densité de bâti et le potentiel d'accès aux ressources) a fortement restreint le nombre de sites potentiels et a *de facto* exclu de nombreuses *formes urbaines* de l'investigation. Dans le « volet national », la procédure de sélection de sites situés à des valeurs moyennes de densité de bâti a conduit à exclure plus de 2000 observations et donc de très nombreux *tissus urbains* de l'analyse (même si, dans ce cas-là, ça n'avait rien à voir avec la complexité de la réponse biologique). Dans TRAM'BIOSOL, non seulement les sites devaient être favorables à la présence des « vers de terre », mais il fallait en plus, pour respecter les hypothèses biologiques de l'étude, qu'ils représentent un contraste de *formes urbaines* en termes de perméabilité aux mouvements lombriciens, conduisant l'équipe à regrouper certains types pour en augmenter les effectifs, et excluant de la sorte de nombreuses zones du territoire d'étude (aussi, seuls quatre types généraux de *formes urbaines* ont été échantillonnés sur les 14 types possibles de sa typologie fine initiale). Même l'équipe BIOREV'AIX, qui partait pourtant avec un « pool » de plus de 5000 sites potentiels, a dû revoir sa stratification d'échantillonnage pour être sûr d'**obtenir suffisamment de réplicas pour chaque type de formes urbaines** étudié. D'ailleurs, les chercheurs indiquaient que l'une des raisons qui les ont poussés à regrouper leurs sites en seulement quatre types de *tissus urbains* était le besoin d'être sûr de trouver suffisamment de réplicas (couplé au fait qu'il peut être difficile d'interpréter morpho-urbanistiquement un très grand nombre de types de *formes urbaines*).

Conséquences liées aux stratégies d'échantillonnage

D'autres choix méthodologiques qui ne sont pas liés aux « contraintes biologiques » peuvent mener à restreindre la gamme de sites ou de *formes urbaines* qu'il est possible d'étudier. Dans le projet FRUGACITÉ, par exemple, le fait de ne s'intéresser qu'aux « quartiers de gare » a certainement restreint ou **biaisé l'espace possible d'échantillonnage**. En effet,

il est probable que l'on ne retrouve pas (ou peu) de gares ferroviaires en plein cœur de zones commerciales ou de grands ensembles. Il est à noter que de manière quelque peu inverse, dans BIOREV'AIX, le fait d'échantillonner des pieds d'arbres plutôt que des haies ou des talus a certainement facilité, dans une certaine mesure, le **maintien du « pool de sites »** à un niveau raisonnable. De fait, on peut théoriquement retrouver des « tronçons de rue » possédant des arbres de rue comparables (en termes de gestion, de composition spécifique, etc.) dans la plupart des *tissus urbains*, alors que les haies se retrouveront plutôt dans les zones résidentielles et seront plus difficilement comparables, du fait de la diversité des propriétaires.

À l'inverse des limitations de la gamme de sites ou de *formes urbaines* échantillonnables, on peut retrouver des **limitations du « pool d'espèces » que l'on peut étudier** émanant du choix *en amont* des sites d'études. Dans les projets MORPHOBIOT ou FRUGACITÉ, où les sites ont été au moins partiellement identifiés avant que les modèles biologiques ne soient choisis, il a fallu s'assurer de choisir des modèles qui peuvent être étudiés dans ces sites (ou qui pourraient l'être compte-tenu de certains scénarios). De manière assez analogue, il faut comprendre que le choix de l'*unité spatiale de référence* (e.g. un *buffer*, un îlot viaire, un quartier – utilisé pour caractériser l'environnement urbain des sites et y recueillir des données biologiques) peut impliquer des contraintes sur le « pool d'espèces ». Par exemple, le fait d'avoir choisi de s'intéresser aux « tronçons de rue » a contraint l'équipe BIOREV'AIX à s'intéresser à **des espèces que l'on peut** échantillonner convenablement dans les rues. Il ne leur aurait pas été possible d'étudier la diversité de n'importe quel taxon. En effet, il aurait été très difficile d'estimer convenablement la diversité d'un groupe biologique qui évite le réseau viaire ou qui y passe le moins de temps possible. L'inverse est d'ailleurs certainement vrai également : on ne pourrait pas étudier correctement une espèce qui se déplace principalement via les arbres d'alignements si l'on échantillonne uniquement le cœur des îlots viaires. En d'autres mots, **le choix de l'unité spatiale de référence ou des sites d'échantillonnage d'une étude peut restreindre le choix des modèles biologiques** qu'il est possible d'étudier. Il s'agit là d'une banalité, mais une banalité dont il faut avoir conscience lorsque l'on conçoit la méthodologie de son projet de recherche.

On l'a vu, le choix du modèle biologique ou la complexité de la réponse biologique peuvent orienter la disponibilité des morphologies ou des sites auxquels on pourrait s'intéresser. **Le choix de la stratégie d'échantillonnage** à proprement parler peut, quant à lui, parfois **expliquer la méthode de description** de la morphologie urbaine. Par exemple, dans

le « volet local » de RÉAUMUR, comme l'idée était d'échantillonner une gamme de configurations possédant des densités bâties comparables, il a fallu adopter une approche basée sur l'analyse de métriques quantitatives puisque les sites sont par nature hétérogènes et donc, difficilement classifiables. En termes statistiques, avec seulement 35 sites et pour une ville moyenne comme Dijon (c.-à-d. ayant un « pool de sites » assez limité), il aurait été compliqué d'identifier des types de *tissus urbains* suffisamment homogènes pour que leur variabilité interne soit plus faible que leurs différences.

Ces contraintes relatives aux « pools de sites » et aux « pools d'espèces » ne sont vraiment pas négligeables puisqu'elles orientent les choix méthodologiques, biaisent les échantillonnages, et de ce fait limitent la diversité des questions de recherche qui peuvent être abordées sur le lien entre morphologie urbaine, biodiversité et fonctionnement écosystémique (cf. partie 4).

Justifications techniques, complexité et contrainte de « réappropriation »

Au-delà de la pertinence d'une approche, il faut rappeler l'évidence qui veut que l'on choisisse aussi des objectifs, des données ou des méthodes, car **nos compétences nous le permettent**. La description fidèle de la morphologie urbaine nécessite d'avoir accès à des informations précises. Dans les **approches qualitatives** ou « **semi-quantitative** », ces informations proviennent souvent (mais pas uniquement) d'observations de terrain ou de l'analyse de documents textuels et cartographiques faisant copieusement appel à **l'expertise et à l'expérience du morphologue**. Une limitation étant que cela implique généralement de ne décrire précisément que peu de sites ou de surfaces. À l'inverse, les **approches quantitatives** tirent avantage de l'informatique pour traiter d'importants volumes de données descriptives (qu'il serait impossible d'analyser qualitativement⁴), permettant ainsi de caractériser rapidement de très nombreux

4 Il faut bien comprendre que, fondamentalement, la seule chose qui diffère entre les approches qualitatives et quantitatives, c'est l'outil de calcul et la forme des résultats. Les deux types d'approches, et tous leurs intermédiaires, font exactement la même chose : analyser des informations provenant de sources diverses pour décrire un espace. L'approche qualitative se fait majoritairement « de tête », en utilisant le raisonnement, l'expérience voire le ressenti de l'opérateur, alors que l'approche quantitative se fait majoritairement avec des outils numériques. Comme le cerveau humain n'est pas capable de traiter aussi bien des données continues qu'un ordinateur, mais peut, contrairement à ce dernier, intégrer des dimensions émotionnelles, l'approche qualitative donne généralement des typologies qui peuvent être « sensibles » alors que l'approche quantitative peut donner des typologies ou des jeux de métriques, mais qui resteront toujours objectivement « froides ».

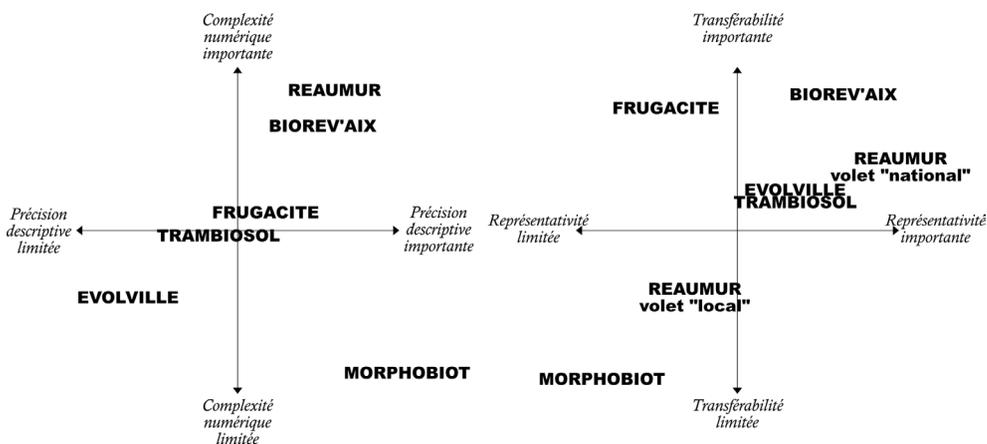
sites ou de vastes surfaces. Cela nécessite cependant d'avoir accès à des **données spatialisées à très haute résolution**, et surtout d'être en mesure de **manipuler de telles données** (cf. partie 3). Générer des modèles d'occupation du sol à la volée sur lesquels ont été calculées des dizaines de métriques pour des centaines de sites aurait été difficile pour l'équipe RÉAUMUR si elle ne comptait dans ses rangs un ingénieur-informaticien. Or toutes les équipes ne peuvent se payer ce luxe, pas plus qu'elles n'ont toutes les capacités ou le temps de décrire et de représenter leurs terrains d'étude de manière aussi fouillée que ce qui a été fait dans MORPHOBIOT (figure 3). Cela dépend naturellement des compétences, des spécialités, mais aussi des priorités de recherche de chaque équipe. Pour tenter de gagner du temps, une solution attirante est d'utiliser certains **outils existants de typomorphologie** quantitative (e.g. Araldi & Fusco, 2019 ; Fleischmann, 2019). Cependant, comme évoqué dans la partie 1, ces outils numériques complexes s'avèrent encore très difficiles à maîtriser, leurs codes ne sont pas toujours facilement disponibles, et plusieurs équipes ont ainsi échoué à se les réapproprier ou craignaient de ne pouvoir les transmettre à leurs partenaires, les incitant à explorer d'autres voies (e.g. FRUGACITÉ, BIOREV'AIX).

À défaut de posséder certaines compétences (ou appétences), on peut alors **nouer des collaborations** pour inclure des partenaires qui disposent de celles-ci. Néanmoins, les recherches de collaboration échouent parfois, avec possiblement de grandes influences sur l'orientation méthodologique des projets. La manière de décrire l'environnement urbain dans le projet ÉVOLVILLE, aurait été différente si une collaboration avec des urbanistes ou des aménageurs avait pu être établie. Les membres de l'équipe ayant souligné leur perplexité face à la **complexité conceptuelle, sémantique et méthodologique** propre à la morphologie urbaine. Dans RÉAUMUR, on retrouve des méthodes numériques complexes qui correspondent aux spécialités des membres de l'équipe, mais, de leur propre aveu, ils auraient certainement adopté des approches différentes s'ils avaient inclus des urbanistes dans leurs rangs. L'idée ici n'est donc pas de dire qu'il faut seulement se cantonner à ce que l'on sait faire, mais qu'il convient de **bien réfléchir aux compétences que l'on sera en mesure de mobiliser** (ou d'acquérir) lorsque l'on se fixe des objectifs de recherche ou que l'on sélectionne des méthodes pour y répondre. Par ailleurs, lorsque l'on analyse un projet de recherche ou un résultat, il faut également garder en tête que ça n'est pas toujours la méthode la plus appropriée qui a été sélectionnée, mais celle qu'il était humainement possible de mettre en œuvre. Cela n'est pas anodin.

Figure 3 - Illustration de la difficulté de regrouper et de classer, les unes par rapport aux autres, les approches descriptives de la morphologie urbaine des projets BAUM. Crédit : FM.Martin (2024).

Il est humain de vouloir comparer des choses, comme des approches descriptives de la *forme urbaine*, par exemple. Pour ce faire, on cherche généralement à opérer des regroupements voire des hiérarchisations. Cependant, c'est un exercice plus délicat qu'il n'y paraît.

On peut « classer » les approches des projets BAUM selon différents critères que l'on estime méthodologiquement pertinents, comme la « précision », la « complexité », la « représentativité » ou la « transférabilité ». Néanmoins, ces termes sont ambigus et s'ils ne sont pas définis explicitement, toute classification selon ces critères se relèverait subjective : en fonction du sens entendu derrière ces mots, la position des projets au sein des axes pourrait varier du tout au tout. En outre, il faut noter que, pour être objective, toute comparaison ou hiérarchisation entre projets doit se faire au regard des objectifs visés et des moyens disponibles.



Outre la difficulté à obtenir et manipuler des données, d'autres raisons plus prosaïques ont souvent influencé la méthodologie des projets BAUM. Ainsi, l'usage de données spatiales a été maintes fois mentionné comme une solution pratique à la **difficulté d'accès aux parcelles privées**. Le fait d'utiliser des **données librement accessibles** et des **méthodes reproductibles** a également été revendiqué par plusieurs équipes (e.g. BIOREV'AIX, FRUGACITÉ, RÉAUMUR). Incidemment, la reproductibilité des protocoles de relevés biologiques était aussi au cœur des préoccupations de TRAM'BIOSOL et ÉVOLVILLE.

AJUSTEMENTS ET IMPRÉVUS

Comme dans bien d'autres domaines, les imprévus sont inhérents à la plupart des programmes de recherche. Plusieurs des projets BAUM l'ont éprouvé, impliquant souvent des contretemps assez importants.

Dans le projet RÉAUMUR, l'idée était initialement d'utiliser les données de sciences participatives Spipoll pour les deux volets du projet, et de caractériser la morphologie à l'échelle de l'îlot viaire afin de se baser sur une *unité spatiale de référence* qui soit parlante pour les urbanistes. Cependant, il est vite devenu évident que ces choix n'auraient pas été judicieux. D'une part, les collections Spipoll pour l'agglomération dijonnaise étaient trop rares et trop groupées (pas suffisamment bien réparties spatialement), ce qui aurait été un **problème pour les analyses statistiques**. L'équipe a donc dû bifurquer sur une laborieuse campagne de terrain pour acquérir ses données biologiques, perdant en temps ce qu'elle gagnait en précision. D'autre part, la distribution des formes et des tailles d'îlots viaires à Dijon et, *a fortiori*, dans la plupart des villes françaises est très irrégulière, générant du MAUP (un problème spatial fréquent qui limite la comparabilité des objets étudiés). En outre, les insectes pollinisateurs étant des animaux volants et très mobiles, il apparaît évident que de nombreux îlots viaires ne représentent pas convenablement l'environnement réellement « vécu » par ces organismes, et donc les facteurs qui influencent leur diversité ou leurs interactions avec la végétation. Le choix a donc été fait de décrire l'environnement de manière circulaire à l'aide de *buffers*.

Comme précédemment évoqué, diverses équipes BAUM ont dû changer de méthode de description des *formes urbaines* du fait d'une trop grande **complexité de réappropriation des méthodes** numériques existantes (e.g. FRUGACITÉ, BIOREV'AIX) ou d'une résolution inadaptée (e.g. ÉVOLVILLE). Certaines équipes ont également été contraintes de procéder à de **chronophages modifications des modèles d'occupation du sol** initiale-

ment utilisés à cause d'une résolution spatiale insuffisante pour correctement localiser les espaces semi-naturels tels que les sols nus (primordiaux pour les abeilles solitaires étudiées dans RÉAUMUR) ou les zones végétalisées (e.g. TRAM'BIOSOL, FRUGACITÉ). Enfin, rappelons qu'un pan entier du projet BIOREV'AIX a dû être abandonné du fait d'un revirement politique, même s'il est vrai que les ramifications de ce revirement ne concernent pas directement la présente synthèse.

**ÉVALUATION A POSTERIORI
DES DÉMARCHES
DESCRIPTIVES ET ÉCUEILS
MÉTHODOLOGIQUES**

Dans la partie 2 de cette *synthèse*, nous avons exploré les raisons qui ont poussé les équipes BAUM à concevoir leurs approches méthodologiques comme elles l'ont fait et, surtout, nous avons analysé les implications qui découlent de ces choix et de leur chronologie. Il s'agissait donc principalement d'une *lecture transversale et extérieure* de la période de conception et de mise en œuvre des méthodologies du programme BAUM. Si ce regard extérieur est intéressant, l'analyse rétrospective des équipes BAUM elles-mêmes l'est également. Dans cette troisième partie, nous allons nous intéresser à l'évaluation que les équipes de recherche font, avec le recul, de leurs propres approches descriptives des morphologies urbaines. Nous passerons en revue les avantages et inconvénients perçus de chaque type d'approche, et nous détaillerons certains des écueils méthodologiques ou conceptuels auxquels les équipes ont été confrontées dans leurs recherches.

AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS PERÇUS DES APPROCHES DESCRIPTIVES

L'approche qualitative de MORPHBIOT

L'approche descriptive employée dans le projet MORPHBIOT, présentée dans la partie 1, n'a aucun équivalent dans le programme BAUM. Largement basée sur des observations de terrain et sur l'expertise des différents membres de l'équipe de recherche, cette approche fait la part belle au dessin et à la représentation simultanée du bâti et du végétal. Pour ces raisons, on la qualifie ici d'approche qualitative.

La plus grande force de l'approche qualitative employée par MORPHBIOT est certainement sa précision de représentation. En incorporant aussi bien des éléments historiques et architecturaux que la diversité de la végétation en trois dimensions, cette approche propose une représentation des « formes bâties-végétales » d'une remarquable finesse. En outre, se plaçant dans une démarche de « recherche-action » chère aux conceptrices qui composent une partie de l'équipe de recherche, l'approche intègre des choix sensibles et subjectifs qui devraient faciliter sa compréhension par les publics visés, notamment les acteurs opérationnels, les étudiants et les habitants. La contrepartie de cette grande précision est sa difficile reproductibilité, du moins comparativement aux approches quantitatives. Le temps et les compétences requises pour reproduire ce travail rendent cette approche difficilement transférable, et sa subjectivité fait qu'elle est impossible à généraliser ou automatiser. D'ailleurs, un seul site par type de *tissu urbain* étudié a été décrit, limitant de ce fait les capacités d'inférence écologique qu'il est possible d'espérer,

mais ça n'est pas vraiment l'objectif principal. Pour reprendre les propres mots de l'équipe MORPHBIOT, il s'agit d'un « travail de recherche qui convenait au développement d'une *culture commune* » de représentation du bâti et de la biodiversité, et de réflexion concernant la prise en compte du vivant dans les documents de planification.

Il faut également souligner que l'approche développée par l'équipe MORPHBIOT se concentre sur le bâti et la végétation, mais n'intègre pas explicitement la configuration spatiale des autres composantes de la *forme urbaine*, telle que les parcelles ou le réseau viaire. Par ailleurs, comme cette approche repose largement sur le dessin et les relevés *in situ*, elle requiert une bonne accessibilité aux terrains d'étude, ce qui peut se révéler problématique dans des tissus résidentiels majoritairement privés (même si l'équipe a souligné que le choix d'étudier les oiseaux a facilité le rapprochement avec les habitants et leur implication).

LES APPROCHES QUANTITATIVES

Les approches que l'on qualifie ici de *quantitatives* regroupent toutes les méthodes de description des *formes urbaines* qui se basent sur l'utilisation de métriques ou d'indices numériques représentant la composition ou la configuration spatiale des paysages et des éléments urbains (e.g. bâtiments, rues, parcelles, espaces semi-naturels). Pour représenter la morphologie des sites étudiés, ces métriques peuvent être utilisées telles quelles, comme ce fut le cas dans le volet « local » de RÉAUMUR, ou elles peuvent être classifiées pour former des typologies, comme dans le volet « national » de RÉAUMUR et dans les projets BIOREV'AIX et ÉVOLVILLE. Malgré cette dénomination, les approches quantitatives ne sont pas dénuées d'interprétations qualitatives. Celles-ci interviennent à différentes étapes des analyses, notamment dans l'évaluation de la signification des regroupements de métriques, mais ne forment cependant pas le socle principal de ce type d'approches.

Ces approches sont assez pratiques car elles sont *modulables*. On peut en tirer des descriptions multivariées extrêmement fines dans lesquelles il est possible de mettre l'accent sur certains éléments particuliers, si ceux-ci sont importants pour le sujet de recherche. En fait, le niveau de détails n'a de limites que la finesse des données sources, ainsi que l'imagination et les compétences techniques de la personne réalisant les calculs. Et tant que les étapes de calculs sont rapportées correctement, ces approches sont parfaitement reproductibles, transférables, et automatisables, permettant la description morphologique de milliers de sites ou de villes entières afin d'identifier des sites comparables, comme ce fut fait dans les projets BIOREV'AIX ou RÉAUMUR.

Dans bien des cas, les *typologies quantitatives* représentent de bons compromis entre précision descriptive, complexité et incarnation (e.g. BIOREV'AIX). En ce sens, elles surpassent notamment les approches utilisant tels quels des *jeux de métriques*, comme dans le volet dijonnais de RÉAUMUR, qui sont très difficiles à se représenter et donc, à communiquer auprès de publics non spécialistes. En revanche, les approches purement métriques permettent de se rapprocher des facteurs qui causent les processus biologiques étudiés puisque l'on peut isoler l'effet de chaque variable alors que les typologies « mélangent » ces effets⁵. En conséquence, ce sont les seules approches qui pourraient nous permettre de faire des prédictions précises quant aux effets individuels de chaque facteur (e.g. prédire l'effet de l'augmentation de la densité de bâti sur la diversité d'un groupe biologique donné, en maintenant les autres paramètres constants par ailleurs). Si de telles prouesses sont théoriquement possibles, en pratique, nous en sommes encore loin, notamment du fait des limites des approches quantitatives.

Comme toutes les approches, les méthodes quantitatives de description des *formes urbaines* souffrent de plusieurs inconvénients. Le principal inconvénient étant que ce sont généralement des approches assez complexes qui nécessitent des compétences techniques non négligeables. Dans certains cas, les géotraitements des données en entrée et les calculs des métriques peuvent être si compliqués qu'ils doivent être réalisés par des géomaticiens ou des informaticiens, comme ce fut le cas dans l'approche utilisée dans le « volet national » de RÉAUMUR. L'usage de nombreuses métriques peut également causer divers problèmes statistiques importants (e.g. multicolinéarité, dimensionnalité) qui nécessitent, ici encore, des compétences particulières pour être adressés de manière adéquate. Une autre limite importante concerne le choix des métriques descriptives. N'importe quel espace urbain peut être décrit par des centaines, voire des milliers, de métriques. Choisir lesquelles inclure pour correctement caractériser les *formes urbaines* de ces sites d'étude n'est vraiment pas évident lorsqu'on n'est pas soi-même morphologue urbain. Et les mé-

5 Par exemple, disons que l'on observe une différence de diversité biologique entre deux types de *formes urbaines* : le « pavillonnaire » et la « zone industrielle ». Dans une approche purement *typologique*, on ne pourra jamais savoir laquelle (ou lesquelles), parmi les très nombreuses variables dont les valeurs moyennes ou médianes diffèrent entre ces deux types (e.g. densité de bâti, hauteur de bâti, espacement entre les bâtiments, densité de rues, taille des parcelles, gestion, proportion ou configuration de tel ou tel type de végétation, etc.), est celle qui est « responsable* » de cette différence de diversité biologique. Alors qu'une approche purement métrique pourrait tester l'effet de chaque variable (*métrique*) seule, ou en combinaison.

* = Notons que, statistiquement, il est très difficile d'attribuer des liens de « causalité ».

triques les plus morphologiquement pertinentes ne sont pas forcément celles qui sont les plus écologiquement pertinentes, d'où l'orientation biocentrique finalement adoptée par l'équipe ÉVOLVILLE.

LES APPROCHES « SEMI-QUANTITATIVES »

Nous qualifions ici d'approches « semi-quantitatives » les méthodes qui sont basées sur le recoupement de bases de données spatialisées (e.g. documents de planification, couches SIG, classifications existantes) pour aboutir à de nouvelles typologies. Si ces approches utilisent, au moins en partie, les mêmes données sources que les approches quantitatives, leurs critères de classification des espaces sont au moins partiellement basés sur l'interprétation *qualitative* des personnes les utilisant plutôt que reposant uniquement sur de complexes géotraitements ou le *clustering* de métriques spatiales descriptives. Les méthodologies des projets TRAM'BIO-SOL et FRUGACITÉ relèvent de ce genre d'approches.

La grande force de ces approches « semi-quantitatives » semble être leur relative simplicité. En se basant sur des données publiques librement accessibles, les équipes TRAM'BIO-SOL et FRUGACITÉ ont pu concevoir des typologies urbaines couvrant des étendues relativement importantes, et ce, de manière relativement simple et conforme à leurs besoins. Dans le cas de FRUGACITÉ, les enrichissements architecturaux apportés à la base de données des TUF (*Tissus Urbains Franciliens* ; cf. partie 1) ont en outre permis, d'une certaine manière, d'intégrer une part de verticalité à une typologie qui, autrement, écrase l'environnement en deux dimensions et reflète donc mal la perméabilité réelle du *tissu urbain* au déplacement des espèces qui y vivent. Ces approches semblent ainsi proposer un compromis intéressant entre pertinence descriptive et facilité de mise en œuvre puisqu'elles nécessitent moins de compétences techniques que les approches purement quantitatives et moins d'expertise urbanistique que les approches purement qualitatives. Cependant, pour être reproductibles et donc, réutilisables par des publics tiers, les critères de recoupement et d'agrégation des données sources doivent être explicitement rapportés, ce qui n'est pas toujours le cas. Par ailleurs, l'utilisation sans retraitement d'informations géographiques variées dont la vocation initiale est plutôt anthropocentrique, tels que les TUF ou la BD TOPO®, mène à des typologies dont certains des « types » reflètent l'usage ou la fonction des sols et des bâtiments, ce qui n'est souvent pas pertinent écologiquement ni même morphologiquement (e.g. une surface qualifiée « d'équipement » ne donne que peu d'indications sur sa morphologie et donc sur la réalité biophysique à laquelle sont confrontés les taxons qui y vivent ou s'y dé-

placent). Cela peut causer problème selon la réponse biologique considérée et nécessiter des retraitements manuels, comme ce fut le cas dans FRUGACITÉ.

Il est important de souligner que les avantages et inconvénients détaillés ici ne proviennent que des entretiens semi-directifs conduits auprès des équipes BAUM. Ce tour d'horizon ne représente donc ni l'ensemble des qualités et défauts des approches utilisées ni toute la diversité des méthodes descriptives existantes. Enfin, il faut garder en tête que la description de la morphologie urbaine n'est qu'une étape méthodologique parmi d'autres dans les projets du programme BAUM. Ces autres étapes (e.g. sélection des sites et des modèles biologiques, analyses statistiques) comportent elles aussi leur lot d'avantages, d'inconvénients et de conséquences, comme abordé dans la partie 2.

DIFFICULTÉS RENCONTRÉES DANS LES PROJETS BAUM

Problèmes méthodologiques généraux

Comme tout projet de recherche, les projets BAUM ont rencontré différentes difficultés au cours de leur déroulement. Ici, nous allons nous attarder sur certaines de ces difficultés qui ont eu des conséquences notables sur la conception méthodologique des projets, leurs mises en œuvre, ou même leurs résultats.

Plusieurs projets ont fait état de difficultés d'ordre organisationnel ou logistique. Par exemple, diverses équipes ont mis en avant les démarches supplémentaires nécessaires pour garantir l'**accessibilité aux parcelles privées** des zones d'étude (e.g. MORPHOBIOT, RÉAUMUR). L'équipe RÉAUMUR a même dû abandonner un site à la suite de l'intervention des gendarmes, appelés par des voisins inquiets. Une **mauvaise coordination avec les services de gestion des espaces verts** a également causé du souci aux équipes RÉAUMUR et BIOREV'AIX, puisque des fauches imprévues ont contrarié certains relevés de végétation. Comme discuté dans la partie 2 de cette synthèse, la plupart des équipes ont aussi dû composer avec des **contraintes liées au « pool d'espèces » ou au « pool de site »**, compliquant le choix des modèles biologiques, la sélection des sites d'étude, et biaisant souvent l'échantillonnage des *formes urbaines* en faveur de certaines morphologies courantes.

Une autre série de problèmes fréquemment mentionnée porte sur l'accessibilité et la qualité des données. Certaines équipes ont ainsi souligné la **résolution souvent trop grossière des données de localisation des es-**

paces semi-naturels en ville, notamment des surfaces végétalisées (e.g. FRUGACITÉ, BIOREV'AIX). Les modèles d'occupation des sols courants offrent en effet des résolutions spatiales assez moyennes, ignorant de ce fait de nombreuses surfaces végétalisées ou minimisant leurs surfaces. C'est d'ailleurs pour cette raison que l'équipe RÉAUMUR a construit sa propre couche d'occupation du sol. Les **données de pollution ou de fréquentation** des rues ou des espaces verts sont également très difficiles à obtenir, comme l'ont constaté les équipes BIOREV'AIX et RÉAUMUR.

Écueils liés à la nature transdisciplinaire du programme BAUM

Mener des projets de recherche pluridisciplinaires, voire transdisciplinaires, n'est jamais simple. Si les membres des équipes BAUM ont naturellement fait des efforts pour tâcher de s'entendre et de s'accorder, cela s'est rarement fait sans heurt.

Une première difficulté majeure à laquelle ont été confrontées les équipes est celle de la **confusion** qui existe **autour des termes et concepts liés aux formes urbaines**. En effet, malgré le fait que la « morphologie urbaine » soit une discipline en soi et en dépit de l'usage très fréquent des termes et concepts qui s'y rattachent dans la plupart des disciplines de sciences humaines, économiques et sociales s'intéressant aux zones urbaines, ceux-ci ne semblent pas posséder de définitions consensuelles. En fonction des disciplines ou des métiers, les mêmes termes peuvent ainsi désigner des choses ou des échelles différentes. À cet égard, il est amusant de noter que, lors des entretiens, aucune des six équipes n'a donné la même définition de ce que sont les « formes urbaines » ou les « tissus urbains »⁶. Si ce manque de cadrage sémantique et conceptuel n'a pas été synonyme de difficultés pour toutes les équipes, cela a tout de même occasionné divers problèmes qui ont contraint la conception de certains projets (e.g. RÉAUMUR, ÉVOLVILLE, MORPHOBIOT). Tout d'abord, cela a généré une confusion non négligeable pour divers membres des équipes BAUM, notamment pour la plupart des écologues, les biologistes étant généralement peu familiers avec la notion même de « formes urbaines ». Le besoin de dissiper les incompréhensions a ainsi rallongé les échanges, et compliqué la définition des questions de recherche ou les choix méthodologiques. Avec du recul, plusieurs équipes ont d'ailleurs estimé qu'il aurait pu être opportun de faire ce travail de clarification sémantique et

6 Exploitant cette ambiguïté, la présente synthèse utilise les termes de « forme urbaine », « tissu urbain », et de « morphologie urbaine » comme étant synonymes et interchangeables.

conceptuel en amont, collectivement au sein de BAUM. Certains sont même allés jusqu'à suggérer qu'au vu de la nouveauté et de la complexité de la thématique, des moments de réflexion inter-équipes auraient dû être obligatoires. Ensuite, le manque de consistance terminologique ou méthodologique en « morphologie urbaine » a rendu difficile le **ciblage des recherches bibliographiques sur les outils de description** des *formes urbaines*, comme l'ont rapporté les équipes FRUGACITÉ, BIOREV'AIX ou RÉAUMUR. Il existe en effet des milliers de références sur le sujet et il n'est donc pas aisé de s'y retrouver et de choisir les méthodes et données adaptées à ses besoins. Cette difficulté s'ajoute ainsi à la complexité de réutilisation des méthodes modernes de morphométrie quantitative, comme déjà discuté précédemment (cf. parties 1 et 2).

Si la collaboration interdisciplinaire ou entre partenaires exerçant des métiers différents a été l'une des richesses du programme BAUM, elle a aussi pu être parfois compliquée. De fait, il n'est pas toujours simple de **concilier les aspirations** de tout le monde. Il faut parvenir à un **compromis** qui génère forcément quelques frustrations quant à l'orientation des questions de recherche, au choix des méthodes ou des échelles d'étude, comme l'ont souligné les membres de BIOREV'AIX. Une chercheuse de TRAM'BIOSOL notait aussi que le « besoin de concevoir » des architectes n'est pas toujours facilement conciliable avec des recherches fondamentales portant sur des processus biologiques. Le risque étant de finir par mener des études cloisonnées au sein même des projets, rendant difficile l'assemblage d'un tout cohérent et facilement communicable auprès de publics tiers. En outre, tous les partenaires BAUM ne partagent pas les mêmes **temporalités** ou les mêmes **cultures professionnelles**, nécessitant ici aussi des ajustements. L'équipe MORPHOBIOT indiquait par exemple que le bureau d'étude naturaliste avec lequel elle a collaboré, missionné sur un nombre de jours limité, avait peu de flexibilité temporelle pour entrer dans un processus d'ajustement autour des questions de recherche (qui plus est en mobilisant une approche qualitative à laquelle les naturalistes ont dû s'accoutumer). Les membres de FRUGACITÉ ont dû revoir les ambitions d'un outil qu'ils développent car leur exigence scientifique s'accordait mal avec l'immédiateté des besoins de leurs partenaires de l'AREP. Ils ont aussi passé du temps à comprendre la culture d'entreprise de l'AREP et constatent des différences de cultures de travail entre leurs métiers. D'une manière assez analogue, l'équipe ÉVOLVILLE regrettait la difficulté à impliquer les élus de Strasbourg dans la conservation des surfaces herbacées de la métropole, du fait d'une priorité donnée à la plantation d'arbres dans les politiques de la ville (biais également constaté dans le projet BIOREV'AIX). Enfin, l'équipe aixoise déplorait quant à elle que **la temporalité de la recherche ne s'accorde jamais avec celle de la**

politique, contraignant moyens et résultats et contrariant les ambitions de chacun. Rappelons ici aussi la regrettable volatilité des orientations politiques qui peut, en un instant, compromettre des pans entiers de recherche, avec toutes les conséquences que cela peut avoir sur la motivation des chercheurs, comme en l'a éprouvé l'équipe BIOREV'AIX.

REMARQUES CONCLUSIVES

On l'a vu tout au long de cette synthèse analytique, la thématique d'étude des liens entre *formes urbaines*, densité et biodiversité (ou fonctionnements écosystémiques) est vaste, compliquée, et encore balbutiante par bien des aspects. Elle est aussi tout à fait passionnante et parfaitement d'actualité. Le programme BAUM a, par sa grande diversité, ses moyens et l'énergie de ses partenaires, initié un important travail pour « débroussailler » différentes facettes de cette thématique. En plus de leurs résultats écologiques (qui ne sont pas abordés ici), les six projets BAUM ont ainsi contribué à produire des enseignements méthodologiques ou conceptuels importants et bienvenus pour l'approfondissement de ce champ de recherche. À son tour, la présente synthèse a humblement tenté d'enrichir ces contributions en mettant en lumière certains avantages des approches utilisées, mais aussi certaines limitations ou contraintes auxquelles les équipes ont dû se confronter, dans l'espoir d'aider au perfectionnement des questions et des outils de recherche dans le futur. Dans cette partie conclusive, nous allons maintenant revenir sur certaines de ces contributions importantes, ainsi que sur quelques perspectives de recherche et d'amélioration.

ENSEIGNEMENTS MÉTHODOLOGIQUES IMPORTANTS

Plusieurs des projets BAUM ont apporté des nouveautés méthodologiques ou conceptuelles qui devraient être rapidement intégrables dans les démarches de recherche ou de conception urbanistique. Les réflexions transdisciplinaires de l'équipe MORPHOBIOT sur la **prise en compte et la représentation du vivant dans les documents de planification** pourraient aider à faire évoluer les pratiques d'aménagement des quartiers et faciliter la conservation des espaces semi-naturels existants. Le concept même de « formes bâties-végétales » comme possible nouvelle « unité de conception » ouvre également de nouvelles pistes d'investigations sur le lien entre *formes urbaines* et biodiversité. D'une certaine manière, cela va dans le sens des résultats de l'équipe BIOREV'AIX qui a confirmé la **pertinence de l'utilisation des « tronçons de rue »** comme *unité spatiale structurelle* pour décrire la morphologie des villes (sous réserve de décrire les pourtours de manière suffisamment large pour ne pas ignorer ce qui existe dans le cœur des îlots viaires). L'équipe propose également une « grille de lecture par frontage » qui pourrait faciliter la représentation des « zones composites » (tissus urbains hétérogènes) qui, pour l'instant, rentrent mal dans les typologies classiques. De TRAM'BIO SOL, il ressort une **démarche de localisation et de caractérisation des sols de la trame brune** (habitabilité, continuité) pour l'élaboration de documents d'urbanisme, comportant à la fois un protocole d'échantillonnage facilement

compréhensible et réutilisable sur le terrain, des bonnes pratiques pour restaurer les continuités du sol, et des pistes d'intégration réglementaire. L'équipe souligne cependant que l'étude de la *trame brune* ne peut se faire à n'importe quelle échelle ou dans n'importe quel milieu (on retrouve donc un lien avec la problématique du « pool de site », cf. ci-dessous), cette trame n'étant semble-t-il pertinente qu'à l'échelle du quartier et pour les « espaces en transition » ayant été urbanisés relativement récemment. L'équipe FRUGACITE, quant à elle, propose une **méthode de caractérisation des continuités écologiques** tenant compte des *formes urbaines* qui est librement transférable et donc remobilisable par les maîtres d'œuvre de l'AREP. L'équipe RÉAUMUR souligne l'importance de maintenir un certain contrôle sur la complexité de son dispositif lorsque l'on souhaite interagir avec un large public. En effet, cette équipe a pu éprouver les limites de la communication scientifique du fait de la double complexité de ses réponses biologiques (e.g. indices d'interaction plante-pollinisateurs, richesse en familles entomologiques) et de son approche descriptive (basée sur des métriques de *formes urbaines*) qu'il est difficile d'incarner. Enfin, les travaux de l'équipe EVOLVILLE ont permis de sensibiliser les élus de l'Eurométropole de Strasbourg qui a incurvé sa politique de gestion des espaces naturels en adoptant un « plan prairies », afin de ne plus négliger les considérations écologiques dans la gestion de ces espaces multifonctionnels.

Un autre enseignement important qui rejaillit indirectement de tous ces projets est la **difficulté à prendre explicitement en compte la configuration spatiale des éléments constitutifs de la morphologie urbaine** (e.g. bâti, rues, parcelles, espaces semi-naturels). Dans les typologies de *formes urbaines*, la configuration est souvent implicite : par exemple, lorsque l'on évoque un quartier « pavillonnaire » ou « haussmannien », tout le monde parvient à visualiser une certaine disposition du bâti. Sans plus de précisions, une telle représentation implicite trouve cependant vite ses limites. D'une part, des qualificatifs aussi vagues ne permettent pas de savoir quel est l'arrangement spatial des éléments autres que le bâti (e.g. le réseau viaire représente-t-il une grille régulière ou une arborescence ? Les îlots sont-ils grands ou petits ? Comment les parcelles sont-elles disposées ? La végétation est-elle sur le front de rue ou à l'intérieur des îlots ? Etc.). Il existe en réalité une **multitude de sous-catégories pour n'importe quel « type » de tissu urbain**, en fonction des variations de configuration des éléments qui le composent, qu'il n'est pas possible de représenter correctement avec des dénominations trop simples. D'autre part, il existe de nombreux types de *tissus urbains* pour lesquels il est pratiquement impossible de visualiser une configuration précise sur la seule base de leur nom : e.g. les « habitats collectifs », que l'on retrouve dans différents pro-

jets BAUM, peuvent représenter aussi bien des tours, que des barres, que des bâtiments aux formes plus complexes. Dans ces conditions, il est très difficile de savoir de quoi l'on parle exactement et de s'assurer de la comparabilité des sites d'étude (figure 4) ! L'un des **avantages des approches descriptives basées sur des métriques est la possibilité d'inclure des indicateurs configurationnels**, comme dans RÉAUMUR (table 1). Cependant, pour obtenir une description non ambiguë de la configuration morphologique des sites, de nombreuses métriques différentes doivent être utilisées (e.g. métriques d'espacement, de densité, d'orientation), compliquant d'autant les analyses statistiques ou la communication. En outre, comme souligné dans la partie 3, il n'est vraiment pas simple de savoir exactement combien de métriques inclure ni lesquelles choisir. En conséquence, il faut avoir conscience que la prise en compte de la configuration urbaine est une question épineuse qui concerne toutes les disciplines effectuant des comparaisons intraurbaines ou interurbaines.

Figure 4 – Illustration de la diversité des configurations spatiales des espaces urbains français. Crédit : FM.Martin (2023), IGN (2021).

Les sept colonnes représentent sept types de *tissus urbains* que l'on pourrait retrouver dans la littérature. Les lignes représentent cependant trois sous-catégories de ces *tissus urbains*, présentant des densités de bâti croissantes et des configurations spatiales de leurs éléments variant selon différents axes (e.g. disposition des bâtiments, densité du réseau viaire, orientation des rues ou forme des îlots). Ces différentes sous-catégories reflètent des réalités et, donc, des conditions environnementales bien différentes pour les espèces qui y vivent ou qui s'y déplacent. Si, dans certains cas, ces différences n'auront que peu d'impacts sur le(s) groupe(s) biologique(s) étudié(s), on peut légitimement se demander si, dans d'autres cas, des sites échantillonnés dans ces différentes sous-catégories seraient réellement comparables.

Comme dans la figure 1, les noms donnés à ces *tissus urbains* sont tout à fait subjectifs (les adjectifs « central » et « frontal » des types d'habitats individuels font référence à la position des maisons au sein des parcelles).



D'autres enseignements méthodologiques pertinents se dessinent au travers de l'analyse des contraintes auxquelles ont été soumis les projets BAUM ou des limites que les équipes ont rencontrées. Premièrement, il est primordial de garder en tête **les effets que les choix de conception peuvent avoir sur les « pools d'espèces » et les « pools de sites »** et donc, en conséquence, sur les *formes urbaines* qu'il sera réellement possible d'étudier (cf. partie 2 et section « perspectives » ci-dessous). Les biais potentiels de représentativité induits par ces considérations ne devraient effectivement pas être sous-estimés. Deuxièmement, on ne rappellera jamais assez l'importance de **contrôler l'effet des potentiels facteurs confondants** (e.g. pollutions, perturbations, microclimat, disponibilité des ressources) lorsque l'on étudie des réponses biologiques dans des milieux aussi hétérogènes que les villes. Cela peut se faire en amont, grâce à une rigoureuse procédure de sélection de groupes de *sites comparables* (c.-à-d. que les groupes ne doivent différer que sur les axes d'intérêts de l'étude)⁷, en aval, grâce à des ajustements statistiques (comme l'inclusion de *variables de contrôle* dans les modèles statistiques ou, à défaut, par partitionnement des données et analyses conditionnelles) ou, le plus souvent, en faisant un petit peu des deux. Troisièmement, un soin particulier doit être mis dans le **choix des données utilisées** (en termes de résolution et de qualité de représentation) **et de la méthode de description des formes urbaines** sélectionnée pour que celles-ci correspondent bien aux objectifs recherchés et aux compétences des analystes. Que les approches soient purement qualitatives, quantitatives, ou qu'elles soient « semi-quantitatives », il y a généralement un compromis à trouver entre la qualité de représentation et la quantité de répliques qu'il est possible d'avoir si l'on souhaite pouvoir tirer des inférences écologiques fiables. Tous les aspects mentionnés ici, et d'autres, doivent être considérés avec attention pour éviter les fausses pistes, les conclusions hâtives et la surinterprétation des résultats.

PERSPECTIVES ÉMERGENTES

Si l'on souhaite progresser sur les voies menant à l'amélioration de l'habitabilité écologique des *tissus urbains* existants, à l'augmentation de la

7 On pourra regretter que ces *axes d'intérêts* soient rarement explicites dans les études urbaines, dans BAUM ou ailleurs. Bien souvent, on compare des types de *formes urbaines* sans préciser ce qui les distingue concrètement ou quelles hypothèses biologiques sous-tendent ces comparaisons. On reste ainsi dans le domaine de l'*exploratoire*, ce qui est normal sur une thématique aussi récente où il y a peu de bases sur lesquelles construire des hypothèses formelles. Cependant, c'est un aspect qu'il conviendra d'améliorer pour tester des prédictions plus précises et donc, générer des connaissances réellement transférables pour des applications opérationnelles.

fourniture de services écosystémiques pour les populations citadines et, conjointement, à la limitation de l'étalement urbain, de nombreux défis restent à relever. De fait, il va falloir intensifier les efforts de recherche sur le sujet, répéter les observations pour confirmer la véracité des patrons de réponses mis en évidence jusqu'ici et, en temps voulu, progressivement déplacer le curseur des études exploratoires vers des protocoles de *recherche inférentielle* testant des hypothèses plus précises. Adresser les perspectives qui émergent de l'analyse des projets BAUM constitue déjà certainement un premier pas vers l'accomplissement de ces objectifs.

On l'a vu en partie 2, les choix méthodologiques de conception des projets ou l'ordre dans lequel ces choix sont faits peuvent avoir des conséquences importantes sur les « pools d'espèces », les « pools de sites » et, donc sur les *formes urbaines* qu'il sera possible d'étudier. Il n'y a aucun problème à se restreindre à comparer la diversité d'un groupe biologique particulier dans les 4-5 types de *tissus urbains* les plus courants si tant est que ce soit l'objectif qui est effectivement recherché. En revanche, si l'objectif « en creux » est d'identifier des configurations urbaines qui correspondent aux **meilleurs compromis entre densité « d'espaces de vie »** (e.g. habitations, bureaux) **et « performances » écologiques, environnementales et socio-économiques**, comme ce semble être actuellement le cas pour nombre d'acteurs en France et dans le monde, alors on ne peut pas continuer à étudier les mêmes *tissus urbains* sous prétexte qu'ils sont les plus fréquents. En succombant à ces biais et donc en échantillonnant toujours les mêmes tissus, on n'échantillonne qu'une partie restreinte de la gamme possible des combinaisons de composition-configuration, rendant impossible l'établissement de conclusions robustes sur les effets écologiques des facteurs qui sous-tendent les morphologies (e.g. densités, dimensions, espacements). En d'autres mots, on ne peut conclure sur « l'effet (général) des *formes urbaines* » si l'on n'échantillonne pas toutes les *formes urbaines* de manière équilibrée. Et l'on n'identifiera jamais la « *forme urbaine* idéale »⁸ si l'on exclut systématiquement des tas de configurations urbaines originales qui offrent peut-être des compromis morpho-fonctionnels intéressants. S'il est tout à fait compréhensible de commencer par l'étude des formes les plus fréquentes, il va cependant falloir, pour aller plus loin, établir des protocoles d'échantillonnages ciblés des nombreuses *formes urbaines* encore sous-étudiées.

Les projets BAUM ont amplement démontré la diversité des approches possibles pour décrire les *formes urbaines*, sans pour autant en faire le

8 Terme amusant et révélateur qui est ressorti plusieurs fois lors des échanges avec les équipes BAUM, sans qu'il soit pour autant explicitement défini.

tour. Alors que plusieurs méthodes quantitatives modernes se sont révélées être difficilement réappropriables (cf. partie 1 et 2), les équipes BAUM ont fait preuve d'ingéniosité pour passer outre cet écueil et développer leurs propres méthodes de caractérisation ou de classification morphologique. Cette adaptation admirable soulève tout de même des questions qui ouvrent sur des perspectives qu'il serait opportun d'explorer. Tout d'abord, on peut naturellement s'interroger sur la difficulté même de réutiliser les méthodes morphométriques modernes. Il est assez regrettable de proposer des méthodes élaborées pour une tâche si leur complexité les rend inutilisables par les publics qui en auraient l'utilité. À moins qu'il n'y ait des raisons explicites pour le faire, il semble assez inefficace de **devoir réinventer de nouvelles méthodes descriptives à chaque projet** de recherche. Par ailleurs, si chaque équipe développe sa propre méthode basée sur ses propres variables (ou variantes des mêmes variables), on peut légitimement se demander si l'on ne risque pas de **limiter la comparabilité et la reproductibilité des résultats**. En conséquence, il existe certainement des **opportunités pour le développement d'outils descriptifs harmonisés et simplifiés**, utilisables par le plus grand nombre. Il conviendra notamment de mieux préciser les métriques pertinentes pour décrire fidèlement les *tissus urbains*, et **d'améliorer la prise en compte de la configuration spatiale des éléments urbains**, comme l'ont justement suggéré des membres des équipes MORPHOBIOT, RÉAUMUR ou FRUGACITE. Sans prétendre répondre à tous les besoins, de tels outils faciliteraient certainement l'essor de la thématique de recherche des « effets écologiques des *formes urbaines* ».

De nombreux autres aspects abordés ou effleurés tout au long de cette synthèse mériteraient qu'on leur prête une attention particulière. En lien avec le paragraphe précédent, des **gains en termes de reproductibilité et de transférabilité des méthodes** seraient souhaitables. Il est amusant de noter qu'alors que plusieurs équipes BAUM se félicitent de la reproductibilité de leur protocole de relevés écologiques, les protocoles de descriptions urbanistiques ne bénéficient pas toujours du même degré d'exigence. Notons également que le projet BIOREV'AIX a été le seul à avoir **validé sa typologie de *tissus urbains***. Cela n'est pas totalement surprenant dans la mesure où la littérature en morphologie urbaine semble accorder plus de place aux méthodes de classification urbanistique qu'aux évaluations de la validité de ces classifications. Toutefois, il semble raisonnable d'espérer des progrès de ce côté-là. Similairement, des progrès sont clairement atteignables dans **la prise en compte du MAUP ou des nombreux facteurs confondants** qui affaiblissent la fiabilité des résultats éco-urbanistiques actuels. En effet, même si cela dépasse le cadre de cette synthèse, il semble important de souligner que de nombreuses équipes de recherche en éco-

logie urbaine sont visiblement mal à l'aise avec la complexité et la dimensionnalité de leurs jeux de données et emploient, en guise d'analyse, des **approches statistiques trop rudimentaires, voire complètement inadaptées**. Plus que des perspectives de recherche, il y a là d'énormes opportunités de formation et de collaboration interdisciplinaire.

Une dernière perspective qu'il semble essentiel d'aborder ici est la nécessaire réflexion à avoir sur les façons de **mettre en pratique les avancées méthodologiques ou conceptuelles** issues du programme BAUM. Si les résultats de différentes recherches abordées ici ont vocation à être intégrées à plus ou moins longue échéance dans les travaux de conception, de planification ou dans la réglementation, les solutions concrètes pour y parvenir doivent encore à être explorées et précisées. Nul doute que certaines équipes BAUM comptent déjà s'y atteler.

RÉFÉRENCES CITÉES

- Apur (2023) *La ville pavillonnaire du Grand Paris. Enjeux et perspectives*. Atelier Parisien d'Urbanisme : Paris (France). URL : <https://www.apur.org/fr/nos-travaux/ville-pavillonnaire-grand-paris-enjeux-perspectives>
- 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), pp. 1243-1263. Doi : 10.1177/2399808319832612.
- Arantes L., Marry S., Baverel O., et al. (2016) 'Efficacité énergétique et formes urbaines : élaboration d'un outil d'optimisation morpho-énergétique,' *Cybergeo: European Journal of Geography*, 777. Doi : 10.4000/cybergeo.27584.
- Auvray A., Le Bot N., Sahraoui Y., et al. (2025) *Frugacité, Formes urbaines des quartiers de gare ou à fortes contraintes et biodiversité*. Éditions PUCA: Paris (France), p. 110. URL : <https://www.urbanisme-puca.gouv.fr/cahier-frugacite-formes-urbaines-des-quartiers-de-a2962.html>
- Beninde J., Veith M., & Hochkirch A. (2015) 'Biodiversity in cities needs space: a meta-analysis of factors determining intra-urban biodiversity variation,' *Ecology Letters*, 18(6), pp. 581-92. Doi : 10.1111/ele.12427.
- Consalès J.-N., Albert C., Bertaudière-Montès V., et al. (2025) *Biorev'Aix, Biodiversité et réseau viaire à Aix-en-Provence. Interroger la morphologie urbaine à travers l'écologie du tronçon de rue*. Éditions PUCA: Paris (France), p. 98. URL : <https://www.urbanisme-puca.gouv.fr/cahier-biorev-aix-biodiversite-et-reseau-viaire-a-a2964.html>
- Flégeau M. (2020) *Formes urbaines et biodiversité. Un état des connaissances*. PUCA (Plan, Urbanisme, Construction, Architecture) : Paris, France (Réflexions en partage). URL : <https://www.urbanisme-puca.gouv.fr/formes-urbaines-et-biodiversite-un-etat-des-a2156.html>
- Fleischmann M. (2019) 'mompey: Urban morphology measuring toolkit,' *Journal of Open Source Software*, 4(43), p. 1807. Doi: 10.21105/joss.01807.
- Foltête JC., Ropars L., Martin FM., et al. (2024) *Réponses écologiques aux morphologies urbaines*. Éditions PUCA : Paris (France), p. 88. URL : <https://www.urbanisme-puca.gouv.fr/cahier-reponses-ecologiques-aux-morphologies-a2888.html>
- Hardion L., Muratet A., Sotillo A., et al. (2024) *ÉVOLVILLE, l'évolution s'invite en ville - Réponses des plantes aux gradients environnementaux urbains*. Éditions PUCA : Paris (France), p. 80. URL : <https://www.urbanisme-puca.gouv.fr/cahier-evolville-l-evolution-s-invite-en-ville-a2897.html>

Lagesse C., Bonnin P., Bordin P., *et al.* (2016) 'Méthodologie de modélisation et de caractérisation des réseaux spatiaux. Application au réseau viaire de Paris', *Flux*, 105(3), pp. 33–49. Doi : 10.3917/flux.105.0033.

Leger-Smith A., Péré A., & Marco A. (2025) *Morphobiot, Formes urbaines au prisme du vivant. Cinq quartiers résidentiels toulousains*. Éditions PUCA: Paris (France), p. 50. URL : https://www.urbanisme-puca.gouv.fr/biodiversite-amenagement-urbain-et-morphologie-a1586.html#H_Les-six-recherches-engagees.

Maréchal J., Marié X., Cluzeau D., *et al.* (2025) *TRAM'BIOSOL - Intégration de la trame brune des sols dans les programmes d'aménagement urbain*. Éditions PUCA : Paris (France), p. 118. URL : <https://www.urbanisme-puca.gouv.fr/cahier-tram-biosol-a2932.html>

Moll R.J., Cepek J.D., Lorch P.D., *et al.* (2019) 'What does urbanization actually mean? A framework for urban metrics in wildlife research', *Journal of Applied Ecology*, 56(5), pp. 1289–1300. Doi : 10.1111/1365-2664.13358.

Norton B.A., Evans K.L., & Warren P.H. (2016) 'Urban biodiversity and landscape ecology: Patterns, processes and planning', *Current Landscape Ecology Reports*, 1(4), pp. 178–192. Doi : 10.1007/s40823-016-0018-5.

Tratalos J., Fuller R.A., Warren P.H., *et al.* (2007) 'Urban form, biodiversity potential and ecosystem services', *Landscape and Urban Planning*, 83(4), pp. 308–317. Doi : 10.1016/j.landurbplan.2007.05.003.

United Nations (2019) *World urbanization prospects - The 2018 revision*. UN Department of Economic and Social Affairs. Population Division : New York (USA), p. 126.

Watkin Y., Delaville D., & Dugué R. (2020) *Les tissus urbains franciliens (TUF). Note méthodologique*. Institut Paris Région : Paris (France), p. 24. URL : <https://www.institutparisregion.fr/tissus-urbains-franciliens-tuf/>

BIOGRAPHIE DE L'AUTEUR

François-Marie Martin est écologue-biogéographe, enseignant-chercheur contractuel à l'Institut d'Urbanisme et de Géographie Alpine de l'Université Grenoble Alpes, et ancien postdoctorant à l'INRAe ainsi qu'à l'Université de Franche-Comté. Ses recherches portent sur l'étude des patrons spatiotemporels de la biodiversité native ou exotique, des processus écologiques qui y sont associés, et de leurs conséquences sur le fonctionnement des socio-écosystèmes le long de gradients environnementaux abrupts, qu'ils soient urbains, ripariens ou altitudinaux. De la montagne à la ville, ses travaux mobilisent des méthodologies variées, aussi bien quantitatives (e.g. modélisation spatiale, statistique, télédétection) que qualitatives (e.g. entretiens, synthèses bibliographiques), et cherchent souvent à promouvoir la collaboration interdisciplinaire dans l'étude du vivant.

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





GOUVERNEMENT

*Liberté
Égalité
Fraternité*

PUCA

plan
urbanisme
construction
architecture

Confrontés au double enjeu de la mitigation des impacts négatifs de l'urbanisation et celui de l'adaptation des systèmes urbains aux changements globaux, les concepteurs et décideurs de la ville ont besoin de connaissances robustes quant aux liens existants entre biodiversité, services écosystémiques, densités et formes urbaines. C'est à cette fin qu'ont été initiés les six projets du programme « Biodiversité, Aménagement Urbain et Morphologie » (BAUM), dont le présent ouvrage est une synthèse méthodologique. Plus qu'un simple résumé, cette synthèse propose une analyse transversale épistémologique des approches et outils de description des formes urbaines employés dans le programme afin d'en identifier les aspects remarquables ou problématiques qui amélioreraient la compréhension de ces projets ou faciliteraient le développement de nouvelles recherches dans cette thématique encore balbutiante. En somme, apprendre des recherches passées pour mieux prévoir les recherches futures.

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

