

Nature en ville : un démonstrateur de transition écologique

Enjeux de recherche et d'innovation liés au développement de la nature en ville

anRT
ASSOCIATION NATIONALE
RECHERCHE TECHNOLOGIE

 **FUTURIS**

DÉCEMBRE / 2024

LES CAHIERS FUTURIS

Groupe de travail *Transition écologique – Ville durable*

Président : Michael Matlosz – Professeur à l'Université de Lorraine – Membre de l'Académie des technologies

Auteur : Nadège Bouquin – ANRT

Conseillère scientifique : Anne Ruas – Université Gustave Eiffel

Directrice de publication : Clarisse Angelier – ANRT

Nature en ville : un démonstrateur de transition écologique

**Enjeux de recherche et d'innovation
liés au développement de la nature en ville**

LES CAHIERS FUTURIS

Ces travaux sont soutenus financièrement par les souscripteurs FutuRIS :

AIR LIQUIDE - AMPIRIC-AIX-MARSEILLE UNIVERSITÉ - ANR - BERGER-LEVRAULT - BNP PARIBAS
BOUYGUES - CEA - CNRS - DECATHLON - EDF - ENGIE - FRANCE UNIVERSITÉS - GENERAL ELECTRIC
INRIA - INSTITUT MINES TELECOM - INSTITUT PASTEUR - MINISTÈRE DE L'ÉDUCATION NATIONALE,
DE LA JEUNESSE ET DES SPORTS - MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE
RÉGION PAYS DE LA LOIRE - RENAULT - SCHNEIDER ELECTRIC - SNCF - TOTAL ENERGIES - UDICE
VINCI

Le contenu n'engage que la responsabilité de l'ANRT en tant qu'auteur et non celle des institutions qui lui apportent son soutien.



Life Is On



Présentation du travail et remerciements

Depuis 2020, l'ANRT explore la façon dont la recherche et l'innovation peuvent contribuer à affronter les enjeux climatiques et environnementaux qui conditionnent notre avenir sur la planète. Après un colloque dédié à **l'analyse de cycle de vie** le 10 décembre 2020¹, un groupe de travail « Transition écologique » s'est mis en place en 2021. Il s'est penché sur la question des besoins de recherche en appui au développement du **recyclage** dans les domaines de la construction et du BTP².

En 2022, à la demande du ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche et du ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des Territoires, le Groupe de travail *Transition écologique* s'est orienté vers l'accompagnement des transitions urbaines par la recherche et l'innovation, et a adopté son intitulé actuel : GT *Transition écologique - Ville durable*. Le GT a travaillé en 2023 sur le thème de la **ville circulaire et régénérative**³.

De ce fait, il s'inscrit aujourd'hui dans l'écosystème national et européen de recherche et d'innovation sur la ville durable, en participant notamment :

- au Groupe miroir Ville durable, co-piloté par le MESR et le MTECT, dont l'objectif est de structurer et d'animer la communauté française en vue de développer la participation française aux programmes européens dédiés ;
- au [Partenariat européen DUT \(Horizon Europe\)](#), en tant que membre associé.

En 2024, le GT *Transition écologique - Ville durable* a choisi de réfléchir aux conditions de **développement de la nature en ville**, en tant que piste de solution face aux défis climatiques, environnementaux et sociaux qu'affrontent les villes aujourd'hui. Ce Groupe de travail s'est réuni à quatre reprises pour écouter des experts et acteurs du domaine et débattre du sujet (voir annexe 1).

L'ANRT et le Président Michael Matlosz remercient chaleureusement l'ensemble des intervenants (annexe A), les membres du Groupe de travail (Annexe B), et les membres de FutuRIS pour leur soutien.

Un grand merci aussi à **Anne Ruas (Université Gustave Eiffel)**, précieuse conseillère scientifique du GT, au Groupe Miroir pour le riche travail de coordination et d'appui à l'écosystème, aux responsables du Lab Recherche Environnement pour leur accompagnement des travaux du GT, et au Partenariat DUT, avec une mention particulière aux responsables du Pilier CUE (*Circular urban Economies*).

Les propositions formulées dans cette note sont le fruit des présentations et des échanges au sein du groupe de travail en 2024. **La note n'engage pas individuellement ou institutionnellement les membres du groupe. Elle est portée par l'ANRT**, dans son rôle d'animation d'échanges collectifs et de force de proposition en direction des responsables des politiques de recherche et d'innovation.

Pour cette raison, les auteurs des citations ou les porteurs des projets mentionnés ne sont pas nommés : ces citations et exemples ont vocation à illustrer des propos synthétisés par la note, et non à restituer des points de vue particuliers exprimés lors des échanges.

1 Cf la [page web du colloque](#), site web de l'ANRT.

2 *Pistes de recherche pour le développement du recyclage dans une dynamique circulaire*, Les Cahiers FutuRIS, ANRT, février 2022.

3 Organisation d'une Journée d'échange nationale au MESR le 1^{er} juin 2023, en partenariat avec le MESR, le MTECT et l'ANR: *La ville circulaire et régénérative. Mieux valoriser les ressources des écosystèmes urbains : défis et perspectives*.

Sommaire



Résumé	1
Introduction	5
Une définition ouverte de la « nature en ville ».....	5
Nature en ville et adaptation au changement climatique	6
Solutions fondées sur la nature : une multifonctionnalité efficace	7
Nature en ville : un emboîtement de problématiques à différentes échelles	7
01. Caractériser et modéliser les composantes multifonctionnelles de la nature en ville	9
1. Des réalités complexes, hétérogènes dans l'espace et variables dans le temps	9
2. Connaître plus et mieux : enjeux de métrologie, de modélisation et de qualification	15
02. Co-construire des solutions innovantes et des outils d'aide à la décision	20
1. Promouvoir une recherche en prise avec les enjeux d'innovation urbaine	20
2. Développer des modèles à la fois puissants et faciles d'utilisation	22
3. L'exemple des Technosols : de la terre aux modèles, des modèles aux applications	24
03. Mobiliser et outiller les acteurs de la ville régénérative	27
1. Comprendre et accompagner la transformation des systèmes d'acteurs	27
2. Réinventer les référentiels et les modalités de l'action publique	31
3. Modèles économiques : progresser sur la question des valeurs de la nature en ville	34
04. Exemple d'une question clé transversale : quelle maintenance de la nature en ville ?	36
1. Questions philosophiques, culturelles et politiques : faire vivre la nature, ou la laisser vivre ?	36
2. Questions scientifiques et techniques : quel devenir de la nature en ville ?	37
3. Questions économiques : quels coûts complets, quels systèmes comptables ?	38
4. Questions sociales : quelles compétences collectives, quels nouveaux systèmes d'acteurs, quelles régulations ? ..	39
Conclusion	41
Annexe A : Réunions et intervenants	42
Annexe B : Membres du groupe de travail	43

Résumé

« Va prendre tes leçons dans la nature », disait Léonard de Vinci. Aujourd'hui, faire davantage place à la nature dans nos villes congestionnées et polluées permet de joindre l'utile à l'agréable, en réponse à deux enjeux majeurs : améliorer la santé et le bien-être de citoyens toujours plus nombreux ; remédier aux conséquences des changements climatiques que les villes affrontent de plein fouet (canicules, pluies diluviennes suivies d'inondations, épidémies, etc.).

Les « solutions fondées sur la nature » apparaissent ainsi comme des réponses innovantes à un ensemble de besoins ou de problèmes systémiques. De fait, le principal atout de la nature en ville est son caractère multifonctionnel : elle est source de bénéfices multiples pour les écosystèmes urbains, en matière de climat, d'environnement, de biodiversité, de santé, etc. Favoriser le développement de la nature en ville est ainsi devenu une piste d'action clé pour tout décideur urbain.

Quelles sont les conditions pour que cet engagement en faveur de la nature en milieu urbain produise ses meilleurs effets ? Et **comment la recherche et l'innovation peuvent-elles contribuer au développement de la nature en ville, de façon aussi appréciable et durable que possible ?**

Telles sont les questions que le Groupe de travail s'est posée au cours des quatre réunions qu'il a consacrées à ce sujet en 2024. Pour organiser sa réflexion, il a choisi de se focaliser sur trois éléments constitutifs de la nature en ville :

- **l'air**, avec les enjeux de climat (chaleur notamment) et de pollution ;
- **l'eau** : flux, réseaux et trames ; gestion des eaux urbaines (notamment pluviales) ;
- **le sol** : enjeux des sols et des sous-sols urbains, substrats précieux de la ville dans son ensemble.

L'enjeu de la **biodiversité** a été traité de façon transversale à ces trois éléments.

Trois constats clés ressortent de cette réflexion collective.

Tout d'abord, **développer la nature en milieu urbain est une piste de travail importante pour la résilience urbaine et la qualité de vie en ville.** Cela permet de limiter les nuisances induites par les mo-

des d'organisation et de fonctionnement de la ville, d'adapter ceux-ci pour faire face aux dérèglements climatiques et environnementaux actuels et à venir, et d'atténuer leurs impacts négatifs à l'échelle des grands équilibres planétaires.

Ensuite, **la recherche et l'innovation ont un rôle majeur à jouer dans ce défi d'une nature plus présente et mieux insérée dans la ville.** En effet, s'il semble relativement facile de planter un arbre, tout devient plus compliqué dès lors que l'on se préoccupe aussi de sa survie à moyen et long terme : de nombreuses conditions sont à prendre en compte, particulièrement exigeantes en milieu urbain, et qui font appel à des connaissances, des compétences, des données, des outils spécialisés. Ces exigences atteignent un seuil encore plus élevé lorsque l'on s'efforce de maximiser les services écosystémiques que « la nature » peut rendre à « la ville », en prenant en considération les multiples interactions entre chaque composante de chacune de ces vastes réalités. Bien développer la nature en ville est donc tout sauf simple : il y faut des compétences issues d'un grand nombre de disciplines scientifiques, et des capacités d'innovation réparties chez une grande diversité de parties prenantes.

Enfin, **« bien » développer la nature en ville amène à poser des questions fondamentales de changement d'échelle, et derrière cela, de changement de paradigme.** Les conditions du « bien-vivre en ville » étant, pour la nature, nombreuses et complexes, c'est à une véritable réflexion systémique que nous invite son développement. Et comme souvent, le niveau d'impact est notamment fonction du niveau d'investissement au sens large : financier, temporel, culturel... L'engouement que suscite la (re)naturation urbaine relève aujourd'hui davantage du supplément d'âme que d'une révolution verte. Les bénéfices identifiés, pour réels qu'ils soient, sont à la mesure du caractère encore incrémental des initiatives. Il est clair qu'une contribution plus importante de la nature en ville aux attentes sociétales (mieux-vivre en ville, adaptation au changement climatique et atténuation de ce changement) dépend de ce que la société est prête à investir dans ce bourgeonnement. Les difficultés de mise en œuvre de la politique du *Zéro artificialisation nette* (ZAN) sont éclairantes à cet égard. Viser un impact positif plus important de la nature en ville implique un changement de modèle « écologique », c'est-à-dire à la fois philosophique, politique, économique et social.

Ces trois constats amènent à envisager **la nature en ville comme un véritable démonstrateur de transition écologique, en tant que système complexe en marche vers un nouveau modèle**, avec l'appui de la recherche et de l'innovation.

Le groupe de travail s'est principalement focalisé sur un objectif d'amélioration de la ville durable guidé par le souci de concevoir et de mettre en œuvre rapidement une diversité de solutions fondées sur la nature. Il a cependant aussi souligné à plusieurs reprises, comme un fil conducteur tissé dans un ensemble de réflexions à visée opérationnelles, **l'ambition transformatrice** plus profonde du concept de développement de la nature en ville, et la nécessité d'associer la recherche et l'innovation à cette ambition.

* * *

La nature en ville est souvent présentée comme une « stratégie sans regret » : du fait de sa multifonctionnalité, elle permettra de faire mieux que l'existant. Cependant, cela n'est vrai, ou en tout cas avec un niveau d'impact significatif, que si les spécifications liées à la grande hétérogénéité des réalités concernées sont respectées, ce qui suppose d'abord qu'elles soient connues, comprises et quantifiées. Une grande partie des besoins de recherche et d'innovation se concentre dès lors sur la **compréhension et la prise en compte des caractéristiques clés de la nature en ville**, à savoir sa **variabilité spatiale et temporelle** et sa **complexité** (emboîtement d'écosystèmes à toutes les échelles, articulations diverses entre ses multiples composantes et avec les autres éléments des systèmes urbains).

Trois pistes de recherche et d'innovation se dégagent des travaux du GT (parties I, II et III)

La première piste consiste à **caractériser et à modéliser les composantes multifonctionnelles de la nature en ville**.

Il importe de mieux connaître et comprendre ces composantes ; le GT en a retenu trois : air, eau et sol (y compris sous-sol). Toutes trois se caractérisent notamment par le fait que leurs propriétés, leur fonctionnement et leurs impacts sont très variables, en fonction des conditions locales et/ou temporelles dans lesquelles elles sont analysées. De nombreuses questions, relevant principalement des sciences de la matière, de la vie et de l'ingénieur, sont ici posées, quant aux spécifications physico-bio-chimiques des trois composantes évoquées, de la végétation, de la faune souterraine, etc.

La composante « **Air** » fait apparaître notamment des enjeux importants de gestion de la chaleur en ville (« îlots de chaleur urbains » - ICU ; et confort thermique), ainsi que des enjeux de qualité de l'air. Les enjeux liés à **l'eau** ont évolué historiquement, avec le passage d'une vision de l'eau urbaine encastree dans le « grand réseau » public à celle d'une « ville éponge ». De nombreuses solutions fondées

sur la nature (SfN) sont étudiées par les scientifiques et les innovateurs, pour la régulation des eaux pluviales par exemple. La rareté croissante de la ressource amène aussi à d'autres types d'interrogations quant à ses usages et sa gestion. Enfin, **les sols** ont pu être qualifiés de « terres inconnues » par les chercheurs et experts du GT : s'ils suscitent un intérêt croissant depuis quelques années, la connaissance qu'on en a demeure très largement en-deçà des questionnements liés à la composition et aux fonctions de cette « couche » de ville, particulièrement en tant que substrat de la nature urbaine.

Enfin, à la complexité intrinsèque de chacun de ces éléments, dont le rôle et les effets varient dans le temps et l'espace, s'ajoute celle de leurs **nombreuses imbrications** : c'est bien en tant que **système** que fonctionne la nature en ville, comme on le voit lorsque l'on prend le cas de la végétation et de ses besoins en nutriments issus du sol, de l'eau, etc. Ces solutions « vertes » de la nature en ville doivent aussi « faire système » avec les solutions dites « grises » (construites, technologiques) et « douces » (socio-politiques, organisationnelles) : les trois types de solutions ont à se recombinaisonner en permanence pour dessiner la ville de demain.

Dernier exemple des enjeux systémiques qui sont en soi un défi pour la recherche et l'innovation : l'emboîtement des niveaux de territoires (site, quartier, arrondissement, ville, agglomération...), qui contribue à faire de la ville un puzzle à plusieurs dimensions.

De ce fait, « *la comparaison reste difficile, et la généralisation ne semble pas atteignable* », selon les mots d'une intervenante. L'objectif est alors de parvenir à ordonner des ensembles de solutions correspondant à divers contextes et cas d'usage, à partir de données aussi nombreuses et fiables que possible, assorties d'une définition de leurs conditions de pertinence. On est donc là dans d'importants **enjeux de métrologie, de compréhension / qualification et de modélisation** :

- recueil et fiabilisation de données,
- modélisation et simulation, avec la nécessité d'affiner et d'intégrer divers modèles,
- ouverture et partage des données et des modèles (conditions clés de passage à l'échelle),
- caractérisation et qualification de réalités urbaines spécifiques.

La question des compétences disponibles est ici posée, pour mener à bien ces travaux mais aussi pour le **transfert des nouvelles connaissances et des solutions vers la société**.

C'est notamment l'objet de **la deuxième piste** de recherche et d'innovation, qui se rapporte au considérables besoins d'innovation lié au développement de la nature en ville : **comment co-construire des solutions innovantes et des outils d'aide à la décision en la matière ?**

Il n'est pas envisageable d'attendre que la recherche dispose de toutes les réponses aux nombreuses questions posées ; les acteurs urbains (collectivités, aménageurs, constructeurs, jusqu'aux citoyens) ont

à poser sans tarder les jalons d'une indispensable action. Le besoin est alors celui de **la meilleure convergence possible entre complexité de la réalité et simplicité de l'action**. Le rapport développe à ce propos deux orientations principales et une illustration.

Promouvoir une recherche en prise avec les enjeux et les acteurs de l'innovation urbaine est un premier impératif. Diverses pistes sont indiquées : collaborations amont et au long cours entre recherche et entreprises ; documents de vulgarisation (guides pratiques, fiches techniques), etc. De même, des exemples d'outils et de solutions innovantes, en cours de maturation et de diffusion, sont proposés, pour accompagner l'action et la décision sur le terrain.

Deuxième orientation : le **développement de modèles à la fois puissants et faciles d'utilisation** – deux conditions clés pour une utilisation dans de bonnes conditions de pertinence par des acteurs urbains contraints en termes de compétences scientifiques et de temps disponible. Il convient de prioriser les objectifs attendus, afin d'ajuster correctement le curseur entre pertinence et simplicité. Ainsi, pour gagner en pertinence, ces modèles doivent parfois décorrélérer des dimensions auparavant confondues au sein d'un même paramètre, tout en simplifiant la prise en compte d'autres dimensions. L'exemple d'un jumeau numérique environnemental montre les différentes facettes de ce défi.

Plus largement, l'innovation que représente les **Technosols**, substrats artificiels reproduisant les fonctionnalités des sols naturels⁴, avec des spécifications ajustées aux divers usages envisagés, illustre la façon dont recherche et action s'interpénètrent pour répondre au besoin de disposer de matériaux adaptés au développement de la nature en ville.

Ces deux premiers axes portent sur l'offre de nature en ville, et sur ses conditions de pertinence et d'efficacité. **Le troisième axe** de recherche et d'innovation s'intéresse plutôt à la demande sociale de nature en ville : **comment mobiliser et outiller les acteurs de la ville régénérative ?** Quelles sont les conditions sociales, politiques, juridiques, économiques, etc. qui feront de la société un environnement favorable au développement de la nature en ville ?

Ces questions, bien que moins approfondies par le GT, ont néanmoins fait consensus quant au besoin de développer les réflexions en ce sens, en faisant notamment appel aux sciences humaines et sociales. Diverses problématiques ont été évoquées ; on peut les regrouper en trois axes principaux.

Comprendre et accompagner la transformation des systèmes d'acteurs est un levier essentiel pour repenser des espaces de responsabilité et de com-

pétence adaptés d'une part, et de nouvelles modalités d'interaction, d'autre part, correspondant davantage aux enjeux de la nature en ville, souvent transversaux. Revisiter les frontières, externes ou internes, des organisations, ainsi que leur mode de fonctionnement ; co-crée la nature en ville avec les habitants ; assurer une montée en compétence générale de l'écosystème urbain apparaissent ainsi comme de véritables sujets de recherche tout autant que d'innovation.

Réinventer les référentiels et les modalités de l'action publique : au-delà du mot d'ordre, le développement de la nature en ville apparaît comme un puissant accélérateur de dynamiques qui peinent à s'imposer dans les politiques publiques. Il interroge par exemple les grands choix qui président aux politiques d'aménagement et d'urbanisme : quelle vision de la ville, quelles priorités, quels ordres de grandeur dans les moyens affectés orientent ses transformations et sa gestion ? Comment les formes urbaines tiennent-elles compte, dans leur conception même, des besoins et opportunités de la nature en ville ? D'autres questions, non moins structurantes, portent sur la capacité à faire fonctionner efficacement une gouvernance multi-niveau ; à développer une transversalité accrue entre services urbains ; à adapter des réglementations accompagnant le développement de la nature en ville, avec par exemple des seuils moins contraignants pour prendre en compte la relative variabilité de certaines solutions fondées sur la nature.

Enfin, la **question de modèles économiques basés sur des coûts complets** est cruciale pour permettre une meilleure vision partagée des coûts et bénéfiques des diverses actions en faveur de la ville durable. Si l'efficacité directe des solutions « grises » est largement démontrée, on sait que leurs externalités négatives ne sont souvent que partiellement prises en compte ; inversement, des solutions « vertes » aux effets moins massifs pourraient se voir créditer d'un meilleur rapport coût-efficacité du fait d'une meilleure prise en compte de leurs multiples co-bénéfices. Quoi qu'il en soit, la décision et l'action, publique et privée, gagneraient à disposer d'éclairages économiques plus poussés quant aux investissements nécessaires et aux impacts attendus. Beaucoup reste à faire à cet égard, même si la recherche avance, comme le montre l'exemple d'un travail sur l'évaluation des coûts de restauration des sols urbains.

Pour conclure, une question transversale, celle de la **maintenance de la nature en ville**, fait l'objet d'un focus spécifique (partie IV).

On le sait, la production initiale d'un objet est souvent davantage valorisée que celle de son entretien au fil du temps, de même qu'un investissement initial est plus valorisé que des coûts de fonctionnement ou d'amortissement. Or le bon fonctionnement et la durabilité d'un équipement sont évidemment d'un intérêt majeur pour les usagers.

⁴ Les sols remplissent notamment les fonctions suivantes : habitat et support de biodiversité, régulation des cycles de substances et d'énergies (filtrage, stockage, transformation...), production de biomasse, support de constructions et infrastructures, source de matière première, archivage (conservation d'informations sur l'histoire naturelle et culturelle).

En matière de nature en ville, l'enjeu de la maintenance est particulièrement crucial : il est question de sa survie même et de ses conditions de régénération. Cet enjeu permet aussi de montrer en quoi les dimensions scientifiques, techniques et sociales sont imbriquées.

Quatre facettes de la question de la maintenance en ville sont ainsi examinées :

- **Enjeux philosophiques et politiques** : quelles devraient être les places respectives de l'homme et de la nature dans la ville ? Faut-il faire vivre la nature, ou la laisser vivre ? Faut-il développer la nature en ville, ou s'efforcer de développer la ville avec et par la nature ? A des approches « ingénierales » qui peuvent être perçues comme trop interventionnistes, les écologues font observer que parfois, ne pas gérer, c'est aussi gérer.

Se posent aussi les questions des modalités des choix collectifs : qui décide de ces questions, comment, sur quelles bases ?

- **Questions scientifiques et techniques** : les connaissances sont encore très lacunaires concernant les niveaux et les types de maintenance nécessaires au bon développement de la nature en ville. Par exemple, les sols ou la végétation peuvent perdre certaines fonctionnalités en vieillissant, ou devenir pollués même en l'absence de pollution aux alentours. Mais on est loin de connaître la portée et les impacts de ce vieillissement ou de cette pollution sur les services rendus et/ou attendus.
- **Questions économiques** : on est encore loin de savoir évaluer dans quelle mesure, par exemple, il est économiquement préférable de laisser faire la nature ou de l'entretenir, en tenant compte des divers coûts, à divers horizons, des différentes options, d'autant plus si l'on intègre les divers co-bénéfices (y compris la valeur de la biodiversité ou de la nature en soi) et les diverses externalités écologiques et sociales.
- **Questions socio-organisationnelles** : les enjeux de maintenance font intervenir des parties prenantes beaucoup plus diverses que ceux de la production initiale (y compris les usagers eux-mêmes), avec des enjeux de collaboration plus élevés : qui finance, qui est responsable, qui agit pour quel type de maintenance, sachant que les bénéfices sont multifonctionnels et multibénéficiaires ? Ces questions sont sources de reconfigurations des organisations et des systèmes urbains. Peuvent aussi se mettre en place de nouveaux réseaux d'acteurs et de nouvelles pratiques sociales autour du fonctionnement et de l'évolution des « infrastructures relationnelles » que peuvent être les solutions fondées sur la nature (parc, mare, etc.).

Introduction

« *Les villes sont la nature façonnée par l'homme, à son image et à sa ressemblance* », a écrit un romancier canadien⁵. Une image pas forcément flatteuse, si l'on songe aux maux qui accablent les villes : pollutions multiples (air, eaux, sols...), pics de chaleur, inondations, tensions sociales, etc.

Certes, les villes ont aussi leurs bons côtés, joignant l'utile à l'agréable. Et elles n'étaient sans doute pas plus saines ou plaisantes au cours des siècles précédents, même si le bilan est difficile à faire entre les progrès réalisés et les problèmes nouveaux ou renforcés du fait de leur développement et du changement climatique.

Les villes ont à faire face à un redoutable défi : celui de répondre à des besoins vitaux (physiques et psychologiques) d'une partie de plus en plus importante de la population mondiale, sachant que :

- La croissance de la population urbaine affecte les conditions de vie dans des environnements urbains surpeuplés ;
- Le changement climatique va considérablement accroître les pressions sur ces conditions de vie.

Les villes constituent de fait des cibles privilégiées du changement climatique et de ses conséquences environnementales et socio-économiques. La concentration d'infrastructures et de population sur leur territoire permet certes aux villes de disposer des moyens de développer une certaine résilience ; mais elle a aussi le double effet de les rendre particulièrement vulnérables et d'amplifier les problèmes, comme le montre l'exemple des « rues canyons », enserrées dans des espaces artificialisés qui absorbent ou répercutent les rayonnements thermiques, empêchent la libre circulation de vents rafraîchissants, limitent l'absorption d'eaux pluviales en excès tout en accélérant leur déversement en surface, etc.

De nombreuses solutions se développent pour faire face à ces phénomènes délétères. Elles sont globalement classées en trois catégories : **solutions dites « grises », « vertes » et « douces »**, correspondant respectivement aux solutions technologiques, naturelles et socio-organisationnelles. Par exemple, face à un risque d'inondation, on peut construire une digue (solution grise) ; désimpermeabiliser certains espaces pour créer des zones inondables absorbant les surplus d'eaux (solutions vertes : noues,

friches...) ; modifier les plans d'occupation des sols pour rendre inconstructibles certaines zones (solutions « douces »).

Les travaux du GT se sont concentrés sur l'une de ces trois catégories de solutions : les solutions « vertes » (sachant qu'elles peuvent intégrer des dimensions grises et/ou douces).

Toutefois, le Groupe de travail a rappelé, en message préliminaire, la **nécessité de combiner ces trois types de solutions, pour permettre une approche holistique** : aucune de ces trois catégories ne sera à elle seule en mesure de répondre à l'impératif de rendre la ville plus durable, c'est-à-dire résiliente face aux chocs climatiques, environnementaux et socio-économiques à venir - et si possible, désirable en tant que lieu de vie pour les humains qui y résident.

Par ailleurs, ces trois types de solution doivent aussi se combiner à un quatrième : celui de la sobriété, pour une indispensable diminution des pressions anthropiques liées à nos modes de production et de consommation.

Une définition ouverte de la « nature en ville »

De nombreux vocables ou expressions renvoient à la problématique d'une nature davantage présente en ville. Comme on le verra, des approches très différentes peuvent correspondre à des formulations variables de cette problématique. Le GT s'est saisi du sujet de façon ouverte, en considérant l'enjeu global des conditions nécessaires à une ville faisant davantage place à la nature. Des concepts tels que la renaturation urbaine, la restauration de la nature en ville, les solutions fondées sur la nature, la végétalisation urbaine, etc. ont ainsi été pris en compte comme autant de façons d'exprimer cette problématique, tout en sachant que dans une perspective plus spécialisée, ils ne sont pas équivalents dans leur sens, leur portée, l'approche dont ils sont porteurs.

Afin de délimiter un champ d'analyse suffisamment précis, plutôt que de cibler tel ou tel concept, ce sont trois « éléments » de la nature en ville qui ont été abordés successivement, au cours de trois réunions

dédiées – ces éléments étant entendus ici comme des « proxys » d'enjeux urbains clés :

- **l'air**, renvoyant notamment aux **enjeux de climat et de pollution** ;
- **l'eau**, renvoyant notamment à la **gestion des divers flux d'eaux urbaines** ;
- **la terre**, renvoyant aux nombreux **enjeux des sols et des sous-sols urbains**.

A noter que la réflexion menée ne prétend pas à l'exhaustivité : de nombreuses dimensions de la nature en ville n'ont pas été directement traitées, telles que l'agriculture urbaine, les liens entre santé et nature en ville, les matériaux biosourcés, les approches biomi-métiques...

Chacun des trois éléments étudiés fait aujourd'hui l'objet de nombreux travaux scientifiques, dont beaucoup traversent les frontières disciplinaires établies. Air, eau et sol urbains suscitent aussi un foisonnement d'innovations, qui en permettent une approche à la fois plus respectueuse de leurs dynamiques propres et plus efficace en termes de services écosystémiques rendus. Cette recherche et cette innovation ouvrent de nouvelles pistes de questionnement et de solution, qui sont au cœur de ce rapport.

Nature en ville et adaptation au changement climatique

Au-delà de ces avancées et de ces perspectives concernant les trois objets considérés, a émergé un constat majeur, qui représente un premier message clé.

Accroître la place de la nature en ville constitue une voie d'action pertinente et efficace en matière d'atténuation du changement climatique, et surtout d'adaptation à ce changement.

L'enjeu de l'atténuation peut se résumer ainsi : les villes étant des concentrés d'activité humaine, elle-même source principale du changement climatique, limiter l'emprise humaine sur les territoires urbains en laissant davantage place aux dynamiques naturelles permet de contribuer (de façon limitée) à réduire certaines causes du dérèglement climatique.

En matière d'adaptation au changement climatique, le potentiel de la nature en ville est particulièrement important. L'encadré ci-après rappelle quelques éléments de cadrage concernant le changement climatique et la nécessité d'y adapter nos sociétés urbanisées.

> 6ème rapport du GIEC

- * Décennie 2011-2020 : la plus chaude depuis environ 125 000 ans
- * 2019 : taux de concentration de CO₂ dans l'atmosphère le plus élevé depuis 2 M d'années
- * Scénario intermédiaire (évolution au même rythme qu'actuellement) :
 - + 2°C en 2050 au niveau mondial par rapport à la moyenne 1850-1900
 - + 3°C en 2100 au niveau mondial

> Estimation de la Cour des Comptes pour la France

- + 3,8°C en 2100 en France [estimation de la Cour des Comptes - France⁶]
- Sachant qu'une hausse de 3,5° à horizon 2100 se traduirait par une perte d'activité économique de 10 points de PIB⁷

> **Conséquences** (en cours) : températures en hausse avec de fortes vagues de chaleur ; fortes précipitations avec crues et inondations ; sécheresses sévères ; augmentation de la fréquence et de l'intensité des événements climatiques extrêmes (tempêtes, ouragans...) ; submersion de zones côtières ; fonte du permafrost et des réserves glaciaires de la planète ; augmentation des vecteurs de maladie (bactéries, virus etc.) ; hausse de la mortalité : chaleur⁸, catastrophes naturelles, maladies... ; perte de biodiversité dans tous les milieux naturels ; difficultés d'accès à l'eau potable, conflits d'usages ; etc. « *Les risques seront de plus en plus complexes, combinés, en cascade et difficiles à gérer* » (rapport du GIEC).

> De 2005 à 2015, **le nombre de communes exposées à des risques climatiques forts** a augmenté de 131 % (ce qui représente en 2015 16 % des communes)⁹

> **Surcoût de l'effort d'adaptation pour le secteur du bâtiment** : 2 à 5 % pour la construction neuve et 10 % pour la rénovation du bâti existant, par rapport à des opérations sans adaptation. Cela représente des besoins additionnels par rapport aux besoins d'investissement publics et privés nécessaires à l'atteinte des objectifs de neutralité carbone de **1 à 2,5 milliards pour la construction neuve et 4,8 milliards d'euros pour la rénovation**¹⁰.

6 « L'action publique en faveur de l'adaptation au changement climatique », *Rapport public annuel 2024 – Synthèses* - Cour des Comptes et Chambres Régionales et Territoriales des Comptes.

7 *Les risques climatiques et leurs coûts pour la France. Une évaluation macroéconomique. Synthèse. ADEME, novembre 2023.*

8 Entre 2015 et 2020, l'estimation du coût sanitaire des vagues de chaleur en France se situe entre 22 et 37 Md€.

9 Observatoire national sur les effets du changement climatique, *Exposition des populations aux risques climatiques.*

10 I4CE (*Institute for Climate Economics*), *Vagues de chaleur : ce que l'on peut dire des coûts d'adaptation des bâtiments*, juin 2024.

Le développement de la nature en ville est porteur de nombreuses solutions face à cet énorme enjeu d'adaptation des milieux urbains aux changements climatiques. Rappelons par ailleurs qu'indépendamment des enjeux climatiques, la nature en ville est un élément important de l'équilibre de l'écosystème urbain en général, et constitue un facteur clé d'amélioration de la qualité de la vie de ses habitants.

Solutions fondées sur la nature : une multifonctionnalité efficace

Quelles sont les solutions fondées sur la nature, et en quoi permettent-elle d'adapter la ville aux conséquences des changements climatiques ?

Parmi les principales solutions fondées sur la nature permettant de s'adapter au changement climatique, on peut citer la végétalisation urbaine, avec la plantation d'arbres et autres espèces dans les rues et les parcs, mais aussi la végétalisation de toits et de murs, sur des substrats adaptés ; ou encore la désimperméabilisation de certains espaces, permettant de retrouver des sols fonctionnels, capables par exemple d'absorber et de retenir de fortes pluies.

A titre d'exemple, un rapport de l'ADEME, réalisé par TRIBU et le CEREMA¹¹, identifie les huit solutions suivantes pour le rafraîchissement urbain, en explicitant pour chacune les conditions de sa contribution à la lutte contre la chaleur en ville : les parcs, les arbres, les pelouses, les prairies, les toitures végétalisées, les façades végétalisées, les plans d'eau et les rivières, les ouvrages paysagers de gestion des eaux pluviales.

Quatre arguments clés résument ce que peuvent apporter les SfN en milieu urbain, et en quoi elles sont présentées comme des « solutions sans regret ».

- Les SfN sont porteuses de bénéfices multiples : chaque solution agit positivement sur un ensemble de facteurs ou de problèmes. A titre d'exemple, végétaliser un espace urbain permet à la fois d'absorber du CO₂, de rafraîchir l'air ambiant par ombrage et par évapotranspiration, de développer la biodiversité aussi bien en surface qu'en sous-sol, d'améliorer la qualité du sol, de contribuer à la santé et au bien-être humains (moindre chaleur, bienfaits psychologiques¹²), de renforcer l'agrément et la beauté d'un site, d'accroître la valeur économique des résidences voisines...
- Développer la nature en ville est une piste d'action souvent considérée comme sobre, avec des

solutions qui peuvent être « low tech » et/ou relativement peu coûteuses en argent, matières premières, énergie, etc. La réalité peut être assez différente : d'une part, comme on le verra, ces solutions ne sont généralement pas aussi simples qu'on pourrait le penser à première vue, loin de là. D'autre part, si l'enjeu réel est de transformer en profondeur la ville par et avec la nature, les investissements seront nécessairement plus importants.

Néanmoins, il est vraisemblable que la multifonctionnalité et la quasi-absence d'effets négatifs des SfN en font des solutions particulièrement efficaces. Cette efficacité sera probablement réévaluée à la hausse lorsque l'on aura appris à mieux évaluer les coûts et les bénéfices complets des divers types de solutions : « *Les approches comptables classiques ne prennent pas toujours en compte les externalités négatives de certaines solutions grises ni les avantages complémentaires rendus par les SfN. Cette approche modifie la comparaison entre SfN et solutions dites grises, à l'avantage des premières.* »¹³

- Enfin, les SfN sont « *adaptatives et réversibles* » : ces solutions vivantes sont aptes à évoluer en fonction de contextes locaux et de conditions climatiques elles-mêmes changeantes. De plus, elles peuvent se développer « *en synergie avec d'autres actions existantes, car elles n'entravent pas la recherche ni le déploiement d'autres solutions en parallèle de leur mise en œuvre.* »¹⁴

Pour ces différentes raisons, « *la nature en ville est en passe de devenir un enjeu clé pour l'atténuation et surtout pour l'adaptation au changement climatique* » selon l'ADEME.

Nature en ville : un emboîtement de problématiques à différentes échelles

« Planter des arbres » est la traduction opérationnelle la plus évidente des arguments visant à faire de la nature en ville une solution d'adaptation aux changements climatiques. De nombreuses villes affichent des plans en ce sens, y voyant un moyen concret, simple et apprécié des habitants de répondre aux enjeux écologiques.

Les travaux du GT ont permis de distinguer des réalités nettement plus complexes, à deux égards.

D'abord, développer la nature en ville n'est **techniquement pas simple**, en tout cas si l'on veut en tirer les multi-bénéfices attendus. Pour qu'un arbre

¹¹ CEREMA, *Rafraîchir la ville. Des solutions variées*, ADEME, mai 2021.

¹² A noter toutefois que les bénéfices de la nature en ville sur la santé humaine appellent de nombreux travaux complémentaires quant aux risques et inconvénients dont celle-ci peut être porteuse par ailleurs : allergies croissantes, développement de maladies vectorielles...

¹³ *L'adaptation au changement climatique et les solutions fondées sur la nature*, ADEME Stratégie, juillet 2024.

¹⁴ *L'adaptation au changement climatique et les solutions fondées sur la nature*, *ibid.*

grandisse et vive longtemps en bonne santé, par exemple, et qu'il s'insère de façon la plus contributive possible à son environnement, il y a de nombreuses conditions à prendre en compte, de nombreuses difficultés à surmonter, et de ce fait, encore de nombreuses questions pour la recherche et l'innovation.

Ensuite, ce qui est difficile à l'échelle d'un arbre, ou d'un ensemble de solutions vertes dans un quartier, devient **une équation d'une extrême complexité lorsqu'on se projette dans une intégration plus poussée et plus cohérente de la nature en ville**. Recréer des trames vertes, bleues, brunes dans la ville, articuler les besoins des plantes, de l'eau, de l'air et de la terre avec ceux des hommes et des infrastructures : autant de défis qui interpellent l'ensemble des sciences, ainsi que l'ensemble des forces sociales qui œuvrent à organiser et faire vivre une ville.

Les enjeux du développement de la nature en ville peuvent ainsi se saisir aussi bien à l'échelle de chacune de ses composantes (humaines et non-humaines) qu'à celle du système complet qu'elle représente – et qui ne se résume pas à l'addition de ces composantes. Les nombreuses interactions qui font de chaque territoire urbain un monde complexe et spécifique appellent en permanence un ajustement fin de l'ensemble des dynamiques qui le composent.

Dans cette perspective plus large, l'ambition de développer la nature en ville prend une tout autre dimension : bien au-delà de l'objectif de faire une place plus importante à la nature, la ville est appelée à **se développer par et avec la nature**. C'est alors véritablement un autre défi qui émerge, celui d'un **modèle différent**, basé sur une économie des coûts complets, la préservation des communs, des relations science-technique-société rééquilibrées au profit de la recherche de bénéfices collectifs eux-mêmes redéfinis selon des modalités nouvelles, des régulations politiques et juridiques alignées sur les objectifs de la transition écologique de type ODD, déclinés jusqu'à l'échelle de la ville, etc. Tous ces enjeux constituent eux-mêmes, bien sûr, des **objets de recherche majeurs**, notamment pour les sciences humaines et sociales.

Ces deux niveaux d'enjeux illustrent le large spectre de nouveaux besoins de connaissances et d'innovations qu'appelle le développement de la nature en ville, selon la vision plus ou moins incrémentale ou disruptive que l'on se donne.

Ce constat est présent en filigrane dans les travaux du GT.

Les intervenants et les participants ont exploré les questions scientifiques de granularité fine qui conditionnent la viabilité et la « performance » globale de la nature en ville. Ils ont aussi évoqué les interrogations plus fondamentales suscitées par la complexité des liens qu'entretiennent ville et nature, liens que la recherche a tout autant vocation à analyser, pour mettre en perspective la diversité des besoins, humains et non-humains, au sein des villes.

C'est en ce double sens qu'émerge la notion d'une nature en ville « démonstrateur de transition écologique ».

Le rapport présente ces différentes dimensions des travaux du GT. Celui-ci a soigneusement examiné le premier niveau de questionnement évoqué, très riche de pistes de travail en soi, tout en relevant au fil des réunions les enjeux relevant du deuxième niveau.

Pour la clarté du propos, le document est articulé en quatre parties.

Les trois premières explorent les pistes de travail liées à l'air, l'eau et le sol urbains, sous trois angles différents. Il est cependant essentiel de rappeler que ces trois angles ont vocation à être associés dans les travaux à mener, dans la mesure où ils sont constitutifs, ensemble, du plus haut niveau d'enjeu lié à la nature en ville, par essence systémique. C'est pourquoi la quatrième partie propose un focus sur une question transversale.

- I. **Caractériser et modéliser les composantes multifonctionnelles de la nature en ville** (enjeux liés principalement aux sciences de la matière, du vivant et de l'ingénierie)
- II. **De la recherche à l'innovation** : co-construire des solutions innovantes et des outils d'aide à la décision (enjeux liés au passage de la science à l'innovation)
- III. **Mobiliser et outiller les acteurs de la ville régénérative** (enjeux liés principalement aux sciences humaines et sociales)
- IV **Exemple d'une question clé transversale : quelle maintenance de la nature en ville ?**

Caractériser et modéliser les composantes multifonctionnelles de la nature en ville

1. Des réalités complexes, hétérogènes dans l'espace et variables dans le temps

ENJEUX LIÉS À L'AIR ET AU CLIMAT URBAINS

L'air urbain constitue un premier élément fondamental sur lequel peuvent agir les solutions fondées sur la nature. On peut identifier deux enjeux clés : la gestion de la chaleur en ville, et la qualité de l'air en milieu urbain.

Gestion de la chaleur urbaine

Les vagues de chaleur exercent une pression croissante sur les milieux urbains.

Il convient de différencier deux échelles de perception et d'intervention.

- **L'échelle de la ville** est celle du fameux « **îlot de chaleur urbain** » (ICU), qui résulte de l'accumulation de chaleur dans l'environnement bâti. La température de l'air en ville peut être supérieure de plusieurs degrés à celle des zones rurales, avec des pics allant jusqu'à 7°C de différence, comme observé à Berlin et Nantes.
- A une **plus petite échelle**, celle du corps humain et de son environnement immédiat (une petite place par exemple), on mesure le **confort thermique**. Celui-ci est influencé par de nombreux facteurs locaux : humidité, exposition au soleil, présence d'ombre, circulation de l'air, vêtements portés...

La compréhension et la gestion de la chaleur urbaine nécessitent l'utilisation d'une diversité d'approches et d'outils, adaptés à des échelles et à des objectifs différents, pour la mesure, la simulation et la modélisation des situations climatiques urbaines.

Cependant, tous les systèmes présentent, on le verra, des défis scientifiques et technologiques importants concernant leur **fiabilité**, du fait de **conditions d'usage complexes appelant de nombreuses précautions dans l'analyse et l'interprétation**.

La végétalisation urbaine fait partie des solutions permettant de réduire la chaleur en milieu urbain.

- **Les arbres** jouent un rôle crucial dans la réduction de la chaleur en ville grâce à l'ombrage qu'ils procurent et à l'évapotranspiration. À l'échelle d'une rue, cet effet dépend de la densité et de la disposition des arbres. Une simulation par Météo-France a montré qu'une couverture arborée de 75 % des espaces libres à Paris pourrait abaisser la température de la ville de 2,5°C lors de vagues de chaleur.
- **Les parcs urbains arborés** sont généralement plus frais que les zones construites, mais les parcs enherbés peuvent parfois être plus chauds que les zones environnantes, notamment s'ils ne sont pas irrigués (le bénéfice global restant néanmoins supérieur à celui des zones artificialisées). La taille des parcs est aussi un facteur important : plus un parc est grand, plus son effet rafraîchissant est significatif, bien que cet effet atteigne un seuil au-delà duquel il n'augmente plus. Les formes irrégulières et allongées des parcs tendent à limiter l'effet de rafraîchissement, tandis que des formes plus compactes, comme à Göteborg, montrent des réductions de température allant jusqu'à 5,9°C.

- **Les toitures et façades végétalisées** contribuent également à la réduction de la chaleur urbaine. L'impact dépend du type de végétalisation : plus les toitures sont « intensives », avec des substrats épais et une végétation diversifiée, plus l'effet rafraîchissant sera important grâce à l'effet d'albédo - principalement au-dessus du toit, ces effets peinant à être perceptibles au niveau de la rue et des piétons.

D'une façon générale, la variabilité des situations, des solutions et de leurs impacts est donc considérable, ce qui ouvre d'importantes pistes de recherche et d'innovation.

Gestion de la qualité de l'air, lutte contre la pollution urbaine

La qualité de l'air en milieu urbain est bien sûr un enjeu majeur de santé publique. La pollution de l'air, en particulier les particules fines (PM2.5), le dioxyde d'azote (NO₂) et l'ozone (O₃), est responsable de nombreux problèmes de santé graves, notamment de maladies respiratoires et cardiovasculaires.

Les arbres urbains, bien qu'offrant de nombreux avantages, ont un impact complexe sur la qualité de l'air. Leurs **effets positifs** sur la température ou les concentrations de CO₂ sont bien connus, de même que ceux de toutes les zones végétalisées, souvent présentées comme des « poumons » urbains. Par exemple, les arbres capturent une partie des particules et gaz polluants sur leurs feuilles, contribuant ainsi à la réduction des concentrations de certains polluants dans l'air¹⁵.

Cependant, en zone urbaine, ces effets positifs sont contrebalancés par d'autres qui sont antagonistes, en particulier :

- Des effets aérodynamiques : Les arbres ralentissent les flux d'air dans les rues, ce qui peut entraîner une accumulation de polluants émis dans les rues tels que le NO₂ et le carbone suie. Cette concentration accrue de polluants dans les rues peut avoir des effets négatifs sur la santé des habitants, particulièrement dans les zones à fort trafic.
- Des effets allergisants : les allergies liées à la végétation se développent - et certaines espèces végétales sont plus allergènes que d'autres.
- L'émission de composés organiques volatils biogéniques (COVb) : Les arbres émettent des COVb, tels que l'isoprène et les terpènes, en réponse à la chaleur et à la lumière. Ces composés peuvent réagir avec d'autres polluants pour former des particules fines et de l'ozone, aggravant la pollution de l'air. L'émission de ces composés varie selon les

espèces d'arbres et est exacerbée par le stress hydrique, soulignant l'importance du choix des espèces dans les projets de végétalisation urbaine.

Des travaux récents, présentés en réunion, suggèrent qu'en milieu urbain, les effets négatifs (polluants impactant la santé tels que les PM2.5, NO₂ et O₃) l'emporteraient sur les effets positifs.

Par ailleurs, même si le sujet n'a pas été directement abordé dans le cadre du GT, la végétation urbaine peut aussi être à l'origine d'un accroissement de maladies vectorielles apportées par diverses espèces animales (tiques, moustiques-tigres...)¹⁶.

Il ne faut pas oublier cependant les effets indirects de la végétation sur la pollution. Ainsi, les toitures et façades végétalisées permettent une optimisation de l'utilisation des systèmes de climatisation et chauffage qui finalement conduit à une diminution de la consommation d'énergie donc d'émission de polluants.

Dans le cadre du projet ANR sTREET¹⁷, des études approfondies ont été menées pour modéliser l'impact des arbres sur la qualité de l'air en milieu urbain, en prenant en compte leurs effets thermo-radiatifs, aérodynamiques, et de dépôt. Ces études montrent des **effets négatifs sur la qualité de l'air** :

- Augmentation des concentrations des polluants émis par le trafic, comme le NO₂ et le carbone suie de près de 5 % en moyenne, avec des pics allant jusqu'à 37 % dans les rues à fort trafic.
- Augmentation des concentrations urbaines d'ozone en fond urbain, et diminution dans les rues des concentrations d'ozone, avec une baisse moyenne de 2,3 % et des réductions pouvant atteindre 23 % dans les rues, à la suite de l'augmentation des concentrations de NO₂.
- Effet limité du dépôt sec (dépôt de polluant sur les feuilles) : diminution moyenne de 0,6 %.
- Augmentation des particules organiques et des particules fines dues aux COVb, notamment en période de stress hydrique.

Ces résultats suggèrent que la gestion et l'aménagement des arbres, et plus largement de la végétation, en milieu urbain doit être soigneusement étudiée (espèces, conditions locales...) pour minimiser les impacts négatifs sur la qualité de l'air. Notamment, la plantation d'arbres à fort houppier doit être limitée dans les rues à fort trafic, et les espèces sélectionnées pour limiter les espèces fortement émettrices de COVb (notamment terpènes). De bonnes pra-

15 A noter que cette capacité à fixer différents polluants est très variable d'une espèce à l'autre et d'un polluant à l'autre. A souligner aussi : les végétaux sont des écrans efficaces dans la dispersion de certains polluants, ce qui permet de limiter la contamination de l'environnement (ex. barrières végétales le long des axes routiers).

16 Voir par exemple : Fournet Florence, Simard Frédéric, Fontenille Didier, « Villes vertes et maladies à transmission vectorielle : nouvelles préoccupations et opportunités », in *Eurosurveillance. Journal de surveillance, d'épidémiologie, de prévention et de contrôle des maladies infectieuses*. 2024 ; 29(10) :pii=2300548. <https://doi.org/10.2807/1560-7917.ES.2024.29.10.2300548>

17 Projet ANR Street - impact of sTress on uRban trEEs and on city air quality - 2019-2024 - <https://street.cnrs.fr/>

tiques de végétalisation urbaine permettent aussi de limiter les effets allergisants¹⁸.

L'efficacité de ces solutions repose sur une **compréhension fine des dynamiques urbaines et des interactions complexes entre les différents éléments du milieu urbain**. Les outils de simulation et de modélisation doivent être continuellement améliorés et validés pour fournir des recommandations fiables aux décideurs. À l'avenir, les politiques publiques devront intégrer ces connaissances pour des environnements urbains plus résilients.

ENJEUX LIÉS À L'EAU EN VILLE

Les évolutions de la gestion des eaux urbaines

L'histoire de la gestion des eaux urbaines témoigne du passage d'une approche purement technique à une intégration plus holistique des problématiques environnementales et sociales.

Historiquement, la gestion des eaux urbaines s'est appuyée sur deux principes fondamentaux :

- **le grand réseau public** : un modèle universel qui visait à assurer un accès égalitaire aux infrastructures d'eau, perçues comme des symboles du développement urbain et de l'État-Providence.
- **L'eau désencastrée de son cycle naturel** : l'eau était gérée de manière linéaire, souvent déconnectée de son cycle naturel, traitée uniquement comme une ressource ou une menace, et gérée principalement à travers des infrastructures grises visant à accélérer son flux.

À partir de la deuxième moitié du XX^{ème} siècle, cette approche a montré ses **limites**, avec des impacts environnementaux négatifs, des inégalités croissantes et une saturation des réseaux.

La gestion de l'eau en ville s'oriente aujourd'hui vers une **reconnexion du cycle naturel de l'eau avec les écosystèmes urbains**. Les problématiques hydrologiques sont associées à d'autres enjeux environnementaux, sociaux et économiques. Les solutions fondées sur la nature visent à rendre la ville plus résiliente face aux événements climatiques. Elles impliquent de gérer les eaux pluviales *in situ*, en favorisant l'infiltration et en transformant la ville en une «ville spongieuse» capable de mieux absorber les précipitations grâce à des surfaces perméables et des matériaux naturels. Les collectivités locales jouent un rôle clé dans cette gestion, souvent à l'échelle intercommunale.

Les solutions fondées sur la nature pour la gestion des eaux en ville

Les SfN interviennent directement sur le cycle de l'eau en milieu urbain en favorisant l'infiltration et la

rétenction de l'eau dans les sols et l'évapotranspiration par les plantes, tout en réduisant le ruissellement sur les surfaces imperméables. Cela limite les risques d'inondation en diminuant le débit de pointe, en ralentissant l'écoulement de l'eau, en réduisant le volume d'eau ruisselée et globalement, en réduisant la saturation des réseaux classiques lors d'événements pluvieux intenses.

On trouve en ville une diversité de types d'eaux (fluviales, pluviales, usées, etc.) qui font l'objet de modes de gestion à la fois spécifiques et plus ou moins intégrés. Il sera principalement question ici des eaux pluviales.

La conception et l'évaluation des solutions fondées sur la nature pour la gestion des eaux en ville s'articulent autour de trois phases principales : l'instrumentation, la modélisation et la prospective.

- **L'instrumentation** permet de collecter des données pour comprendre, documenter et évaluer l'impact des SfN-eau sur l'environnement urbain. Elle englobe plusieurs dimensions : l'impact sur les écosystèmes, en tenant compte de la restauration, des infrastructures, de la gestion et de la protection des milieux ; sur les processus thermo-hydriques, qui examinent les interactions entre chaleur et eau dans les systèmes urbains ; et sur la biodiversité.
- **La modélisation** utilise les données collectées pour simuler le comportement des SfN dans divers scénarios urbains. Elle permet de prédire l'efficacité des SfN dans la gestion des eaux pluviales, l'atténuation des îlots de chaleur urbains et la préservation de la biodiversité. Par exemple, modéliser l'impact d'une toiture végétalisée ou d'un jardin de pluie permet de comparer ces solutions naturelles avec des infrastructures plus traditionnelles, comme les ouvrages en béton. Les modèles développés sont essentiels pour anticiper l'efficacité des SfN et pour optimiser leur conception en fonction des particularités de chaque milieu urbain.
- Enfin, la phase de **prospective et de planification** se concentre sur l'intégration des SfN dans les stratégies urbaines à long terme. Cette approche systémique prend en compte les multiples échelles et interactions complexes qui caractérisent le milieu urbain. Elle vise à fournir aux décideurs les outils nécessaires pour anticiper les défis liés à la gestion de l'eau, en intégrant les processus thermo-hydro-mécaniques et en prenant en compte les questions sociales, juridiques et institutionnelles.

De nombreux défis de connaissance et de compréhension

Pour que ces solutions soient pleinement efficaces, plusieurs défis scientifiques doivent être relevés. L'un des principaux est de **mieux comprendre l'hétérogénéité spatiale des précipitations**, c'est-à-dire la façon dont la pluie varie d'un endroit à l'autre dans

¹⁸ <https://renature.brussels/fr/actions/ville-saine/amenagez-en-re-duisant-les-allergies-au-pollen>

une ville, **ainsi que leur variabilité temporelle** (manière dont les précipitations peuvent changer rapidement, notamment lors d'orages soudains). Ces aspects sont essentiels pour prévoir les précipitations futures et intégrer les impacts du changement climatique dans les modèles hydrologiques.

L'infiltration et la rétention de l'eau, ainsi que l'évapotranspiration, posent également des défis en raison de l'hétérogénéité des sols et des végétations urbaines, qui influencent la capacité d'absorption de l'eau et les besoins en évapotranspiration des différentes plantes.

À une échelle plus large, les SfN offrent des bénéfices globaux, tels que la recharge des nappes phréatiques et l'atténuation des îlots de chaleur urbains (ICU). Cependant, pour maximiser ces bénéfices, il est crucial de **comprendre les interactions complexes entre les SfN et le système global de gestion des eaux**, en tenant compte des hétérogénéités locales. Bien que la renaturation du cycle de l'eau progresse, les infrastructures « grises » existantes (et à venir) continueront en effet à jouer un rôle important.

Les enjeux de recherche et d'innovation incluent une meilleure **compréhension et anticipation des effets de l'urbanisation et des SfN sur le cycle de l'eau**, ainsi que la **clarification du rôle du sol, du sous-sol et de la végétation** dans le devenir des eaux gérées par ces solutions.

La recherche est aussi appelée à contribuer activement à la **définition de stratégies et de trajectoires réalistes** pour la mise en œuvre des SfN à l'échelle urbaine.

En conclusion, alors que l'eau devient une ressource de plus en plus limitée, il est essentiel de **prioriser les bénéfices attendus de la (re)naturation**, tant à l'échelle locale qu'urbaine. Cela implique également d'explorer de nouvelles approches, telles que l'utilisation d'eaux non conventionnelles et la séparation à la source des excréments, pour maximiser l'efficacité de la gestion des ressources en eau et réduire les impacts environnementaux.

Les SfN offrent un cadre prometteur pour aborder ces défis, mais leur succès dépendra de la **capacité à les intégrer de manière holistique dans les stratégies de gestion urbaine**.

ENJEUX LIÉS AUX SOLS URBAINS

« Sols urbains : terres inconnues ? »¹⁹

Les sols urbains sont de véritables réservoirs de biodiversité et des ressources clés pour le bon fonctionnement des écosystèmes urbains et la résilience urbaine. Or ils ont été fortement mis à mal par le développement de l'urbanisation : pollutions, im-

perméabilisation conduisant à leur appauvrissement en tant que milieu naturel. En dépit d'initiatives récentes telles que la politique de Zéro Artificialisation Nette, une intervenante indique que « *24 000 hectares de sol sont artificialisés chaque année. Cela signifie qu'on artificialise l'équivalent de 5 terrains de foot par heure !* ».

Les membres du GT ont souligné que les sols urbains sont encore largement méconnus et insuffisamment étudiés, même si les recherches ont pris de l'ampleur au cours des trente dernières années.

Une multifonctionnalité à mieux connaître et comprendre

Les sols urbains remplissent une multitude de fonctions essentielles. La pédologie urbaine, discipline dédiée à l'étude des sols en milieu urbain, cherche à comprendre cette multifonctionnalité, qui comprend :

- **La séquestration du carbone** : environ 30 % des espaces urbains sont végétalisés, dont 70 % sont constitués de sols ouverts. Ces sols peuvent stocker jusqu'à 7 % du stock national de carbone organique, une proportion parfois supérieure à celle des sols forestiers équivalents, bien que cette capacité varie selon les conditions locales.
- **La gestion des eaux pluviales** : les sols urbains jouent un rôle clé dans l'infiltration et le stockage des eaux pluviales, aidant à prévenir les inondations et à recharger les nappes phréatiques.
- **La production végétale à finalité ornementale, écologique, paysagère et/ou alimentaire**.
- **La préservation de la biodiversité** : les sols urbains, notamment dans les espaces végétalisés comme les parcs et jardins, peuvent abriter une biodiversité importante : macrofaune, groupe le plus étudié (vers, mille-pattes...), mais aussi mésofaune (acariens, collembolles...), microflore (bactéries et champignons) et microfaune, invisible à l'œil nu (nématodes).
- Des **usages et valeurs** paysagers, culturels et récréatifs

Les activités humaines sont devenues un facteur dominant dans la formation et l'évolution des sols urbains, ce qui a conduit au concept d'**anthropo-séquences**, où les sols évoluent principalement en réponse aux interventions humaines.

Contrairement aux idées reçues, tous les sols urbains ne sont pas dégradés. En réalité, on trouve une grande variété de types de sols en milieu urbain, que l'on peut regrouper en plusieurs catégories en fonction de leur degré de modification :

- **Sols naturels à pseudo-naturels (très peu modifiés par les activités humaines)**, comme les Luvisols dans les forêts urbaines ou les Cambisols dans les zones d'agriculture urbaine. Ces sols ont conservé une grande partie de leurs fonctionnalités naturelles.

¹⁹ Titre de l'intervention de Christophe Schwartz (INRAE – Université de Lorraine) – Réunion du GT le 17 juin 2024.

- **Sols reconstitués ou construits** : Les Anthrosoles utilisés en horticulture, avec un apport important de matières organiques, ou les Technosols construits, tels que ceux des toits végétalisés.

A noter que certains sols, complètement remaniés suite à des constructions ou des remblais, n'entrent pas complètement dans les catégories précédentes.

Ces anthroposéquences témoignent d'une dynamique complexe des sols urbains. L'analyse des sols parisiens entre 1949 et 2017 montre ainsi que 36 % de la surface de l'agglomération parisienne a changé d'affectation en 70 ans, principalement en raison de l'urbanisation.

Une diversité aussi bien verticale qu'horizontale

La variabilité des sols urbains se manifeste aussi bien dans leur profondeur que dans leurs étendues :

- Verticalement, les sols sont composés d'une **superposition de couches, appelées « horizons »**, allant de la roche mère à la surface, présentant chacun des propriétés et des évolutions spécifiques.
- Horizontalement, la diversité des aménagements urbains (souterrains et de surface) induit une **forte variabilité locale des sols et de leurs fonctionnalités** : à quelques mètres près, les sols peuvent être très différents les uns des autres sur l'ensemble de la superficie de la ville.

Les sols urbains nécessitent ainsi des approches spécifiques pour maintenir ou restaurer leurs fonctionnalités : désimperméabilisation, décompaction, amendement, construction... Face à leur complexité et leur diversité, la recherche doit se développer afin de mieux comprendre les liens entre l'état des sols, leurs fonctions écologiques et les services écosystémiques qu'ils fournissent, et tester des solutions sur le terrain et développer des outils d'aide à la décision pour les gestionnaires publics et privés.

SYSTÈMES, SYSTÈMES DE SYSTÈMES : QUELLES INTERACTIONS, QUEL FONCTIONNEMENT ?

L'approche systémique, essentielle à une compréhension pertinente des enjeux de la nature en ville, peut être illustrées à travers trois exemples d'interactions : entre les trois dimensions étudiées ; entre approches fondées sur la nature, approches technologiques et approches socio-organisationnelles au sens large ; et entre niveaux de territoires.

Interactions entre air, eaux et sols urbains

L'air, l'eau et le sol fonctionnent en étroite symbiose dans les villes, selon des régulations complexes en fonction des paramètres de chaque situation locale et temporelle.

On l'a vu, le développement de la **végétation urbaine** a par exemple des impacts directs, quoique complexe, sur la qualité de l'air, la chaleur en ville, la régulation des eaux pluviales – sans compter les effets culturels, psychologiques et sociaux pour les citadins.

Par ailleurs, les sols urbains jouent un rôle crucial dans la gestion des eaux pluviales et le succès de la végétalisation. L'imperméabilisation des sols empêche l'infiltration naturelle de l'eau, entraînant un ruissellement accru qui peut causer des inondations. La végétalisation, en particulier avec des techniques comme les jardins de pluie ou les toits verts, peut permettre une meilleure infiltration tout en réduisant la quantité d'eau de pluie qui atteint les systèmes d'égouts. Un sol urbain sain, bien entretenu et riche en matière organique favorise aussi une végétation plus résiliente et capable de mieux supporter des périodes de sécheresse ou de fortes pluies.

Autre exemple d'interaction, entre **air (chaleur urbaine) et sol** : « *L'implantation urbaine commence à modifier la température du sous-sol. Il y a des îlots de chaleur souterrains en ville, alors que souvent, le sous-sol sert à fournir du froid, et dans le futur, le froid va être un gros besoin* ».

Les dimensions de l'air, de l'eau et des sols en milieu urbain sont donc étroitement interconnectées.

Interactions entre approches vertes, grises et douces

Les solutions fondées sur la nature ne suffiront pas à compenser les atteintes anthropiques en milieu urbain ; il est donc indispensable de les combiner avec des solutions dites technologiques (dites « grises »), et des solutions liées à l'organisation et au comportement humains, dites « douces ».

Par exemple, la végétalisation ne peut pas compenser les émissions de gaz à effet de serre liés à aux trois principaux contributeurs que sont **les bâtiments, la mobilité et l'alimentation**. La gestion des trois dimensions de la nature en ville que sont l'air, l'eau et le sol, doit donc aussi **s'articuler à la prise en compte de leviers d'action liés à ces secteurs**. La recherche de synergies, comme dans le cas de l'agrivoltaïsme urbain, est bien entendu souhaitable.

Les **solutions fondées sur la nature** telles que la végétalisation des toitures et façades, la création de parcs urbains ou la restauration de cours d'eau en ville permettent par exemple de réduire les polluants atmosphériques, de réguler les températures, de limiter les inondations et les canicules. Pour un impact suffisant, cependant, un couplage à des **solutions technologiques** est généralement nécessaire. Ainsi, pour gérer efficacement les épisodes de pluie intense et de réduire le risque d'inondations, les systèmes de drainage urbain peuvent être optimisés par l'installation de bassins de rétention, de réservoirs souterrains ou de stations d'épuration innovantes. Une rénovation ambitieuse du bâti ancien

est également essentielle pour adapter les villes au climat futur et assurer un confort suffisant à l'intérieur des bâtiments, en évitant un emballement de la consommation d'énergie lié au rafraîchissement (climatisation).

Enfin, les **solutions « douces »**, comme l'adaptation des comportements, la planification urbaine durable et la mise en œuvre de politiques publiques adaptées, sont essentielles pour garantir la pérennité des initiatives. Par exemple, la sensibilisation des habitants à la gestion responsable de l'eau ou à la réduction des émissions polluantes peut renforcer l'efficacité des SFN et des solutions technologiques.

La combinaison de ces trois types de solutions crée un système d'interactions complexes où chaque approche renforce ou complète les autres. Un écosystème urbain résilient repose sur l'équilibre de ces différentes solutions. La pertinence des différentes solutions et de leur combinaison doit être évaluée au cas par cas, en fonction du territoire concerné.

Interactions entre niveaux de territoires

Les interactions entre les réalités urbaines doivent également être pensées à différents niveaux de territoire : du bâtiment à l'îlot, au quartier, à la ville, voire à la région urbaine. Or chacune de ces échelles fait intervenir et s'articuler les diverses composantes urbaines, naturelles ou humaines. On l'a vu par exemple avec les enjeux de gestion de la chaleur en ville, qui ne sont pas les mêmes selon que l'on se parle d'ICU (îlot de chaleur urbain) ou de confort thermique.

La question des **trames urbaines** illustre bien ces enjeux émergents d'articulation des différentes échelles de la ville.

À l'échelle de la parcelle, chaque espace vert, jardin ou point d'eau joue un rôle crucial dans la biodiversité locale, en offrant des habitats pour la faune et la flore. Ces espaces doivent aussi permettre la **circulation des espèces et des ressources, en étant connectés aux espaces voisins**.

À l'échelle du quartier, se créent ainsi des **corridors écologiques** : rues arborées, façades végétalisées, cours d'eau urbains permettent aux espèces de se déplacer et de coloniser de nouveaux habitats, renforçant ainsi la résilience écologique du quartier.

À l'échelle de la ville, il importe que les documents d'urbanisme garantissent cette continuité écologique en intégrant ces **trames vertes** (parcs, forêts urbaines, alignements d'arbres...), **bleues** (milieux aquatiques : rivières, lacs, bassins...) et **brunes** (sols et sous-sols en capacité de soutenir la biodiversité). Les infrastructures urbaines, comme les routes et les bâtiments, peuvent être conçues ou adaptées pour minimiser les ruptures dans ces trames, par exemple en intégrant des passages pour la faune ou en végétalisant les bords de routes.

Ces trames ont enfin vocation à **s'inscrire dans**

des écosystèmes régionaux, la ville étant un maillon dans un réseau écologique plus vaste, comprenant par exemple l'amont et/ou l'aval d'une rivière, des zones agricoles et forestières connexes, etc.

Le développement de la nature en ville suppose donc une **approche résolument systémique**, en intégrant non seulement les spécificités des milieux urbains (air, climat, eaux, sols), mais aussi les interactions entre ces dimensions, les types de solutions déployées, et les niveaux territoriaux.

Cette vision holistique appelle l'approfondissement et la mise en relation de nombreuses **connaissances à différentes échelles**. On peut souligner à cet égard que les connaissances déjà disponibles sont très hétérogènes : certaines choses sont mieux connues que d'autres, ce qui appelle à cibler les efforts sur ces dernières. Quelques exemples à titre d'illustration.

- La **discipline « Pédologie – Science du sol »** a ainsi été officiellement classée parmi les disciplines rares par le ministère chargé de la Recherche²⁰. En particulier, la très riche biodiversité des sols urbains demeure largement méconnue : 25 à 60 % des espèces terrestres sont présentes dans les sols, mais seulement 1 à 3 % des études sur les sols urbains portent sur cette biodiversité.
- Concernant les processus de végétalisation des villes, une question importante est celle de la gestion des différentes strates végétales : strates herbacées, buissonnantes, arbustives, arborées... Or, comme l'a souligné un intervenant, *« beaucoup de travaux scientifiques portent sur les arbres, leur fonctionnement, les espèces, etc., mais il y en a beaucoup moins sur les autres strates, les sols et les sous-sols »*.

D'autres phénomènes méritent également d'être explorés plus avant, tels que les **processus d'évapotranspiration**, les **conditions et impacts de la végétalisation urbaine**, des **trames écologiques urbaines**, etc.

Face à cette considérable complexité des composantes de la nature en ville et de son développement, un enjeu clé est de mieux appréhender et de **qualifier plus complètement et plus précisément le fonctionnement et les interactions de ces diverses composantes, dans diverses conditions**.

D'importants efforts de mesure et d'analyse sont donc attendus.

²⁰ MESR - Note du Service de la Coordination des stratégies de l'Enseignement supérieur et de la Recherche, 21 janvier 2023.

2. Connaître plus et mieux : enjeux de métrologie, de modélisation et de qualification

En métrologie, les spécialistes savent que les températures peuvent varier considérablement à 1 ou 2 mètres près, selon les conditions locales. Mais **la communauté de chercheurs et experts concernés est encore très réduite, alors que les besoins de mesure et de simulation sont de plus en plus importants.**

« *Le besoin sociétal a évolué, il y a de nouvelles questions qu'on ne se posait pas auparavant. De ce fait, les données ne sont pas assez riches au départ, avec par exemple des lacunes d'information concernant les conditions de production, conduisant à des approximations qui ne permettent plus de répondre aux besoins actuels. Mais les compétences disponibles sont encore limitées pour faire face à ces besoins de données plus spécifiques, plus nombreuses, mieux exploitées* ».

RECUEILLIR ET FIABILISER DAVANTAGE DE DONNÉES

Le recueil de données en milieu urbain est rendu difficile par les importantes variations locales et/ou temporelles des conditions environnementales. Les mesures de paramètres comme la température, l'humidité ou la qualité de l'air peuvent être influencées par des facteurs tels que l'ombre, le vent, la présence de végétation, et les matériaux de surface, rendant chaque mesure potentiellement unique et peu représentative d'un contexte plus large. La composition des sols, moins sensible aux variations temporelles, peut en revanche être très différente à quelques mètres de distance.

La question des **méthodes et des outils de recueil des données** est donc cruciale. Concernant la chaleur urbaine, par exemple, des systèmes de capteurs multiples et diversifiés, fixes ou mobiles, sont nécessaires pour capturer une variété de conditions locales, à différentes échelles. Les mesures mobiles, par exemples, peuvent être effectuées :

- à l'échelle du confort thermique : système de sac à dos par exemple, porté par quelqu'un qui se déplace (système Cityfeel de Hepia, en Suisse) ou dans un panier ajouré (CityClimateX²¹) ;
- à l'échelle de l'ICU : en voiture (système Thermoroute du Cerema) ou à vélo (exemple d'une campagne de mesure à l'Université de Dijon ou à l'Université Jean Moulin Lyon 3).

Il faut tout d'abord souligner que l'installation et la gestion de stations de mesure fixes est souvent compliquée en milieu urbain : démarches adminis-

tratives en direction d'une diversité d'interlocuteurs (municipalité, Bâtiments de France, propriétaires fonciers...), nécessité de protéger les instruments de la curiosité des passants ou des dégradations, etc.

Par ailleurs, « **la mesure n'est jamais évidente, immédiate et directe** : on ne mesure jamais directement ce qui est juste en-dessous du capteur : on mesure l'effet d'un environnement, d'un ensemble de sources qui n'est pas toujours facile à identifier », en fonction de la vitesse et de la direction du vent par exemple.

La **période étudiée** est aussi à considérer soigneusement : même si elle est choisie de façon cohérente (exemple : deux mêmes périodes estivales sur deux années successives), les résultats peuvent être influencés par des situations non représentatives d'une réalité moyenne habituelle : des campagnes de mesures faites lors d'un été sont difficiles à comparer à celles faites l'été suivant.

Les deux paradigmes à ces limites sont claires. D'une part, **la multiplication de mesures locales in situ dans les meilleures conditions de cohérence et de pertinence** est essentielle.

D'autre part, l'analyse des résultats, pour leur utilisation ultérieure, nécessite un **niveau de spécialisation poussé** afin de les interpréter avec toute la compétence et la rigueur nécessaires : prise en compte des limites de pertinence, correction des biais, etc.

Au-delà de la mesure par capteurs *in situ*, **la télé-détection** par imagerie satellite et thermographie infrarouge permet d'analyser les surfaces urbaines et d'identifier les zones particulièrement exposées à la chaleur. Toutefois, ces méthodes, après un traitement qui nécessite de connaître l'émissivité de tous les matériaux de surface ainsi que des paramètres atmosphériques, ne donnent accès qu'aux températures de surface, qui ne reflètent pas directement la température de l'air ambiant. Par exemple, le bitume d'une route peut atteindre des températures très élevées sans pour autant indiquer la température de l'air environnant. De plus, « *pour une erreur de 5 % sur l'émissivité (caractéristique d'émission d'un matériau dans l'infrarouge), on peut aboutir à des différences de 15°C !* ». La marge d'erreur est donc potentiellement considérable.

Du fait de ces nombreuses limites ou points de vigilance, une intervenante va jusqu'à considérer qu'« *on peut faire 'parler' la mesure un peu comme on veut, en ajustant la façon de mesurer* ». Il est donc nécessaire que des protocoles rigoureux soient proposés.

Accroître la quantité et la qualité des données représente donc une première piste de progrès. La suivante s'oriente ainsi vers la construction et l'utilisation d'outils performants de simulation et de modélisation.

MODÉLISATION ET SIMULATION : AFFINER ET INTÉGRER LES MODÈLES SCIENTIFIQUES

Une fois les données recueillies, l'enjeu est de les mettre au service d'une vision aussi complète que possible des réalités urbaines et de leurs interactions, grâce à des outils de modélisation et de simulation performants. Dans une perspective plus opérationnelle, ces méthodes permettent également de **tester et de piloter les évolutions envisagées**.

La modélisation informatique est ainsi un outil précieux pour simuler l'impact de différents aménagements urbains sur la température.

Exemple :

À petite échelle, un outil comme **SOLENE-Microclimat**²², développé par le laboratoire CRENAU (Ecole supérieure d'architecture de Nantes) et le CEREMA, permet de simuler l'impact des climatisations sur le réchauffement des façades et de l'environnement proche, et, en retour, l'effet de ce réchauffement sur la performance des climatiseurs.

Les simulations montrent que les rejets de climatisation en façade peuvent augmenter la température de 2 à 3°C, ce qui se traduit par une augmentation de 10 % des besoins en froid des bâtiments.

À l'échelle de la ville, le modèle TEB (Town Energy Balance) de Météo-France, qui prend en compte les zones urbaines dans les simulations météorologiques, permet par exemple de simuler l'effet de la végétalisation (toits végétalisés, pelouses, arbres) sur l'ICU.

Une autre solution de modélisation consiste à utiliser des **modèles géostatistiques**. Ils présentent l'avantage de partir de constats terrains afin de retranscrire en tout point du territoire le confort thermique ou la température de l'air.

Exemple :

La thèse de Lucille Alonso (2021)²³ met en avant les avantages et les inconvénients à adopter une telle approche. Elle a permis également de souligner les erreurs géostatistiques qui peuvent se présenter en fonction de la morphologie urbaine et de la mesure terrain.

Cependant, **les modélisations actuelles présentent des limites qui sont autant de défis que la recherche et l'innovation s'attachent à relever**. On peut en citer quatre.

22 Outil. <https://solnemc.hypotheses.org>

23 Lucille Alonso. 2021. Intérêt de la modélisation de la température de l'air associé à la nécessité de la caractérisation des vulnérabilités territoriales pour une compréhension systémique du risque aux fortes chaleurs en milieu urbain sur Lyon et Tokyo. Université Jean Moulin Lyon 3. <https://theses.fr/2021LYSE3008>

Tout d'abord, les matériaux de construction ne sont pas considérés de façon suffisamment fine : une surface en béton dense sera considérée comme une surface en béton poreux.

Ensuite, **certaines dimensions sont absentes ou insuffisamment présentes dans la conception des modèles**. Par exemple, les arbres urbains ne sont pas systématiquement pris en compte dans les modèles de qualité de l'air, ce qui limite la précision des simulations.

Exemple :

Le projet ANR **STREET** (*Impact of sTress on uRban trEEs and on city air quality*), financé par l'ANR (2019-2014), vise à combler cette lacune en étudiant l'impact du stress des arbres urbains sur la qualité de l'air. Sont intégrés des paramètres tels que l'effet aérodynamique des arbres, le dépôt de polluants sur les feuilles, et l'émission de composés organiques volatils (COV).

Un autre exemple est le **manque de vision dynamique** dans les modèles d'analyse microclimatique ou de la qualité de l'air en ville, souvent basés sur des données thermiques statiques ; une meilleure prise en compte des dimensions aérodynamiques serait souhaitable.

Plus globalement, les modèles de climat spécifique à chaque ville, et plus encore les modèles de climat futur, sont aussi très insuffisants. Comme le souligne un intervenant, « *il y a d'abord un gros travail de définition du climat de chaque ville ; et chaque ville aura un autre climat à l'avenir. Les choix que l'on fait aujourd'hui doivent être compatibles avec aujourd'hui et avec après-demain. Un enjeu scientifique important est donc la qualification climatique des villes à 2050 et 2100. Or ce qui pêche dans de nombreux endroits en France, c'est de récupérer des données climatiques* ».

Ensuite, **certaines dimensions sont aujourd'hui intégrées de façon trop agrégée dans les modèles**, ce qui ne permet pas d'avoir une vision suffisamment fine des réalités prises en compte. Il conviendrait d'affiner les modèles, en **décorrélant les composantes de ces dimensions**, pour mieux comprendre comment chaque facteur contribue au microclimat urbain et aux effets plus larges comme les ICU.

Exemple :

La relation entre le rayonnement solaire, l'évapotranspiration, et la température de surface est souvent modélisée de manière agrégée, ce qui peut masquer des variations importantes et des interactions complexes.

Enfin, les interactions entre les différents éléments urbains (qualité de l'air, climat, et hydrologie urbaine...) nécessitent souvent de **combinaison plusieurs modèles, pour une analyse suffisamment intégrée des impacts observés ou recherchés**.

Ainsi, le couplage de modèles de continuum sol-plante-atmosphère (pour simuler les interac-

tions entre les arbres et leur environnement immédiat) avec des modèles de climat urbain et de qualité de l'air (comme TEB et MUNICH) permet de mieux comprendre l'impact global des arbres sur la ville.

Exemple :

La thèse d'Alice Maison (CEREA-Ecole des Ponts ParisTech), sous la direction de Karine Sartelet, a eu pour objectif de quantifier les différents effets des arbres sur la qualité de l'air à Paris : effets thermo-radiatifs, effets aérodynamiques, dépôt de pollution sur les feuilles, émission de COV.

« Modélisation des impacts des arbres sur la qualité de l'air, de l'échelle de la rue à la ville »
- Thèse soutenue le 28 novembre 2023, à l'École des Ponts ParisTech.

VALIDATION DES MODÈLES : VERS DES NORMES ET DES PROCÉDURES STANDARDISÉES

La validation des modèles est un aspect critique qui est souvent sous-estimé dans la recherche urbaine. Sans validation rigoureuse, les résultats des simulations restent incertains et peuvent conduire à des recommandations inappropriées, pouvant conduire à des actions contre-productives.

La validation d'un modèle consiste à s'assurer que les simulations produites sont en accord avec les données réelles observées. Cependant, **il n'existe pas de normes universelles pour la validation des modèles de microclimat urbain**, ce qui rend difficile la comparaison entre les études et l'évaluation de la fiabilité des modèles. Contrairement aux modèles de thermique du bâtiment, qui disposent de normes reconnues internationalement, les modèles de micro-climatologie manquent en effet de standards clairs. L'Agence Internationale de l'Énergie tente de combler ce vide en travaillant sur des annexes spécifiques, mais ces initiatives sont encore en développement.

La création de **benchmarks** est une première étape pour standardiser la validation des modèles. Ces benchmarks permettent de comparer les performances des modèles dans des conditions contrôlées et de les ajuster en fonction des résultats obtenus.

Exemple :

Le projet DIAMS (Diagnostic, conception & Gestion de la Surchauffe urbaine en période de canicule : apports croisés des outils de simulation Microclimatique et de l'imagerie IRT), coordonné par le CEREMA et financé par l'ANR, a pour objectif d'évaluer l'apport de l'imagerie satellite infrarouge thermique pour la simulation des microclimats urbains afin d'évaluer la surchauffe urbaine.

L'un des volets du projet est ainsi de **qualifier les modèles** développés ou utilisés par le consortium sur la base des jeux de données sélectionnés. Les résultats des modèles de simulation microclimatique à l'échelle quartier

ont été **comparés** entre eux et avec les données expérimentales sélectionnées dans différents cas d'étude.

L'élaboration de normes et de standards permettant une comparaison fiable des résultats à travers différents contextes urbains et climatiques est ainsi un enjeu auquel la recherche est appelée à contribuer activement. Cependant, pour que ces benchmarks soient utiles, il est nécessaire que les chercheurs partagent leurs données de manière plus ouverte.

OUVERTURE ET PARTAGE : DES LEVIERS D'IMPACT POUR PASSER À L'ÉCHELLE SUPÉRIEURE

Le partage des données et la comparaison des outils entre chercheurs, urbanistes, décideurs publics, entreprises etc. sont essentiels pour faire monter en puissance et en pertinence les modèles qui permettent de piloter le développement de la nature en ville. **L'insuffisance de ce partage des données est un problème récurrent** dans la recherche environnementale. La mise à disposition de données de qualité est pourtant essentielle pour valider les modèles, comparer les résultats, et développer des solutions robustes et généralisables. Des initiatives comme les plateformes de données ouvertes ou les consortiums de recherche collaborative sont des moyens de promouvoir cette culture du partage.

Exemple :

Dans le cadre de la gestion des eaux pluviales en ville, les données sur la performance des solutions basées sur la nature comme les toitures végétalisées ou les bassins de rétention sont souvent limitées à des études de cas spécifiques. **Le modèle Multi-Hydro** développé par l'École des Ponts ParisTech, qui associe 4 modules préexistants (précipitation, ruissellement, infiltration, assainissement), permet de simuler les effets de ces SfN sur la gestion des eaux pluviales à l'échelle d'un quartier ou d'une ville. Il a par ailleurs été couplé avec le modèle de micro-climat SOLENE-Microclimat dans le cadre du projet ANR EVNATURB²⁴. Cependant, pour que ce modèle soit utile, il doit être **alimenté par des données fiables issues de différentes villes et contextes climatiques**.

CARACTÉRISER ET QUALIFIER DES OBJETS URBAINS ÉMERGENTS

Au-delà de la question des données, des interrogations plus larges portent sur la **caractérisation d'entités urbaines encore peu ou mal cernées**.

Le souhait de gérer de façon plus sobre et plus responsable un certain nombre d'éléments urbains

amène à constater qu'il est nécessaire de les considérer plus attentivement et d'en savoir davantage à leur propos. Les interrogations vont de la **désignation** de ces entités (définitions, enjeux sémantique...) à leur **caractérisation** selon une variété de dimensions : contours ou périmètres, contenus, évolutions, interactions avec d'autres éléments et leurs impacts, etc.

- Premier exemple : la « **pleine terre** », que le sens commun associe à l'idée d'un sol non artificialisé dans lequel se trouverait par exemple plantés certains arbres en ville, est l'objet de nombreux questionnements, au croisement de diverses disciplines. Si l'expression est de plus en plus utilisée par les urbanistes ou les aménageurs, les écologues tendent à lui préférer celle de « **sol vivant** ». Les critères pour qualifier la « pleine terre » peuvent être divers : on peut prendre en compte l'absence de revêtement en surface, la perméabilité, la continuité horizontale (trame brune) ou verticale (en profondeur), la qualité bio-physico-chimique... – ou tout cela à la fois, comme le suggère un écologue membre du GT, qui s'interroge par ailleurs :

« Faut-il en avoir une vision dichotomique, avec de la pleine terre à certains endroits et pas à d'autres, ou y a-t-il un gradient, avec divers degrés de pleine terre en ville, qu'il faudrait cartographier ? On peut ainsi distinguer la pleine terre stricte, dégradée, partielle - ou absente. »

Les enjeux opérationnels liés à ces questionnements sont importants. Les documents de planification urbaine commencent à afficher des « coefficients de pleine terre », ce qui les confronte à la question de déterminer quel serait un coefficient optimal à l'échelle d'un quartier. Les études scientifiques sur la question étant encore très peu nombreuses, un certain nombre de collectivités le fixent de façon arbitraire : 20 %, 30 %...

- Deuxième exemple : **les friches urbaines**, qui représentent, selon l'écologue cité plus haut, un « *angle mort* » de la connaissance des réalités urbaines à plusieurs égards, à commencer par leur définition même.
 - Pour les **urbanistes**, une friche est un espace urbain en attente d'être aménagé ;
 - pour les **écologues**, c'est plutôt un refuge du vivant, un espace naturel à préserver dans la ville. Leurs propriétés et leurs usages font aussi question, contribuant à des visions très différentes du concept de nature en ville – on y reviendra.
- Dernier exemple : la notion de « **sol urbain** » renvoie à des conceptions différentes selon les approches disciplinaires ou professionnelles. Selon un intervenant, il faut ainsi favoriser une **évolution de la notion de « sol-surface »**, correspondant aux approches foncières des aménageurs et des urbanistes, **vers une notion de « sol-matière »**,

portée par les pédologues ou les agronomes, avec les concepts de « profil de sol », pour les premiers (sol disponible pour la végétation et apte à rendre une diversité de services écosystémiques), ou de qualité du sol pour les seconds.

Le **besoin de disposer de bases de connaissances plus solides pour mieux qualifier un certain nombre de réalités urbaines** se reflète dans les nombreux **débats sémantiques** dans ce domaine. Ceux-ci renvoient à la nécessité de construire un vocabulaire de la nature en ville encore très émergent. Ces enjeux de terminologie reflètent des époques différentes mais aussi des approches diverses, parfois contradictoires, des objectifs et des méthodes à employer.

Pour prendre quelques exemples, des termes tels que « verdissement », « renaturation », et « végétalisation », parfois utilisés de manière interchangeable, ils renvoient à des pratiques et des ambitions distinctes.

Le concept de « **verdissement** » évoque une approche décorative et domestiquée de la nature, souvent accompagnée d'un impact environnemental non négligeable, en termes de consommation de ressources comme l'eau ou l'énergie.

La « **végétalisation du bâti** » (toitures et murs végétalisés, par exemple) est une pratique courante, mais elle ne doit pas être confondue avec la « **renaturation** ». Cette dernière terminologie se réfère plutôt à la **restauration** d'espaces fortement dégradés, avec un accent particulier sur la récupération des fonctions écologiques des sols, impliquant souvent – mais pas toujours – un retour à un état antérieur ou non artificialisé. Cependant, cette définition n'est pas complètement stabilisée. Par exemple, dans le contexte de la politique du Zéro Artificialisation Nette (ZAN), la renaturation désigne la compensation de la consommation de sol artificialisé, un concept élargi par la loi Climat et résilience de 2021 pour inclure la désartificialisation des sols.

D'autre part, on distingue **la restauration écologique** et **la réhabilitation écologique** : la restauration vise à ramener un site à son écosystème originel, tandis que la réhabilitation cherche à rétablir un certain niveau de fonctionnalité écologique sans nécessairement restaurer l'état historique du site. Ces termes peuvent se chevaucher, notamment lorsque l'on parle de **re-fonctionnalisation** des sols, qui vise à rétablir leur capacité écologique sans viser un retour à l'état initial.

Enfin, au-delà des questions de définition, la découverte progressive de la complexité des formes et des interactions du vivant en milieu urbain appelle d'une façon générale à un **approfondissement des connaissances sur toutes ses composantes** : air, eau, sols, faune et flore. « *Mieux caractériser la végétation urbaine et suburbaine, avec le développement d'inventaires des arbres dans les villes* » est ainsi présenté comme un enjeu clé par une intervenante. Il en va de même pour les autres composantes mentionnées : sols, etc. – et surtout, interactions entre ces composantes, et avec d'autres dimensions de la vie urbaine.

Acquérir des connaissances plus fines pour mieux appréhender et développer la nature en ville est donc un enjeu considérable.

Pour conclure, un net besoin de **montée en quantité et en qualité** (données, connaissances, modèles...) se manifeste aujourd'hui, pour répondre aux défis de la complexité et de la variabilité des réalités urbaines.

Il est compréhensible, à ce stade, de nourrir l'ambition de gagner en reproductibilité des résultats et des solutions, en généralisation des méthodes, etc. Toutefois, cette ambition est sans doute illusoire, prévient une intervenante : « *La comparaison et la généralisation restent difficiles. Généraliser les approches ne semble pas possible ; ce que l'on pourrait peut-être faire en revanche, c'est parvenir à ordonner des solutions dans différents contextes, quand on aura mieux compris comment ça marche. D'où l'intérêt des outils d'études, des protocoles de mesure bien mis en place.* »

L'adaptation des solutions aux contextes locaux, en tenant compte des particularités de chaque environnement urbain, doit en tout cas devenir la norme plutôt que l'exception.

C'est aussi **l'enjeu des programmes européens**, qui permettent de prendre en compte une diversité de contextes plus importante. Un intervenant appelle à renforcer les liens entre programmes européens et programmes nationaux, en citant l'exemple du programme européen *Soil Health BENCHMARKS*, basé sur 24 cas multi-échelles et multi-utilisateurs pour l'observation et la gestion des sols urbains : on peut ainsi « *accéder à des villes avec des histoires, des climats etc. contrastés, permettant d'identifier des catégories diverses de cas d'usages* ».

A noter cependant que **la montée en quantité seule, sans la montée en qualité, ne serait pas en soi une réponse pertinente** à ce besoin de compréhension accrue des réalités urbaines. Comme le souligne l'intervenante précitée, **l'accumulation de données n'est pas en soi gage de progrès** : « *Les résultats deviennent d'autant plus complexes, ce qui n'aide pas forcément à la compréhension et encore moins à la décision.* » Dans certaines études, sur les parcs par exemple, « *on trouve de tout en termes de résultats ; dans ces conditions, il n'est pas facile de statuer* ».

La **montée en qualité nécessaire** passe ainsi par :

- L'enrichissement des données par de nombreuses informations relatives à leurs conditions de production, comme l'a rappelé le président du GT²⁵ ;
- Une collaboration et un partage accrus des connaissances entre toutes les parties prenantes (chercheurs, collectivités, entreprises, etc.) ;
- Une validation plus poussée des méthodes et des modèles ;
- Des compétences scientifiques et technologiques plus spécialisées et résolument plus nombreuses, dans les domaines de la caractérisation et de la compréhension de la nature en ville.

25 Michael Matlosz, Université de Lorraine et Académie des technologies – Réunion du GT le 19 mars 2024 : « *Si les données ne sont pas présentées avec des informations sur leurs conditions de production, elles ne sont pas d'une grande utilité, puisque les résultats pouvaient varier considérablement selon ces conditions : capteur placé à un endroit ou un mètre plus loin, selon qu'il y a du soleil ou non ce jour-là ou à cet endroit précis, etc. Sans ces informations, il pourrait même être contre-indiqué de rassembler des données, tant elles risquent de ne pas être pertinentes* ».

Co-construire des solutions innovantes et des outils d'aide à la décision

1. Promouvoir une recherche en prise avec les enjeux d'innovation urbaine

DES COLLABORATIONS FRUCTUEUSES ENTRE RECHERCHE ET ENTREPRISES

Le sujet de la nature en ville mobilise le milieu académique sur un spectre allant du plus fondamental au plus appliqué. Les partenariats avec des entreprises ou des collectivités, autour de projets de recherche et d'innovation ou dans le cadre de dispositifs collaboratifs, sont nombreux et structurants.

Les enjeux de la nature en ville constituent l'une des pistes de travail actuelles du Lab Recherche Environnement²⁶, qui, comme le rappelle l'un des responsables, « vont de la recherche fondamentale à l'aide à la décision, en passant par le développement d'outils et méthodes pour les opérationnels ».

La maturité de ce partenariat de recherche est illustrée par le **programme « Recherche et Solutions »**, qui vient rééquilibrer le fait que les chercheurs étaient souvent à l'origine des propositions de thèmes et de projets de recherche : ce programme est en effet basé sur les propositions des collaborateurs de Vinci et de ses filiales, invités à suggérer des pistes de R&D, en lien avec les solutions environnementales proposées par l'entreprise. Par exemple, une thèse est menée dans ce cadre sur la lutte contre espèces

invasives le long du contournement autoroutier de Strasbourg.

A travers ce type de partenariat, la recherche irrigue des acteurs urbains de façon nourrie et continue pour inventer de nouvelles solutions fondées sur la nature, permettant de renforcer la capacité des villes à faire face aux bouleversements climatiques et environnementaux.

On le savait, mais on peut le redire : ces recherches partenariales au long cours sont les plus aptes à permettre le développement de sujets émergents comme la nature en ville. Elles doivent être soutenues plus largement dans le cadre de la réalisation des grands objectifs de développement durable.

LITTÉRATURE GRISE ET GUIDES PRATIQUES : DES OUTILS PRÉCIEUX

Cette recherche partenariale produit des résultats qui ont vocation à être très utiles aux acteurs urbains. Sous sa forme première (publications, données...), ceux-ci ne sont toutefois accessibles qu'aux plus spécialisés d'entre eux. Au-delà de ce cercle restreint, la littérature scientifique nécessite d'être vulgarisée pour pouvoir être diffusée dans de bonnes conditions d'appropriation.

Un intervenant, écologue dans une agence régionale, note ainsi : « Pour moi, il est important de pouvoir aller puiser des réponses dans cette littérature scientifique. Elle n'est pas souvent vulgarisée donc il y a encore un effort à faire de ce côté : il existe des réponses scientifiques qu'on ne met pas en œuvre dans les plans d'action urbaine, faute de "traduction" opérationnelle. »

Les intervenants abondent : même si elles doivent encore être largement développées, les connais-

26 Le Lab Recherche Environnement est le fruit du mécénat de Vinci avec trois écoles depuis 2008 : Mines Paris-PSL, AgroParisTech et Ecole des Ponts ParisTech. Trois expertises académiques complémentaires sont ainsi réunies : énergie et ACV des bâtiments et des quartiers (Mines), écologie urbaine, alimentation et microclimats (Agro), transports et infrastructures (Ponts). Depuis 2008, cette chaire de recherche développe des programmes sur la performance environnementale des bâtiments, des quartiers et des infrastructures.

sances scientifiques sur la nature en ville pourraient et devraient être « *rendues disponibles et accessibles à tous via des outils opérationnels et des pratiques vertueuses largement diffusées* » : guides méthodologiques, fiches techniques, kits opérationnels, etc.

Cette « traduction » de la science en connaissances et méthodes appropriables par les acteurs urbains est de plus en plus souvent préconisée comme l'un des livrables clés des projets de recherche. Elle est précieuse pour aider les utilisateurs à gagner en compétence en découvrant les outils et méthodes disponibles, les conditions dans lesquelles ils peuvent être mis en œuvre.

Par exemple, le projet **DESSERT²⁷**, porté par le laboratoire Sols et Environnement (Université de Lorraine / INRAE) et financé par l'ADEME, a pour objectif d'éclairer les pratiques de désimperméabilisation – un enjeu clé dans le cadre de la politique de Zéro Artificialisation Nette (ZAN). Un guide d'aide à la conception d'opérations de désimperméabilisation sera publié en 2024, afin de contribuer à diffuser les bonnes pratiques dégageées et d'aider à orienter les décisions des responsables urbains.

De nombreuses institutions ont bien cerné ce besoin et proposent des ressources aussi accessibles et pertinente que possible. Le CEREMA, par exemple, a mis en ligne ses « nouvelles collections éditoriales », réparties en cinq catégories : les références, les dossiers, les essentiels, les ressources et les cahiers. Et nombreux sont les laboratoires, les agences, les associations, les fondations, les entreprises etc., qui proposent ce type d'informations synthétiques et opérationnelles, véritable trait d'union entre la complexité des savoirs formels et le besoin d'action appelant à « apprendre en marchant ».

DES SOLUTIONS INNOVANTES EN COURS DE MATURATION

La recherche contribue aussi directement à la production de solutions et d'outils opérationnels. De nombreux exemples ont été fournis au fil des travaux du GT.

Biodi(V)strict® : outil d'aide à l'aménagement basé sur une approche scientifique de l'évaluation de la biodiversité

Issu des travaux du Lab Recherche Environnement, Biodi(V)strict® est un outil compréhensible par les non-spécialistes, rapide et peu coûteux à utiliser. Il permet d'évaluer le fonctionnement écologique potentiel d'un site, pour tester des scénarios d'aménagement. Il est actuellement utilisé par une filiale de Vinci.

Le partenariat existant entre les trois écoles partenaires du Lab et Vinci a permis donner nais-

sance à Urbalia, filiale de Vinci, à partir de l'outil Biodi(V)strict®. A l'échelle d'un projet urbain, d'un îlot, Urbalia réunit l'ensemble de l'ingénierie écologique pour travailler sur tous les enjeux liés à la biodiversité urbaine : continuité écologique, évitement du traitement phytosanitaire des arbres, etc., puis d'aller plus loin sur l'aménagement paysager et les travaux associés.

EquoVivo : de l'outil à la marque

EquoVivo est la marque créée par Vinci Construction, regroupant tous les savoir-faire accumulés par l'entreprise, dans le cadre du modèle « Evitement, réduction, compensation », lors de grands projets d'infrastructure. Vinci a encapsulé ces savoir-faire sous cette marque, qui propose des solutions de génie écologique, renaturation, remise à niveau de cours d'eau, récréation de corridors écologiques, lutte contre les espèces envahissantes...

Revalo : solution de rafraîchissement urbain

La solution Revalo a été développée par Eurovia (filiale Routes de Vinci) avec l'Université de Lorraine et AgroParisTech, pour travailler sur l'îlot de fraîcheur urbain. Au-delà de la fabrique de la route, de la chaussée, du trottoir, de la place etc., cette proposition d'Eurovia intègre les questions des sols, des revêtements, des Technosols...

Graphab : modélisation des déplacements des espèces en milieu urbain

L'outil Graphab, développé par l'université de Franche-Comté, a été utilisé par des communes comme Strasbourg, qui a modélisé, à partir des déplacements de l'écureuil roux, son réseau de continuités écologiques en milieu urbain.

REGREEN : identification du gisement de sols artificialisés à renaturer

Le projet européen REGREEN vise à identifier les espaces minéralisés pour lesquels une opération de renaturation permettrait un gain écologique important (amélioration de la fonctionnalité du sol, etc.). Il peut utilement accompagner la politique de ZAN,

Pour résumer, et en laissant la parole à un intervenant, « *le fait de transformer des outils scientifiques en outils opérationnels d'ingénierie est très important. Pour nous, institut de recherche au sein d'une école d'ingénieurs, c'est clairement un axe de recherche en soi. Derrière cela, les enjeux sont importants : cette donnée devient de l'information, de la connaissance, de la compréhension et in fine, de la décision.* »

L'objectif est celui de **l'accélération et du changement d'échelle**, pour parvenir à transformer la ville par la nature, à la hauteur des défis climatiques et environnementaux.

²⁷ Désimperméabilisation des Sols, Services Ecosystémiques et Résilience des Territoires

Parmi les leviers identifiés, la question d'une modélisation adaptée à des usages opérationnels à la fois urgents et complexes apparaît clé.

2. Développer des modèles à la fois puissants et faciles d'utilisation

On l'a dit : la diversité des données à prendre en compte pour caractériser les composantes de la nature en ville dans des environnements variés conduit les chercheurs à développer des modélisations scientifiques qui appellent encore de nombreux développements. Mais les chercheurs sont également sollicités par les bureaux d'études, les services techniques des villes, etc. pour proposer des modélisations à visée **non plus scientifiques mais opérationnelles** : les modèles sont alors des outils d'aide à la décision pour concevoir, planifier et accompagner la mise en œuvre des projets de développement de la nature en ville.

Un enjeu clé est celui de **l'équilibre à trouver entre complexité et simplicité** : comment faire en sorte que les modèles développés soient capables de capturer la complexité des écosystèmes urbains, tout en étant utilisables par des non-spécialistes souvent contraints qui plus est par des agendas politiques et économiques serrés ?

Les chercheurs travaillent ici main dans la main avec les acteurs techniques de la ville (bureaux d'études, entreprises, prestataires, etc.) qui font le lien entre la recherche et le monde de la décision publique : élus locaux, responsables d'institutions publiques et parapubliques en charge de la gestion urbaine. Leur besoin pressant : disposer d'outils de modélisation, de simulation et d'aide à la décision suffisamment puissants pour prendre en compte efficacement une grande masse de données complexes et hétérogènes, tout en répondant aux spécifications suivantes :

- appropriation simplifiée ;
- usage rapide.

Il importe de noter que cette attente de bons « réglages » entre complexité et simplicité n'est pas seulement une question technique d'adaptation de modèles existants : le processus visant à gagner en pertinence opérationnelle constitue une **problématique scientifique** à part entière, y compris pour les sciences humaines et sociales. Sur quels paramètres, à quels niveaux, et comment doivent se faire ces réglages ? Autant de questionnements qui appellent d'importants travaux de recherche et d'innovation. Par exemple, les dimensions liées aux contextes locaux d'application et aux types d'usages des solutions envisagées doivent être traitées de façon à la fois approfondie et modulaire.

Comme le savent les spécialistes, mais pas assez les autres acteurs, c'est ainsi un autre niveau de com-

plexité qui surgit lorsqu'il est question de « simplifier » un modèle pour un usage opérationnel - il n'est pas simple de simplifier ! Dans certains cas, l'opération d'adaptation ne se fait d'ailleurs pas par réduction du plus complexe au plus simple, mais dans l'autre sens, avec l'ajout de modules à des modèles de base simples.

Quelques retours d'expériences et exemples permettent d'illustrer les défis que représente cette recherche d'articulation entre complexité et efficacité opérationnelle.

DÉCORRÉLER POUR GAGNER EN PERTINENCE

Si l'applicabilité à un contexte particulier implique de ne prendre en compte qu'une certaine réalité spécifique, il importe en revanche que **toute** cette réalité soit bien considérée.

Ainsi, concernant la prise en compte des effets de la végétation sur la qualité de l'air et la santé, des intervenants soulignent la nécessité de « *mieux modéliser les types d'essences et leurs émissions spécifiques* », notamment celles de composés organiques volatils, sans parler des effets de ces émissions et sachant que les végétaux absorbent par ailleurs une partie des émissions et qu'ils ont également d'autres bénéfices. De nombreuses autres dimensions sont aussi à prendre en compte si l'on souhaite évaluer le bénéfice du développement de végétaux dans un quartier. « *La question est donc bien de tout décorréler ; mais comment le faire, avec quel outil global et conceptualisé ? Il n'est pas certain qu'aujourd'hui, dans la communauté scientifique, on dispose d'un tel outil, capable de traiter des co-bénéfices sur le confort, la chaleur, la dispersion et l'absorption des polluants, les émissions de composés et la chimie atmosphérique, le cycle de l'eau, l'isolation du bâti etc.* »

AJUSTER LES MODÈLES AUX BESOINS

Des choix s'imposent, afin de prioriser les apports attendus des modèles.

Cette question guide les travaux menés par Sonia Le Mentec dans le cadre de sa thèse²⁸ dont l'objectif est de concevoir et de valider un modèle pour l'évaluation des effets de la végétalisation du milieu urbain sur la régulation du microclimat et sa contribution à l'amélioration de la qualité de l'air.

Un état des lieux initial a permis de constater qu'« *il existe beaucoup de modèles, et plus ils sont détaillés, plus il est long et compliqué de les utiliser : pour une simulation d'une journée, par exemple, un certain modèle doit tourner pendant trois jours* ». La thèse prenant place dans le cadre d'un partenariat avec

28 Sonia Le Mentec, « Impact de la végétalisation sur l'îlot de chaleur urbain et la pollution d'ozone : quantification par une approche de modélisation à l'échelle d'un quartier », thèse de doctorat en sciences de l'environnement sous la direction de E. Personne, D. Flick et P. Stella, soutenue le 07.07.2022, Université Paris Saclay.

Vinci, « un choix a été fait, en concertation avec les opérationnels de Vinci : celui d'un modèle simple », développé à partir d'un modèle de Météo France, dans lequel le modèle de végétation utilisé (ISBA) a été remplacé par celui développé par le laboratoire d'accueil (SURFATM), qui intègre non seulement les échanges de chaleur mais aussi les échanges de polluants.

Au-delà de la thèse, le modèle a continué d'être travaillé par le laboratoire à des fins d'application. « L'outil n'est pas encore assez développé pour pouvoir être transmis aux équipes de Vinci. On espère le faire dans les prochaines semaines ou les prochains mois, comme on l'a déjà fait pour le modèle de végétation, qui est disponible et assez simple à utiliser », expose le co-directeur de thèse.

DÉVELOPPER UNE GAMME D'OUTILS OPÉRATIONNELS

Un certain nombre d'entreprises se sont positionnées sur la conception et la fourniture de solutions de modélisation adaptées aux besoins émergents des villes en matière d'appui à la décision et à l'action concernant le développement de la nature en ville.

Ingérop, entreprise d'ingénierie et de conseil, a ainsi rassemblé au sein d'une filiale dédiée, **Actierra**, ses activités dans le domaine de l'écologie et du développement durable, afin qu'elles bénéficient d'une visibilité propre pour les clients. Pour répondre aux demandes de ces derniers, elles ont besoin d'outils pour évaluer et proposer des solutions adaptées. « Mais nous ne pouvons pas utiliser les modèles de la recherche, qui sont très précis mais longs à utiliser : un mois de maquette, 15 jours de simulation... Notre verrou est qu'il nous faut des modèles rapides (quelques jours au maximum) mais aussi suffisamment fiables », expose l'intervenante d'Actierra.

Partant du constat que de nombreux outils existent, Actierra s'attache à en développer une vision ordonnée, afin d'en faire un usage approprié : classement en fonction du coût, de la dimension opérationnelle, du degré de résolution spatiale...

L'entreprise note que le besoin d'outils est à graduer selon les cas d'usage : « le besoin serait d'outils simplifiés, pour des études amont, et d'outils plus complets pour la suite ». Par exemple, concernant le confort thermique, on peut citer les outils suivants par ordre de complétude/complexité croissant : Score ICU, ICETool, UMEP, SOLENE-microclimat, ENVI-MET.

Pour consolider son approche, Actierra a lancé une thèse Cifre²⁹ qui a notamment évalué 13 outils de mesure et de simulation de la chaleur urbaine sur une série de critères : échelles spatiale et temporelle, temps de simulation, disponibilité sur le marché, type d'usages,

type de résultats... Certains, comme l'outil SOLWEIG, apparaissent assez simples tout en présentant des limites liées à des paramètres simplifiés. D'autres sont plus avancés : ENVI-MET, par exemple, « ne peut pas être pris en main par tout le monde, il faut comprendre la prise en compte des phénomènes physiques. Les temps de calcul sont plus importants. Par ailleurs, le modèle n'est pas validé. Un certain niveau d'expertise est requis pour une bonne exploitation de ce modèle ».

Apprendre à concevoir et à manier des modèles pertinents d'appui à la décision et à l'action est ainsi un défi commun aux chercheurs et aux acteurs qui œuvrent à la transformation urbaine par la nature. Dans cette perspective, les sciences et technologies numériques occupent bien sûr une place de choix, comme le montre l'exemple suivant.

L'EXEMPLE DU JUMENT NUMÉRIQUE ENVIRONNEMENTAL³⁰

La notion de jumeau numérique environnemental représente un cas particulièrement intéressant de modélisation comme appui à la décision et à l'action publique. Celui qu'a développé WSP|BG Ingénieurs Conseils³¹ dans le cadre du GT permet d'illustrer cette problématique.

Le jumeau numérique développé par WSP|BG Ingénieurs Conseils est un outil d'aide à la décision pour accompagner les villes vers l'objectif ZAN 2050. Pour rappel, la **politique Zéro Artificialisation Nette** (ZAN) vise à lutter contre l'artificialisation des sols, mesurée quantitativement par l'augmentation de la superficie des sols artificialisés et qualitativement par la transformation des caractéristiques des sols naturels. Face à la réglementation issue des lois du 22 août 2021 (Climat et résilience) et du 20 juillet 2023, les élus sont en forte demande d'outils d'accompagnement vers des territoires qu'ils doivent gérer selon cette nouvelle logique de lutte contre l'artificialisation, donc de frein à l'augmentation des surfaces construites et aménagées en « dur » dans les territoires.

Le travail engagé par l'entreprise s'inscrit dans le cadre d'une thèse Cifre en urbanisme, débutée par Fanny Josse en 2022³².

Le jumeau numérique a été défini comme **un avatar d'un ensemble d'entités physiques, basé sur la continuité des données dynamiques et statiques.**

³⁰ Cet exemple est basé sur la présentation de Sylvain Riss et Fanny Josse, WSP / BG Ingénieurs Conseils – Réunion du GT du 17 juin 2024.

³¹ WSP|BG Ingénieurs Conseils est un bureau d'ingénierie dans le domaine Infrastructures, bâtiment, énergie, industrie, eau et environnement. Il se positionne également sur le conseil aux collectivités locales sur les enjeux liés à la ville, à l'aménagement urbain, la complexité de la gestion urbaine.

³² Thèse co-encadrée par le laboratoire Lab'Urba, à l'Université Gustave Eiffel, sous la direction de Bruno Barroca, et par Sylvain Riss pour WSP|BG Ingénieurs Conseils.

Cette continuité est essentielle car elle permet de simuler, diagnostiquer, surveiller et contrôler le comportement des composants physiques tout au long de leur cycle de vie.

Les travaux se concentrent sur les données liées aux sols et à leur artificialisation, tout en les mettant en relation avec un ensemble de dimensions connexes, qu'elles soient physiques ou socio-économiques. L'objectif est de développer un outil de simulation **facile à utiliser, transparent** en termes de données et de calculs, et **capable de s'adapter rapidement** aux évolutions réglementaires.

Parmi les défis à relever, on peut citer ceux qui sont liés à :

- la multiplicité des interprétations des calculs,
- la complexité juridique entre le droit de l'environnement et le droit de l'urbanisme,
- la diversité des acteurs et décideurs impliqués.

Les **avantages du jumeau numérique environnemental** sont multiples :

- **Intégration de nombreuses données** : en combinant des données issues de diverses sources (météorologiques, écologiques, hydrologiques...), il permet de construire une vision réaliste de la complexité des réalités urbaines, en simulant avec une certaine précision les différentes solutions d'aménagement et de gestion de la ville sous contrainte de ZAN.
- **Scénarios dynamiques et en temps réel** : intégrant des données en temps réel, le jumeau numérique permet de réagir rapidement à des changements dans l'environnement urbain, par exemple en ajustant les mesures de gestion des eaux pluviales en fonction des prévisions météorologiques, ou en organisant différemment la planification urbaine en fonction de nouvelles contraintes réglementaires.
- **Accessibilité et visualisation** : une plateforme permet d'accéder facilement à l'ensemble des données statiques et dynamiques ; et grâce à des outils de représentation, infographie, etc., les décideurs peuvent voir en temps réel l'impact d'une intervention urbaine à des horizons divers.

Cependant, malgré ses nombreuses promesses, le jumeau numérique environnemental fait face à des défis importants.

- Complexité intrinsèque de la représentation des territoires, système de systèmes dont chacun est rapidement évolutif : « *Le territoire n'est pas un système automatisé qui peut être facilement compris et prédit, mais plutôt un système vivant qui évolue constamment à travers les variations et les développements de ses constructions physiques, de ses activités économiques et politiques, de ses cadres sociaux et culturels. La technologie de simulation actuelle ne peut toujours pas saisir les détails complexes des matériaux et des dimensions d'une infrastructure, ni*

décrire les facteurs environnementaux externes complexes ».

- Les outils numériques contribuent à l'efficacité systémique des actions mises en œuvre ; il reste cependant du chemin avant de pouvoir **intégrer et exploiter les données urbaines à la hauteur de leur richesse** physique, chimique, écologique, sociale, économique et politique.
- Les initiatives de modélisation de la nature en ville appellent un **large et vigoureux effort de formation**, allant du plus spécialisé (davantage de chercheurs, et des experts avertis pour relayer leurs résultats) jusqu'au plus vulgarisé. Elus locaux, présidents d'associations, responsables d'entreprises impliqués dans des opérations urbaines : chacun a besoin de disposer d'un certain niveau de compétence, ou a minima d'une certaine sensibilisation aux enjeux, méthodes et usages de la nature en ville et de sa modélisation : origine des données, conditions d'utilisation et d'interprétation, etc.

Le dialogue entre chercheurs et décideurs peut encore gagner en qualité. Sur ces enjeux à la fois sensibles et urgents, les risques de biais sont à la hauteur des attentes, comme en témoigne une intervenante chercheuse : « *Quand on est sollicités par des collectivités, par exemple, on marche sur des œufs : on a peur de fournir des résultats qui ne seraient pas fiables* », face à des décideurs toujours friands de préconisations fiables et simples.

Les progrès en cours devront venir aussi bien de ceux qui produisent des connaissances toujours plus fiables et « appropriables », que des utilisateurs qui sont appelés à maîtriser leurs conditions de fiabilité.

3. L'exemple des Technosols : de la terre aux modèles, des modèles aux applications

Les Technosols construits sont un exemple de solution visant à faire face au besoin de sols disposant de fonctionnalités suffisantes pour répondre à une diversité de besoins, notamment en ville.

Ces sols artificiels sont élaborés à partir de matériaux recyclés ou exogènes, afin de reproduire les fonctions des sols naturels. Les Technosols répondent aux objectifs de la loi Climat et Résilience et du ZAN (Zéro Artificialisation Nette), en s'inscrivant par exemple dans des démarches de désimperméabilisation des surfaces urbaines et de restauration écologique : suppression de couches de bitume ou d'asphalte pour les remplacer par des sols perméables – sols naturels ou Technosols. Ces derniers peuvent aussi pallier l'insuffisance de sols naturels fonctionnels comme substrat de végétalisation en ville. D'une façon générale, ils permettent de recréer des sols fertiles en milieu urbain tout en optimisant l'usage de ressources locales et en limitant les impacts environnementaux.

Les sols imperméabilisés du fait de l'urbanisation perdent en effet une grande partie de leurs **fonctions écologiques** : réduction des échanges gazeux, perte de biodiversité, diminution de la capacité de rétention d'eau et uniformisation des paysages. Les Technosols construits offrent une opportunité de restaurer certaines de ces fonctions en imitant la stratification (« horizons » des sols) et les propriétés physico-chimiques des sols naturels. Pour cela, les matériaux sont triés, analysés et mélangés pour former des horizons ayant des propriétés spécifiques requises en fonction des usages prévus, concernant leur densité, leur pH, leur teneur en matière organique, etc.

Ces Technosols peuvent être adaptés à divers usages urbains : espaces verts, toitures végétalisées, parcs et agriculture urbaine. Dans tous les cas, **leur composition et leur structure doivent être soigneusement modulées** selon les conditions pédo-climatiques locales, les matériaux disponibles et les objectifs (végétalisation ornementale, agriculture urbaine, espaces récréatifs...). Par exemple, pour la construction de toitures végétalisées, le Technosol doit rester assez léger donc peu épais ou peu dense. Des matériaux tels que des briques concassées ont été utilisés pour le drainage, tandis que des mélanges organiques comme le compost ou le marc de café sont intégrés pour favoriser la croissance des plantes.

Du fait de leur composition initiale, ou de mécanismes d'évolution dont la connaissance reste à approfondir, les Technosols peuvent être exposés à des **risques de contamination** par des métaux lourds ou des microplastiques issus des matériaux utilisés dans leur construction. Ces contaminations soulèvent des questions sur l'utilisation de ces sols pour des activités comme l'agriculture urbaine, où les normes sanitaires doivent être strictement respectées.

La **biodiversité des sols** est un autre enjeu majeur pour la réussite des projets de renaturation urbaine. Les Technosols doivent ainsi soutenir non seulement la croissance des plantes, mais aussi la diversité des micro-organismes et des animaux qui composent les écosystèmes souterrains. Cette dimension reste peu étudiée. La colonisation des Technosols par la biodiversité peut prendre plusieurs années avant de se stabiliser. Les expériences montrent que la présence de vers de terre, par exemple, peut être difficile à obtenir dans des environnements artificiels comme des toitures végétalisées. Cette colonisation dépend de la qualité des substrats créés, mais aussi de la connectivité des espaces dont font partie les Technosols (trames brunes, vertes...).

De nombreuses questions se posent ainsi concernant la préservation de la biodiversité des Technosols : « *comment l'intégrer en amont et en aval ? Comment la caractériser, la mesurer, la suivre ? Le nombre d'espèces présentes est-il un critère suffisant, ou en faut-il d'autres ? Comment intégrer aussi le souhait d'éviter le développement d'espèces invasives ? Comment adapter le niveau de préservation* »

de la biodiversité en fonction des objectifs ? Par exemple, les enjeux de fertilité ou de risques sanitaires ne sont pas les mêmes pour de la production alimentaire ou de la production ornementale. »

Les Technosols sont encore un **domaine de recherche émergent**. La plupart des études se concentrent sur des environnements contrôlés en laboratoire, et il reste beaucoup à apprendre sur leur comportement à long terme et dans des contextes réels. Une partie des enjeux pour la recherche se situe donc dans l'approfondissement des connaissances en ce sens. Une autre piste consiste à développer des guides de bonnes pratiques pour la conception, la gestion et le suivi des Technosols, avec des indicateurs au meilleur niveau de l'état de l'art pour mesurer la biodiversité, la fertilité, la capacité de ces sols à stocker et filtrer l'eau, etc.

On le voit, la conception et la gestion des Technosols impliquent une **approche multidisciplinaire**, associant des pédologues, des écologues, des biochimistes et des gestionnaires urbains.

Exemple : Le projet SITERRE³³

Projet financé par l'ADEME entre 2010 et 2015
Enjeu : développer des méthodologies de production de sols fertiles en milieu urbain à partir de matériaux recyclés, comme des déchets industriels et urbains.

Les chercheurs se sont basés sur le Catalogue européen des Déchets pour identifier et sélectionner les divers matériaux pouvant entrer dans la composition des Technosols.

Sur les 836 déchets recensés, 27 ont été présélectionnés, puis 11 ont été retenus (6 matériaux minéraux et 5 organiques ou organo-minéraux).

Objectifs :

- développer des modèles de prédiction de la fertilité des mélanges,
- évaluer et contrôler les risques pour la santé des personnes et l'environnement,
- créer un outil d'aide à la décision,
- proposer la mise en place d'une nouvelle filière.

Cinq contextes d'usage ont été identifiées comme présentant des opportunités fortes pour la construction de sols fertiles (squares et parcs, accompagnement des bâtiments publics, arbres d'alignement, etc.). Pour chaque usage, un niveau de fonctionnalité optimal du sol à construire a été défini, renvoyant à divers paramètres.

75 mélanges, associant deux ou trois matériaux, ont été testés dans diverses conditions de laboratoire et sur sites. Des évaluations

³³ Source : Intervenant GT, et VIDAL-BEAUDET Laure, « Une méthode d'écoconstruction de sols fertiles pour la ville : le programme SITERRE », revue *Pour*, 2018/4 N° 236, p.79-86.

de l'innocuité des mélanges et des sols pour l'homme pour l'environnement ont également été menées.

Enfin, un **outil multicritère d'aide à la décision** pour accompagner l'élaboration et la mise en place de Technosols a été conçu, prenant en compte les contraintes techniques, économiques et sociétales pour un usage donné de sol.

Le projet SITERRE a permis de démontrer l'intérêt des Technosols comme solutions alternatives à la consommation de ressources naturelles pour l'aménagement d'espaces végétalisés en milieu urbain. Un ouvrage synthétise les résultats, ainsi que les perspectives de mise en place d'une filière dédiée et de son acceptabilité, du cadre réglementaire et des enjeux de communication associés.

Un nouveau projet, SITERRE 2 (2022-2026)³⁴, prolonge le premier, en s'orientant davantage vers les expérimentations en conditions réelles, l'aide à la décision et la construction de la filière.

Les Technosols représentent une innovation importante face aux défis de la désimperméabilisation et de la renaturation. Des recherches supplémentaires sont cependant nécessaires pour mieux comprendre leur comportement à long terme et leurs impacts environnementaux et sur la santé humaine, dans divers contextes urbains.

³⁴ Porteur : Plante et Cité. Partenaires : BRGM, IFSTTAR - Université Gustave Eiffel, Institut Agro - Agrocampus Ouest (EPhor), Université Lorraine - INRAE - GISFI (Laboratoire Sols et Environnement), UNEP. Financeurs : Ademe (AAP Graine), Région Pays de la Loire.

Mobiliser et outiller les acteurs de la ville régénérative



Les connaissances et les savoir-faire innovants développés plus haut contribuent à répondre à la question de l'amélioration de l'offre de nature en ville : conditions de pertinence, etc. Il importe aussi de travailler sur la **demande socio-économique (au sens large) de nature en ville** : quelles sont les conditions de pertinence politiques, juridiques, économiques, sociales, qui feront de la société un environnement favorable au développement de la nature en ville ? Cette question a été abordée de façon moins approfondie que la précédente, mais le Groupe de travail a néanmoins évoqué un certain nombre de pistes.

1. Comprendre et accompagner la transformation des systèmes d'acteurs

REVISITER LES FRONTIÈRES DES ÉCOSYSTÈMES URBAINS

Le développement de la nature en ville entraîne d'importantes modifications des dynamiques socio-économiques, environnementales et politiques de l'espace urbain. Il appelle notamment des recompositions majeures des écosystèmes territoriaux, qui passent par une redéfinition des rôles et du positionnement de leurs divers acteurs. Pouvoirs publics locaux, acteurs économiques, associations et citoyens, chercheurs et experts sont amenés à intégrer de nouveaux critères dans leurs missions et actions, et à se coordonner différemment face au défi inédit de concevoir autrement l'aménagement et le fonctionnement de la ville. Apparaissent de ce fait des frottements, voire des contradictions, qui rendent nécessaires des processus d'ajustements. Ceux-ci sont évidemment complexes, dans la mesure où ils bousculent des réalités établies : identités, règles, modèles économiques, etc.

Ces enjeux de recomposition des écosystèmes liés au développement de la nature en ville sont illustrés, par exemple, par la **thèse de Julie Lombard-Latune**, soutenue en 2018.

J. Lombard Latune, « La compensation écologique : du principe de non-perte nette de biodiversité à son opérationnalisation. Analyse de l'action collective »³⁵

La thèse analyse les dynamiques d'acteurs impliqués dans la mise en œuvre de la compensation écologique, à travers trois projets de lignes ferroviaires à grande vitesse (LGV). Elle met en évidence une série d'inadéquation entre les objectifs visés (limitation des impacts écologiques, et notamment « non-perte nette de la biodiversité ») et les logiques d'acteurs en présence.

Exemples :

Inadéquations temporelles : par exemple, les cadres de la gestion foncière ne permettent pas de mettre en œuvre des mesures compensatoires suffisamment amont. La pérennité de ces mesures est également insuffisante : stabilité des structures porteuses, façon dont sont assurées les missions de suivi et de contrôle...

Inadéquations d'échelle : les sites de la compensation sont de trop petite taille par rapport aux espaces d'impact.

Inadéquations organisationnelles : cohérence entre les missions et les responsabilités (une entreprise commerciale propriétaire d'un site n'ayant pas pour vocation première de préserver la biodiversité sur celui-ci), moda-

35 Thèse de doctorat en géographie, soutenue à l'Université Paris Saclay le 20.12.2018 sous la direction de Nathalie Frascaia Lacoste et de Harold Levrel.

lités de contractualisation entre acteurs, etc. La thèse met ainsi en lumière les limites de la mise en œuvre de la compensation écologique en tant qu'outil de préservation de la biodiversité dans le cadre des projets d'infrastructure, limites liées à des problèmes de cohérence et de coordination au sein du système d'acteurs.

D'autres exemples, plus opérationnels, portent sur la façon dont les écosystèmes existants, et notamment les filières économiques, sont prises en compte dans les projets de recherche visant à développer des solutions urbaines fondées sur la nature. Enjeu : mieux les connaître et accompagner leurs mutations dans le cadre du changement de modèle que représente le développement de la nature en ville, pour de meilleures conditions d'appropriation et de mise en œuvre. Deux exemples.

Le **projet GreenStorm**, lauréat de l'Appel à projet 2022 du Partenariat européen 2022, est dédié à la conception et au déploiement de solutions naturelles pour les eaux de ruissellement, pour des villes résilientes et agréables à vivre³⁶. Il aborde la question de la mise en œuvre des solutions fondées sur la nature pour la gestion des eaux pluviales urbaines, de leur performance et de leur résilience pour les extrêmes climatiques actuels et futurs. L'objectif est d'identifier des solutions efficaces, ainsi que des leviers pour favoriser leur mise en œuvre à l'échelle de la ville et maximiser les bénéfices associés.

Au-delà des dimensions scientifiques et techniques sur les bénéfices et impacts hydrologiques, thermiques, chimiques etc., une partie du projet porte sur l'acceptabilité des solutions recherchées et les conditions de leur diffusion, à travers cinq cas d'agglomérations européennes.

L'un des enjeux du projet est ainsi de de « *faire dialoguer et accompagner les parties prenantes pour développer des conceptions innovantes de ces SfN, à la fois performantes, résilientes et acceptables (services techniques, riverains...)* », et de « *dialoguer avec les collectivités pour aboutir à des conceptions plus adaptées aux contextes locaux* ». Le projet doit permettre « *l'expérimentation d'approches plus collaboratives pour la mise en œuvre des SfN dans les projets d'aménagement* ».

36 *Projet GreenStorm, Design and deployment of stormwater nature-based solutions (NBSSW) for resilient and livable cities (2024-2026)* - <https://arceau-idf.fr/en/projects/greenstorm>

14 partenaires de 5 pays (Danemark, France, Grèce, Italie et Suède), dont 7 partenaires académiques (pour la France : Ecole des Ponts ParisTech, Cerema, et Université Gustave Eiffel), 6 collectivités (pour la France : département de la Seine-Saint-Denis, Ville de Paris) et une PME.

On peut aussi citer le **projet SITERRE 2** (2022-2026)³⁷, porté par Plante et Cité (voir l'encadré sur SITERRE 1 en partie précédente). Cette deuxième étape développe des travaux orientés, comme son intitulé l'indique, « Vers une filière éco-efficace de valorisation de déchets et sous-produits industriels ou urbains pour développer des sols fertiles ». L'enjeu est de finaliser un outil prédictif d'aide à la décision basé sur les études et modélisations de mélanges de matériaux. Cet outil est basé sur des analyses multicritères et des études de cas sur des sites pilotes ; au-delà des dimensions liées aux matériaux et aux impacts environnementaux, ces analyses intègrent des dimensions socio-économiques de coût et d'acceptabilité. Parallèlement, une enquête a été menée auprès des professionnels de la filière pour comprendre les pratiques actuelles de construction de sols et l'évolution des sols construits.

On le voit, interagir avec les filières économiques et plus largement, les écosystèmes urbains, est un enjeu bien identifié dans le cadre des projets et pistes de recherche. Davantage qu'un simple souci de communication sur des évolutions en cours ou sur des résultats, il s'agit **d'impliquer les communautés urbaines** dans les changements auxquels elles vont avoir à s'ajuster dans le cadre de la naturation de la ville.

CO-CRÉER LA NATURE EN VILLE AVEC SES HABITANTS

Parmi les communautés concernées par la naturation de la ville, se trouvent bien sûr les habitants. Les modalités de leur implication dans les transformations urbaines sont explorées depuis longtemps par de nombreux chercheurs et innovateurs socio-urbains. Sans prétendre à un état global des pratiques et des perspectives en la matière, on peut citer quelques pistes évoquées dans le cadre du GT.

Une participante rappelle tout d'abord que les **sciences humaines et sociales** ont vocation à être en première ligne sur ce champ de la participation citoyenne. « *Comment sont pris en compte les comportements sociaux dans la mise en œuvre et la gestion de la végétalisation ? Végétaliser mieux, c'est peut-être aussi prendre en compte les utilisateurs, les habitants. Ne manque-t-il pas un lien entre les équipes d'ingénieurs en charge de tous ces travaux et aménagements, et des équipes de SHS qui devraient y participer ?* », interroge-t-elle à la suite d'une présentation des travaux du Lab Recherche Environnement, impliquant trois écoles d'ingénieurs aux côtés de Vinci. En réponse, un membre du Lab acquiesce tout en rappelant que les partenaires du Lab n'étant pas spécialisés en SHS, les dimensions sociales sont prises en compte dans une certaine mesure, et appelleraient certainement des approfondissements.

37 https://www.plante-et-cite.fr/projet/fiche/79/siterre_ii_vers_une_filiere_eco_e

Des travaux portent ainsi sur des **questions de comportements et de représentations sociales** en lien avec le développement de la nature en ville.

Par exemple, une thèse en cours sur les jardins domestiques a notamment pour objectif de déterminer quelles sont les pratiques qui tendent à accroître le sentiment de connexion à la nature chez les propriétaires de jardins, un levier potentiel pour augmenter le comportement pro-environnemental des urbains. Pour aller plus loin, le Lab a prévu le lancement d'un appel à manifestation d'intérêt en direction de la communauté SHS, afin de compléter son expertise, en particulier sur les questions de sobriété.

Au-delà d'une mobilisation du champ disciplinaire des SHS, une piste importante de progrès réside dans les approches de co-construction et de co-création des innovations urbaines avec les habitants. Divers dispositifs proposent des cadres pour la mise en place et la conduite de ces approches. Parmi ceux-ci, un intervenant appelle à « *poursuivre le développement de **laboratoires vivants** » », avec l'objectif de « *faire de la recherche autrement et que cette manière de faire de la recherche soit reconnue* ».*

Un exemple de participation citoyenne à travers un *Living Lab* a été présenté dans le cadre du GT par **l'association Dédale**.

Fondée en 2002, Dédale se présente comme une agence d'innovation urbaine et sociale qui intervient sur des questions d'urbanisme, de nature en ville, d'aménagement, de mobilité, mais aussi de culture et d'éducation, en plaçant les citoyens au cœur de ses projets.

Les activités de Dédale comprennent la gestion de projets, la recherche et l'expérimentation, la création d'événements artistiques, les études et l'assistance à maîtrise d'ouvrage pour les collectivités locales. A une dimension activiste, avec des actions comme une *Guérilla Gardening*, a succédé une approche d'« urbanisme tactique », qui privilégie les modifications progressives et expérimentales en vue de changements permanents. Par exemple, un événement « Parking Day » a été suivi d'un projet avec la Ville de Paris pour tester des usages innovants des zones de parking : transformation d'espaces de 8 mètres carrés en zones de revégétalisation ou en espaces partagés innovants, sur six mois.

Dédale gère aujourd'hui le **Rosa Lab**, un tiers-lieu de 300 m² lié à un jardin partagé de 600 m², situé dans le nord-est parisien (19^{ème} arrondissement). Cet espace et le quartier environnant est labellisé **Smart City Living Lab** par le label européen EnoLL, soutenu par la Commission européenne, qui met l'utilisateur au centre d'un projet de recherche en collaboration avec les autres parties prenantes (collectivités territoriales, laboratoires, secteur privé). Le Living Lab est ainsi défini comme « un espace de recherches et d'expérimentations sur la ville durable et innovante, où le citoyen, l'utilisateur, est au centre des préoccupations et donc des projets que nous proposons ». Dans ce cadre, se posent les questions sui-

vantes : quels sont les intérêts des habitants pour le projet ? Quel est le contexte géographique et socio-économique ? Quelle typologie d'habitants peut (ou doit) être impliquée dans le projet (familles, personne sans emploi, communautés issues de l'immigration, étudiants...) ? Comment ?

Un nouveau projet est en cours de mise en place : un **Living Lab français pour la Mission Soil** de la Commission européenne (Programme Horizon Europe), en collaboration avec le CEREMA, la Ville de Paris, et le Transformateur à Saint-Nicolas-de-Redon. Ce nouvel espace d'innovation ouverte permettra d'étudier et d'expérimenter la participation citoyenne dans la renaturation des sols urbains, notamment sous des angles juridiques, sociaux et économiques.

Expérimentations partagées, ateliers participatifs, initiatives inclusives... Les démarches de co-création d'espaces urbains (re)naturés permettent de poser les jalons d'une ville plus « verte » avec et par les habitants – condition nécessaire pour une transformation durable. Accompagnées par la recherche en SHS, ces démarches représentent de véritables laboratoires *in vivo* de la nature en ville. Plus largement, la place des sciences humaines et sociales peut être renforcée dans les projets urbains et dans des projets de recherche plus interdisciplinaires dans ce domaine.

ASSURER UNE MONTÉE EN COMPÉTENCE DE L'ÉCOSYSTÈME

Pour chaque élu local, chaque président d'association impliqué dans la préservation ou le développement des territoires urbains, chaque responsable d'entreprise impliqué dans des opérations urbaines, se pose aujourd'hui la question du niveau de compétence nécessaire quant aux enjeux, méthodes et usages de la nature en ville. Le dialogue entre chercheurs et décideurs y gagnera autant en qualité qu'en sérénité.

Sur des enjeux à la fois sensibles et urgents, en effet, les risques de biais sont à la hauteur des attentes de décideurs toujours friands de préconisations fiables mais aussi (surtout ?) simples. Souvent, par exemple, les agences d'urbanisme se tournent vers des outils qui se basent sur des mesures trop limitées (exemple, la température a été mesurée à 15h et le résultat est pris comme base moyenne) ; « *les écarts entre les modèles et les réalités constatées ont été de mauvaises surprises pour les collectivités, qui maintenant ont peur* ».

Un autre intervenant le souligne : « *Les élus se saisissent très vite des outils de vulgarisation, avec toutes les bêtises que cela peut engendrer, du fait de la non-prise en compte de nombreux paramètres* ». Et de citer l'exemple d'une place à Nantes, au pied de la Loire, orientée vers des vents dominants qui offrent toutes les conditions pour un rafraîchissement urbain naturel ; mais la dimension aérodynamique n'ayant pas été prise en compte dans le projet d'aménage-

ment, cette possibilité a disparu derrière les seules représentations thermiques.

On peut mentionner aussi l'appétence des élus pour la plantation d'arbres en ville : cette action concrète, visible par les citoyens et qui leur paraît relativement simple, peut être une porte ouverte à de nombreux non-sens écologiques et économiques dès lors que ses conditions de faisabilité ne sont pas soigneusement étudiées. A été mentionné le cas le cas de huit ormes importés des Pays-Bas après une croissance de 15 ou 20 ans, et replantés sur une place du Sud de la France, pour un coût total de 300 000 euros (ormes + équipement des fosses), auxquels on peut ajouter en amont 1,8 M de travaux pour la création des fosses.

Il est donc essentiel qu'au-delà de la production par les chercheurs de connaissances nouvelles ou de l'amélioration de celles qui existent, les nombreux utilisateurs qui sont appelés à se les approprier apprennent à les comprendre et les mettre en œuvre en respectant leurs conditions de validité.

A cet égard, de fortes disparités existent au sein des écosystèmes urbains. Du côté des collectivités locales, « *on ne peut pas parler de 'la' ville, mais 'des villes' car elles sont très diverses, sur de nombreuses dimensions. Elles ont aussi des **niveaux de compétences très variables** : certaines en ont déjà beaucoup, avec d'importants services dédiés, d'autres beaucoup moins, soit parce qu'elles sont plus petites, soit parce qu'elles ont moins investi ces nouveaux sujets ; cela conduit à des degrés d'appropriation très divers des enjeux, des objectifs, des outils.* »

Les collectivités commencent à être conscientes de l'importance des besoins en compétences, comme en témoigne une intervenante. Lors des programmes POPSU et de la mise en place d'un Observatoire sur les enjeux de chaleur urbaine, lorsque les responsables appelaient des collectivités pour leur demander si elles voulaient venir partager sur ces sujets, « *certaines ont demandé si elles pouvaient venir accompagnées d'un chercheur – alors que c'était même la règle du jeu...* ». Dans certains cas, les collectivités disposent de compétences en interne, mais qui restent trop « silotées » et donc difficiles à mobiliser dans de bonnes conditions.

Trouver les bons formats de communication et de formation est donc un enjeu clé, afin que des décideurs publics et privés s'approprient des repères suffisants pour que leurs initiatives soient cohérentes avec l'état de l'art scientifique, technologique et social.

Un intervenant estime ainsi qu'« *il faut se demander comment mettre ces outils dans un contexte qui les rend utilisables par des parties prenantes très diverses, des chercheurs jusqu'à la société civile : une diffusion à 360° est nécessaire puisqu'il s'agit de sujets essentiellement sociétaux. L'enjeu est d'avoir une approche vraiment systémique, qui ne se limite pas aux sciences « techniques » mais inclue les SHS.* »

Parmi les modalités d'appropriation intéressantes, on peut donner l'exemple d'un **serious game** développé à la suite de la thèse de Julie Lombard Latune sur **l'organisation des acteurs de la compensation écologique**, évoquée plus haut (« Repenser le design des écosystèmes Ville-Nature-Société »). Autour de l'objectif de maintien de l'état écologique d'un territoire, une diversité d'acteurs se positionnent et interagissent : agriculteurs, forestiers, maires, associations, promoteurs... Des aménagements divers sont proposés, donnant lieu à des évaluations de l'atteinte à la biodiversité ; les acteurs peuvent suggérer des mesures de compensation, ajuster leurs propositions, etc.

Autre exemple opérationnel : les objectifs et des limites identifiés par la recherche peuvent être « traduits » sous forme d'indicateurs clés, faciles à intégrer par les acteurs. Un intervenant cite **la règle des « 3 – 30 – 300 »** développée par l'Université de Colombie-Britannique³⁸ : chaque citoyen devrait voir 3 arbres par sa fenêtre, avoir 30 %, de couvert arboré dans son quartier et être situé à moins de 300 m d'un espace vert de haute qualité. Une étude a été menée à Barcelone sur l'impact sur la santé humaine de la cartographie issue de cette règle. Cela pourrait être appliqué en France, en attendant d'avoir davantage de données et de repères opérationnels.

Un autre outil moins ponctuel d'accompagnement des acteurs est **l'Assistance à Maîtrise d'Usage (AMU)**, évoqué par une participante doctorante. Cette approche, utilisée dans le domaine de la formation d'adultes, consiste à **intégrer les apprenants dans toute l'ingénierie de leur futur dispositif de formation**³⁹.

À la fois démarche, méthode et mission professionnelle, l'AMU regroupe des disciplines et compétences issues des sciences humaines et sociales (sociologie, psychologie sociale, anthropologie, etc.), de l'éducation populaire, du design, de l'architecture, de l'aménagement spatial, de l'ergonomie, du coaching... Sur le terrain, l'accompagnement implique toutes les parties prenantes - habitants et professionnels - afin que les usagers aient véritablement leur place et puissent être acteurs de leur cadre de vie bâti, notamment en tissant des liens avec l'expertise technique. Toutes les phases du cycle de vie de la production immobilière et tous les types de bâtiments collectifs sont concernés.

38 <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969723063660>

39 Karine Sautereau, *La co-construction de dispositifs de formation favorisant la transition écologique au sein des organisations. Impact(s) de la maîtrise d'usage sur l'engagement des apprenants en formation*, thèse de doctorat en science de l'éducation et de la formation sous la direction de Sandra Enlart - Equipe Cref-ApForD, Université Paris Nanterre, thèse Cifre au Centre-Inffo.

Cette approche est aujourd'hui reconnue pour sa contribution à la transition écologique, à la dynamique collective et au développement durable des territoires⁴⁰.

Développer des méthodes innovantes de partage des connaissances sur les enjeux de la nature en ville au sein des écosystèmes urbains, les diffuser, les évaluer : cette piste de travail est clairement prioritaire pour rapprocher des savoirs qui évoluent rapidement et de considérables besoins d'application de ces savoirs dans des conditions maîtrisées.

2. Réinventer les référentiels et les modalités de l'action publique

REPENSER LES POLITIQUES D'URBANISME ET D'AMÉNAGEMENT

Les politiques d'aménagement urbain et d'urbanisme sont bien sûr directement concernées par les enjeux de développement de la nature en ville. Ces enjeux ont été pris en compte depuis des décennies, selon des référentiels qui ont beaucoup évolué et dont l'histoire fait l'objet de nombreux ouvrages. Une première remarque : cette histoire conditionne largement les trajectoires actuelles et futures, il est donc important de la connaître, d'en comprendre les ressorts et de s'appuyer sur elle pour envisager les bifurcations à venir, y compris dans leurs dimensions les plus technologiques.

L'objectif n'est pas ici de résumer ces savoirs historiques mais de pointer quelques-unes des questions clés qui se posent aujourd'hui à ces politiques urbaines, concernant la nature en ville, et qui ont été évoquées dans le cadre du GT.

Quelles priorités ?

Développer la nature en ville soulève des questions complexes, nécessitant de concilier des priorités et des objectifs parfois contradictoires.

L'un des exemples les plus évidents est aujourd'hui celui qui découle de la **politique de Zéro Artificialisation Nette**. Le ZAN vise à freiner l'étalement urbain pour préserver les sols naturels et agricoles, en favorisant la densification des villes. Cela implique de privilégier la construction en hauteur ou la réhabilitation d'espaces déjà urbanisés. Or, **densifier la ville** pour répondre aux besoins en logements et en infrastructures, dans nos cités où l'espace est souvent compté, **peut amener à réduire l'espace disponible pour la création d'espaces verts et naturels en ville**. Les arbitrages à faire en termes de politique foncière et d'usage des sols sont donc particulièrement délicats.

On retrouve ici la difficulté de dégager des solutions opérationnelles à la fois pertinentes et acceptables, pour des équations complexes faisant intervenir un grand nombre de paramètres de nature différente – techniques, politiques, économiques, sociaux, etc.

L'exemple des friches, déjà évoqué en première partie, illustre bien cette tension, dans la mesure où il s'agit d'espaces intermédiaires entre ville et nature et qui appellent donc arbitrage quant à la façon dont la collectivité les considère et ce qu'elle souhaite en faire, comme l'a bien montré un intervenant.

Plusieurs bases de données permettent de cartographier ces friches : Cartofriches (CEREMA), POGEIS (Fondation pour la recherche sur la Biodiversité). En Ile-de-France, on compte 2721 friches potentielles, et 776 friches en petite couronne dont Paris, dans 728 communes. Leur superficie va de 100 m² à 185 ha. *« L'enjeu pour la recherche est de mieux les caractériser, de faire des inventaires du vivant, pour arbitrer sur le fait de savoir si on les utilise au titre de la densification ZAN, ou plutôt comme des espaces de nature à préserver ; dans ce cas, ils n'ont pas forcément besoin d'être « renaturés », même s'ils peuvent sembler délaissés, abandonnés, sauvages, mais n'est-ce pas cela aussi, la nature en ville ? »*

Un autre exemple bien connu est celui de la gestion de l'eau en ville (et au-delà). Là encore, **les représentations et les usages de l'eau sont multiples et souvent conflictuels**, pour une ressource de plus en plus en tension. De nombreux arbitrages vont être requis, entre la ville et d'autres milieux, et, en ville, entre une diversité de besoins domestiques, urbains, industriels, etc. Le développement de la nature en ville est porteur de nouveaux besoins qui devront composer avec d'autres, dans le cadre de choix collectifs complexes.

Quels ordres de grandeur ?

Parmi les critères à prendre en compte dans le cadre des arbitrages à effectuer, les ordres de grandeur sont à considérer soigneusement. Lorsque l'on est en face de questions multi-dimensionnelles, il est important de disposer de repères globaux quant aux impacts probables des choix à effectuer.

Une intervenante cite l'exemple de la végétalisation de la ville de Paris. La municipalité a fixé des objectifs clairs de végétalisation pour la mandature : 100 hectares à végétaliser, 170 000 arbres à planter. *« Cela s'effectue en priorisant les rues, les quartiers. Il y a bien sûr des questions de proportion : désimperméabiliser / végétaliser 100 m² sur une rue de 1000 m² de surface, cela ne pose pas de problème ; en revanche, si l'on parle de 900 m² sur la même rue, on peut se trouver en face de risques de fragilisation du sous-sol, du fait de la forte présence de gypse dans une bonne partie du sous-sol parisien ».*

⁴⁰ Voir le Livre Blanc de l'AMU. Remettre l'humain au cœur du cadre de vie bâti, financé par la Banque des Territoires, l'IFPEB, Kardham, Smart Use, Ville et Aménagement Durable, 2020 : <https://www.re-cipro-cite.com/UPLOADS/PAGES/14/DOCS/reciprocite-756382-le-livre-blanc-de-lamu.pdf>

Quelles formes urbaines ?

Toute la façon de « donner forme » à la ville peut être remise en question lorsque l'on s'attache à prioriser la nature en ville : on est là au cœur du travail des aménageurs et des urbanistes, qui proposent des **designs urbains plus ou moins favorables aux solutions fondées sur la nature.**

Quelques exemples illustrent comment la configuration d'une rue, d'un quartier, d'une ville peut être en soi une solution basée sur la nature.

Un intervenant rappelle que « *l'organisation des bâtiments au sein des quartiers, leur forme, leur hauteur etc. sont des sujets de recherche importants.* » Citant une synthèse de 109 articles scientifiques réalisée par le PUCA et le MNHN⁴¹ sur les rapports entre formes urbaines et biodiversité, il souligne qu'il est important de conserver des connectivités entre de petits parcs et des rues arborées par exemple. L'étude note aussi les lacunes en connaissances sur l'impact des formes urbaines et biodiversité.

Et de poursuivre : « *A l'échelle du projet, il y a aussi un boulevard d'innovation devant nous sur la prise en compte des sols à l'échelle du projet.* » Le réflexe classique des aménageurs est de tout raser au moment du chantier, puis de replanter de nouveaux espaces verts. Privilégier la nature en ville voudrait qu'on fasse l'inverse : insérer les bâtiments dans l'existant – ce qui suppose au passage une bonne connaissance des sols en amont du projet. C'est ce qui a été fait, note-t-il, dans un projet de ZAC de la Courrouze à Rennes, avec un paysagiste, Charles Dard, qui a travaillé sur une évaluation préalable de la qualité des sols. Cela a permis d'anticiper les zones de gestion des eaux pluviales, de jardins partagés etc., moins polluées et plus fertiles.

Un autre intervenant mentionne **deux exemples liés au rafraîchissement urbain :**

Intervention en tant que bureau d'étude sur la ZAC Arenas à Nice, pour reprendre un projet que la maîtrise d'ouvrage souhaitait orienter vers une direction plus écologique.

Les études bioclimatiques existantes préconisaient la mise en place de pavés à rétention d'eau pour restituer de la fraîcheur – ce qui posait question pour une ville où il pleut peu. La découverte d'études plus anciennes a permis d'identifier des données aérauliques montrant l'existence d'un vent urbain descendant du Mercantour et pouvant venir rafraîchir ce quartier. Le nouveau plan masse du quartier a donc été conçu pour qu'il puisse bénéficier de cette solution low-tech, naturelle.

La question des « rues canyon » : La politique ZAN peut amener à ajouter à construire en hauteur, pour densifier la ville (exemple du PLU bioclimatique de Paris). Mais si des études poussées ne sont pas menées quant à l'aménagement de ces rues sous l'angle de leur végétalisation par exemple, les effets bioclimatiques de ces rues peuvent être délétères : accumulation de chaleur, circulation limitée de l'air et de la pollution... Il faut donc analyser une diversité de dynamiques afin de les concilier au mieux : croisement des trafics routiers, des vents, des formes urbaines, de la porosité du bâti. Il faut parvenir à utiliser le végétal non pas pour freiner mais plutôt pour guider le vent de façon optimale dans ces espaces urbains.

Quelles réglementations ?

Lorsque la recherche a permis d'esquisser des pistes de solutions pour développer la nature en ville, un enjeu essentiel pour que les innovations puissent voir le jour et perdurer est l'adaptation de la réglementation existante, souvent conçue pour d'autres cadres d'organisation et de fonctionnement urbains. Même si cette dimension a été peu développée dans le cadre du GT, une piste de travail importante a été esquissée : le besoin d'une recherche interdisciplinaire permettant de **traiter sous l'angle du droit des enjeux socio-techniques majeurs tels que ceux qui se rapportent aux sols, à l'eau, au bâti, etc.**

La réglementation relève de cadres juridiques formels avec leur langage propre, leur codification spécifique, mais elle doit aussi s'ouvrir, par la recherche notamment, au besoin d'un accompagnement plus proactif d'enjeux tels que le développement de la nature en ville.

Il est par exemple nécessaire de transcrire dans des documents d'urbanisme et d'aménagement des seuils (ou autres conditions) issus des travaux scientifiques qui permettent de mieux qualifier des réalités telles que les sols, les végétaux, les eaux, etc. Le CEREMA a commencé à travailler sur la caractérisation des sols avec sa méthodologie MUSE (données biophysiques). A partir de là, un intervenant a travaillé sur l'évaluation des scores de pleine terre, avec divers gradients que l'on peut aujourd'hui qualifier, sur le territoire du centre de la commune de Saint-Germain-en-Laye⁴². L'objectif est de protéger ce qui existe déjà et de **l'intégrer dans les documents d'urbanisme.** Ces travaux ont aussi fait émerger un besoin de vérification des données cartographiques sur le terrain.

Un autre exemple développé par un intervenant renvoie à un **besoin de souplesse dans l'application des normes** concernant les solutions « vertes », dont

41 Morgane Flégeau, sous la direction de P. Clergeau, H. Soubelet et S. Carré, *Formes urbaines et biodiversité : un état des connaissances*, PUCA – MNHN, 2020.

42 Projet tutoré d'étudiants du master BEE Paris-Saclay : Danna Araujo Arias, Antoine Vallée, Solène Quéinnec, Clément Parant.

la variabilité est par nature plus importante que les solutions « grises ». Face à cette variabilité, (cf. première partie), comment répondre à des contraintes réglementaires par définition rigides ?

« Chaque commune et chaque agglomération a sa propre réglementation. Elle impose de respecter certains seuils : retenue de tant de mm en cas de pluie, débit maximal, etc. Mais face à la double variabilité spatio-temporelle de la pluviométrie d'une part, et des SfN d'autre part (en fonction des conditions initiales dans le temps et de leur agencement dans l'espace), il est compliqué de garantir le respect à 100 % de ces seuils et normes. Des calculs complexes sont effectués pour évaluer le niveau de capacité de respect de ces réglementations : on pourra ainsi estimer qu'on passe de 100 % à 90 % de conformité, par exemple. La reconnaissance de ces marges permettrait de faciliter l'implantation de SfN. »

Les outils réglementaires ont bien sûr aussi des limites. Ainsi, sachant que seulement **10 à 15 % des espaces verts de la ville sont publics, les leviers peuvent être moins directs sur la majeure partie du territoire urbain.** Cela étant, les moyens d'intervention ne sont pas pour autant absents, avec par exemple la possibilité de zonages ou de classements (y compris à partir d'un seul arbre). Beaucoup de collectivités réfléchissent néanmoins à des moyens d'action plus importants sur ces espaces privés. Au-delà de la dimension réglementaire, en effet, des **actions d'information, de sensibilisation et d'incitation** peuvent permettre d'infléchir les décisions et les comportements des acteurs urbains. L'innovation sociale au service du volontarisme politique est un levier qui mériterait d'être plus largement utilisé.

DÉVELOPPER LA GOUVERNANCE MULTI-ÉCHELLE

La gestion d'espaces et de réseaux urbains conçus selon une logique « ingénierale » et technologique s'articulait bien à l'échelle de la ville en tant qu'espace de gouvernance : implantation d'infrastructures « grises », maîtrise du foncier urbain, réglementations locales s'appliquant à l'ensemble des quartiers... Si une coordination était bien sûr nécessaire avec les niveaux de la région et de l'Etat, la répartition des compétences pouvait s'effectuer de façon (relativement) cohérente.

Les SfN, en revanche, s'inscrivent dans des continuités géographiques et temporelles plus larges, et se diversifient au sein d'une grande diversité de conditions locales spécifiques. Les cadres de gouvernance sont appelés à évoluer vers une intégration beaucoup plus poussée des conditions dans lesquelles sont gérés les besoins et les ressources.

Un intervenant développe l'exemple de la gestion de l'eau : « *Un enjeu est d'articuler les différentes échelles spatiales et temporelles, afin de les rendre*

compatibles. Il faut pour cela une gouvernance efficace, globale et intégrée de l'eau ».

Les collectivités locales disposent de cinq compétences liées à l'eau : eau potable ; assainissement ; gestion des eaux pluviales urbaine ; gestion des milieux aquatiques et prévention des inondations ; défense extérieure contre l'incendie.

Ces compétences ont tendance à être mutualisées au sein des intercommunalités (métropolisation). Cette intégration pourrait permettre de penser de façon plus intégrée la multifonctionnalité de l'eau et l'organisation de sa gestion. « *Cependant, cette volonté de transversalité se traduit encore peu dans les faits, avec des réglementations différentes selon les compétences exercées et du fait du fonctionnement en silos des collectivités* », note l'intervenant.

Parmi ces compétences, certaines apparaissent plus favorables au déploiement des SfN, comme la gestion des eaux pluviales ou celle du risque inondation, avec des disciplines associées : hydrologie urbaine par exemple, avec des réseaux d'acteurs déjà structurés. Le contexte est moins favorable pour d'autres compétences comme l'eau potable et l'assainissement, du fait du **poids du paradigme hygiéniste, des enjeux de sécurité et du caractère industriel et commercial de ces services, qui conduit à mettre l'accent sur la valorisation économique de l'eau.**

Là encore, **l'équilibre entre des échelles micro et macro** est une question délicate, avec la nécessité d'interactions « *entre des niveaux de responsabilité et de financement à la fois liés et distincts (mise en place/entretien, eau /espaces verts etc). Il n'y a pas de bonne solution, au-delà d'efforts plus poussés d'intégration des acteurs parties prenantes selon les nouvelles logiques, et notamment les citoyens.* »

Au-delà même de ces cadres de gouvernance qui vont de l'Europe au citoyen, se posent aussi la question de l'absence d'entités à intégrer dans ces gouvernances : en France, souligne l'intervenant, « **on a des masses d'eaux qui sont « orphelines » de gestionnaires ; comment alors agir sur ces masses, ces nappes, en l'absence d'acteurs en charge ?** »

On le voit, l'État, les régions et les collectivités locales doivent collaborer étroitement pour garantir la cohérence de politiques visant à redonner place à la nature en ville, maximiser l'impact de leurs financements et assurer une gestion durable de ces infrastructures vertes. Cette gouvernance multi-échelle est indispensable pour faire en sorte que la gestion des actifs naturels urbains devienne une priorité partagée à toutes les échelles de la ville.

Décloisonner les services et les organisations

Un enjeu plus spécifique mais dont l'impact est souvent souligné est celui de la bonne coordination entre services urbains, qu'il s'agisse de services internes aux collectivités locales ou de services parapublics par exemple.

On l'a abondamment rappelé, les enjeux de la nature en ville sont transverses, du fait de la multi-dimensionnalité des besoins ou questions et de la multifonctionnalité des ressources et des solutions. Or les organisations institutionnelles sont par nécessité segmentées entre domaines faisant appel à des acteurs, des compétences, des règles et des modalités d'action spécifiques. Pour aborder la transversalité de la nature en ville, plusieurs voies sont possibles : **repenser en profondeur les frontières entre services ou institutions, mutualiser un certain nombre d'approches et de moyens, renforcer la coopération entre services...**

Pour des raisons d'inertie propre aux organisations (qui peuvent être par ailleurs gages de stabilité et d'efficacité), ces pistes demeurent insuffisamment exploitées. En l'absence des interactions nécessaires, de nombreuses initiatives ne peuvent être menées à bien dans de bonnes conditions, ou sont limitées dans leur portée et leur impact.

La question est illustrée par une intervenante dans le cadre de la présentation du **zonage pluvial de la Ville de Paris (Plan Paris Pluie)**. La Ville de Paris, rappelle-t-elle, « *est une organisation gigantesque, (...). Quand on commence à parler de co-bénéfices, au-delà des bénéfices purement hydrologiques, on va rencontrer des problématiques de répartition des responsabilités, des financements etc. entre domaines et services concernés. Par exemple, un service des Espaces verts va se demander si c'est à lui seul de payer pour l'entretien d'une bande plantée qui aura des bénéfices pour la gestion des eaux, la protection de la biodiversité, la santé humaine et la qualité de vie, etc. On rencontre donc ces freins à l'intérieur de la collectivité, quand on essaye de développer ce type de solution.* »

Cette question renvoie aux types de compétences disponibles dans les différents services et à la façon dont ils se combinent – ou pas – dans la définition des règles, seuils et approches en matière d'enjeux transverses : « *La question de savoir comment on écrit la règle est importante – elle est actuellement re-posée, en vue d'une mise à jour du zonage.* » Et le besoin d'expertise transversale est également posé : « *Il faudrait évaluer s'il vaut mieux une concentration de sols désimperméabilisés permettant une infiltration plus importante, ou une canalisation débordée qui fuit* » – évaluation qui se trouve en générale dissociée entre les deux risques, dès lors qu'ils relèvent de deux services différents.

3. Modèles économiques : progresser sur la question des valeurs de la nature en ville

UNE RECHERCHE OPÉRATIONNELLE EN SHS QUI SE MOBILISE SUR LE SUJET

La question des modèles économiques du développement de la nature en ville est clairement posée aujourd'hui, en face de l'affirmation de besoins souvent concurrentiels : **qu'est-ce qui a de la valeur en matière de nature dans la ville, pour qui, et comment évaluer et valoriser ces actifs naturels ?** Vivre à proximité d'un beau parc ou d'un fleuve aux berges agréablement aménagées, avoir une vue sur une place arborée... autant d'atouts qui sont pris en compte dans le prix des logements urbains. Ils ne pèsent cependant pas lourd dans les grandes logiques d'aménagement urbain, face aux pressions économiques sur le foncier notamment.

Ces questions n'ont pas été au cœur des travaux du GT, qui a toutefois tenu à en souligner l'importance. A noter que des travaux antérieurs du GT ont permis d'apporter des pistes de réflexion et de solution stimulantes sur ces enjeux au croisement de l'environnemental et de l'économique : on peut notamment citer la présentation de Benoît Boldron, invité à intervenir lors d'une réunion du GT le 23 avril 2023, organisée en partenariat avec l'Académie des Technologies, sur le thème « Ville renaturée et régénérative : des concepts à la réalité, quels enjeux pour la recherche et l'innovation ? »⁴³

Les enjeux se concentrent autour de l'appréciation de la valeur économique des actifs naturels, et sur celle des impacts positifs et négatifs des activités humaines sur les écosystèmes dans toutes leurs dimensions (écologiques, sociales...) :

- **évaluation d'externalités négatives**, pour prise en charge par leurs émetteurs,
- **valorisation d'externalités positives**, pour en créditer des acteurs contributeurs, etc.

Un exemple est celui de la réutilisation des sols pollués. Beaucoup de friches sont laissées à l'abandon car le nouveau propriétaire du site devient celui aussi de la pollution et doit la traiter avant de pouvoir faire un nouvel usage du sol, compte tenu des protocoles d'évaluation des risques sanitaires. Or, il est souvent moins coûteux et plus simple d'artificialiser de nouvelles parcelles (dont des parcelles agricoles) que d'utiliser une friche d'une ancienne installation.

43 Benoît Boldron, maître de conférence et chercheur associé - Université de Toulouse ; et chef de service Habitat public à la Direction Habitat et Opérations foncières - Toulouse Métropole / Ville de Toulouse, *Planification urbaine : quelle valeur environnementale pour une ville contributrice ?*. M. Boldron prend notamment l'exemple de « Six prix pour un cyprès », montrant les variations possibles de prix pour un cyprès, selon le contexte dans lequel il se trouve et les usages qui en sont faits. Il propose des méthodes innovantes de taxation foncière permettant de prendre en compte les contributions environnementales positives ou négatives des projets urbains sur le tissu existant. https://www.anrt.asso.fr/sites/default/files/2024-start/presentation_b_boldron.pdf

Insérer les nouvelles valeurs ainsi définies ou ré-évaluées dans la boîte à outils de l'action publique (normes, taxes, incitations, systèmes de fixation des coûts et tarifs, etc.) est ensuite un défi qui représente en soi un **important champ de recherche technique, socio-économique et méthodologique**.

Là encore, une articulation renforcée entre d'une part, les sciences de la matière, du vivant et de l'ingénieur, et d'autre part, les sciences humaines et sociales, est nécessaire pour que les apports des unes et des autres se combinent pour donner naissance à des **outils de représentation partagée, de régulation et d'incitation** aujourd'hui insuffisants.

On peut penser que sur ces enjeux, des approches croisées intéressantes se développent au niveau européen, dans le cadre de programmes de recherche et de démonstration. Une meilleure vision sur ces travaux, et bien sûr une participation accrue des acteurs français, serait une piste de progrès.

L'EXEMPLE DE L'ÉVALUATION DES COÛTS DE RESTAURATION DES SOLS URBAINS

Une initiative intéressante concernant la problématique de la mesure des coûts en vue d'une « valorisation » économique des actifs de la nature en ville est la recherche menée par des économistes, sur **l'évaluation des coûts de restauration des sols urbains**.⁴⁴

On a déjà évoqué l'importance de sols urbains fonctionnels, capables de fournir une diversité de services écosystémiques. Restaurer les sols urbains dégradés est ainsi un enjeu clé dans le cadre des objectifs « Zéro Net » fixés aussi bien au niveau international (ODD n°15.3 ; COP 15) qu'europpéen et national (ZAN).

Les chercheurs rappellent tout d'abord l'insuffisance des connaissances sur la restauration des sols, notamment les sols urbains, et leur caractère disparate et fragmenté. Ils citent toutefois un **rapport de France Stratégie**, publié en 2019, qui propose une estimation des coûts de restauration des sols, dans le cadre d'une question plus large sur les leviers de lutte contre l'artificialisation des sols. Ce rapport estime des coûts de renaturation allant de 33 € par mètre carré pour la seule étape de construction d'un technosol, à 455 € par mètre carré, en fourchette haute, pour des restaurations impliquant toutes les étapes (déconstruction, dépollution, construction de Technosols). Cette estimation demeure néanmoins **incomplète** : sources anciennes ou absentes, méthodologie non décrite. Les chercheurs ont donc repris la question de savoir comment et à quel coût restaurer les sols urbains.

Dix étapes de la restauration des sols ont été identifiées. Les résultats montrent que les coûts de chacune

peuvent être très différents. Par exemple, l'assainissement du sol et la démolition de bâti sont particulièrement coûteux, tandis que les études préalables et la végétalisation sont moins onéreuses (en €/m²). Des facteurs de variabilité des coûts ont également pu être identifiés, tels que les possibilités d'économies d'échelle, ou la présence d'amiante lors de la démolition, le niveau de pollution du sol, etc.

Le choix de segmenter une opération de désartificialisation en plusieurs étapes et sous-étapes permet ensuite de les agencer entre elles pour créer des itinéraires techniques pertinents selon l'état initial d'un site et l'état estimé. A partir de ces itinéraires techniques, des scénarios ont été développés, représentant le passage d'un état initial fortement artificialisé à un état final avec un sol restauré.

Les coûts totaux de restauration varient de 25 € à 465 € par mètre carré (pour des sols artificialisés non pollués), pouvant atteindre jusqu'à 1550 € par mètre carré en cas de forte pollution nécessitant une excavation et une mise en décharge de déchets dangereux.

Pour conclure, l'estimation de ces coûts de restauration permet de :

- **valoriser l'importance des sols** : on voit que la restauration des sols est coûteuse, ce qui souligne l'importance d'éviter leur dégradation initiale ;
- **mesurer les dettes écologiques** associées à la dégradation des sols, pour éventuelle prise en charge par provisionnement ou dans le cadre des compensations ;
- **contribuer à l'évaluation des besoins** en investissement pour atteindre les objectifs de zéro artificialisation nette (ZAN).

44 Mathilde Salin avec d'autres chercheurs du CIREA. Voir la publication : Salin, M., Claron, C., Nguyen-Rabot, E., Mondolfo, N., Levrel, H. (2024). "Les coûts de la restauration des sols urbains." *CIREA Working Papers n°2024-96-FR*.

Exemple d'une question clé transversale : quelle maintenance de la nature en ville ?

On le sait, la production initiale d'un objet est souvent davantage valorisée que celle de son entretien au fil du temps : c'est vrai d'un bâtiment, avec le geste architectural initial ou la performance d'une construction innovante *versus* la banalité de la maintenance ordinaire, comme de réalités moins matérielles, comme la conquête et l'exercice du pouvoir. Or une part majeure de l'intérêt de cet objet pour ses usagers tient à la **qualité de l'entretien ultérieur** – comme le montre par exemple la question des ascenseurs cassés dans les cités défavorisées.

En matière de nature en ville, cette question est particulièrement cruciale, comme l'a bien noté le groupe. Elle permet aussi de montrer en quoi les dimensions scientifiques, techniques et sociales sont imbriquées, alors même que ces dimensions sont souvent dissociées pour des raisons d'analyse, comme c'est le cas dans les parties précédentes. En supposant acquise une nature plus présente en ville, **quelles sont les conditions de sa survie, de son intégration durable en milieu urbain, de son développement ?** Cette question renvoie à de multiples niveaux d'interrogation. On peut en présenter quatre pour en illustrer le spectre : enjeux philosophiques et politiques ; enjeux scientifiques et techniques ; enjeux économiques ; et enjeux socio-organisationnels.

Une précision : la recherche et l'innovation ont vocation à aborder l'ensemble de ces enjeux, même si l'on a distingué une dimension « scientifique et technique » : celle-ci renvoie en fait à un sous-ensemble de la recherche (sciences et technologies de la matière et de l'univers, du vivant, de l'ingénieur).

1. Questions philosophiques, culturelles et politiques : faire vivre la nature, ou la laisser vivre ?

Une première question fondamentale est posée : le développement de la nature en ville suppose-t-il plutôt de « faire vivre » la nature, ou de la « laisser vivre » ? Derrière le choix des mots, s'expriment deux visions culturelles et politiques.

Une première approche peut être qualifiée d'« **ingénierie verte** ». Elle repose sur une intervention active de l'humain pour intégrer la nature dans la ville. Les aménagements sont conçus et planifiés pour s'assurer que la végétation prospère dans un environnement artificialisé peu propice. Sont ainsi développées des solutions de végétalisation, de renaturation, de gestion des eaux pluviales, etc., en vue de répondre à des besoins humains précis : réduction des îlots de chaleur, gestion des risques, limitation des pollutions...

L'objectif ici est d'organiser et de contrôler le développement de la nature pour optimiser ses bénéfices pour les habitants. Des plantes spécifiques sont choisies pour leur résistance et leur capacité à purifier l'air ou à limiter les effets du changement climatique en milieu urbain. Cette approche repose sur l'idée que la nature doit être maîtrisée et orientée pour être durablement fonctionnelle. Cette approche sous-tend de nombreuses questions de recherche et pistes d'innovation présentées en réunion.

La seconde approche part du principe que faire place à la nature en ville suppose de laisser s'exprimer davantage ses cycles et ses modes d'organisation propres. L'objectif est donc principalement **de minimiser l'intervention et l'empreinte humaine** sur le territoire de la ville, pour permettre aux écosystèmes de se reconstituer spontanément. Cela se traduit par exemple par le maintien ou la création de friches urbaines ou de jardins sauvages, où la végétation locale et la biodiversité s'installent sans planification stricte, en fonction de leur propre dynamique.

Cette vision met l'accent sur l'autonomie et la résilience des milieux naturels, sur leur capacité à se régénérer et à s'adapter, même dans des environnements fortement anthropiques.

Un intervenant explicite ce point de vue : « *Il faut en finir avec une vision exclusivement « ingénierale » du fonctionnement urbain, et privilégier une vision écologique : pour un écologue, **ne pas gérer, c'est aussi gérer**. Ne pas intervenir peut être préférable à la 'gestionniste'⁴⁵ à laquelle nous sommes habitués. Cela renvoie à l'idée que nous devrions **passer d'une logique consistant à aménager la nature dans la ville à une autre consistant à aménager la ville à partir de la nature** (continuité des trames brunes, vertes, bleues, etc). Et plus largement, aux visions émergentes qui prônent de **faire cohabiter de façon plus équilibrée les humains et les non-humains**, dans l'espace et dans le temps. »*

Le président du GT souligne ainsi la « *tension entre le besoin d'intervention dans la gestion de la nature ré-introduite ou recréée en ville, et le souhait de ne pas (ou pas trop) intervenir pour la laisser se développer. Y a-t-il un juste équilibre entre ceux deux attitudes ?* »

Le souci de combiner le meilleur de nos savoir-faire technologiques et l'ouverture à de nouveaux enjeux et modes de fonctionnement apparaît comme un objectif légitime en l'état actuel de la planète et des savoirs. L'objectif serait alors de **maximiser les bénéfices de la nature tout en respectant ses dynamiques propres**, ce qui suppose un certain retrait de l'emprise humaine sur la nature en ville.

En France, estime l'un d'eux, « *on a un peu la 'gestionniste' aiguë, c'est sans doute lié à notre culture d'ingénieurs : on veut forcément faire quelque chose. J'ai vu beaucoup de projets de friches dans lesquelles on allait mettre des platelages, couper des branches etc., alors que parfois, il faut laisser faire, savoir ne rien faire. (...) [Ces espaces] n'ont pas forcément besoin d'être 'renaturés', même s'ils peuvent sembler délaissés, abandonnés, sauvages, mais n'est-ce pas cela aussi, la nature en ville ?* »

Un intervenant rappelle qu'au-delà des besoins directs du citoyen urbain, des intérêts supérieurs sont en jeu dans ce rééquilibrage des approches : « *Il faut aussi rappeler l'importance de la dimension proprement écologique, liée à la biodiversité etc. Quand on*

parle de SfN, on a tendance à ne plus traiter le sujet de la gestion des eaux par exemple qu'à travers le prisme des services qu'elles vont rendre : infiltration, évapotranspiration etc. Mais il importe aussi de garder en tête l'objectif de renaturation en soi, de maintien de la biodiversité – qui a un sens en soi, et qui conditionnera de toute façon le reste. Est-ce que la végétation qu'on a plantée va survivre ? Comment va-t-on l'entretenir, la développer, limiter ou gérer les espèces invasives, etc. ? »

Cette réorientation de l'approche débouche sur deux autres pistes de travail :

- celle d'une intervention humaine (scientifique, innovante...) davantage focalisée sur les règles d'attribution de l'espace et de ses usages ;
- et bien sûr, celle des modalités de ces arbitrages entre nature et société en ville ; en d'autres termes, « *la question de savoir qui décide de cela, quels choix collectifs, selon quelles modalités, etc. »*

Pour conclure, une bonne maintenance de la nature en ville appellerait à « **laisser davantage vivre » cette dernière, tout en s'attachant à la « faire vivre » lorsque cela apparaît nécessaire**. En effet, sur ce dernier point, une intervenante rappelle qu'en milieu artificialisé, la nature a souvent besoin, pour se maintenir, d'un coup de pouce ou d'un accompagnement. Par exemple, « *il existe un a priori fréquent selon lequel la biodiversité des sols s'installe d'elle-même en milieu urbain. Si cela peut être vrai dans certains cas, d'autres situations sont plus complexes. Par exemple, il est difficile de trouver des vers de terre sur des toitures. De plus, la stabilisation de la biodiversité peut prendre plusieurs années, parfois quatre à cinq ans, avec des fluctuations importantes avant d'atteindre un équilibre stable.* »

2. Questions scientifiques et techniques : quel devenir de la nature en ville ?

Les parties I à III ont permis d'identifier de nombreuses pistes de recherche et d'innovation liées au développement de la nature en ville. On se contentera ici d'en désigner deux, qui renvoient plus spécifiquement à l'enjeu de la maintenance de cette nature en ville.

LE VIEILLISSEMENT DES TECHNOSOLS

La conception et les divers usages des Technosols, on l'a dit, représentent une voie de recherche et d'expérimentation prometteuse en tant que solution fondée sur la nature en milieu urbain.

La question de l'évolution dans le temps de ces Technosols fait cependant partie des questions pour lesquelles les éléments de réponse sont encore très limités, voire suscitent certaines appréhensions qui seront autant de nouveaux défis.

45 La notion de gestionniste étant utilisée de façon péjorative pour désigner la tendance de certains gestionnaires de la [nature](#) à intervenir de façon jugée excessive sur les milieux, pour les conserver et pour permettre aux espèces et aux habitats de se maintenir.

On sait ainsi que les éléments comme les sols et la végétation perdent certaines fonctionnalités en vieillissant. Mais on est loin de connaître **la portée et l'ensemble des impacts de ce vieillissement** – notamment concernant les Technosols ; de même qu'on ne connaît pas bien **la façon dont la biodiversité s'y développe, ou pas, dans le temps**, en l'absence d'intervention humaine. Or ces connaissances sont essentielles pour savoir quel niveau et quel type de maintenance, même minimale, sont nécessaires au bon développement de la nature en ville.

Une intervenante note par exemple : « *On a pu observer qu'un Technosol d'une dizaine d'années avait été progressivement contaminé aux métaux lourds, alors que ceux-ci n'étaient pas présents dans l'atmosphère. Au bout de 10 ans, la quantité mesurée dans le Technosol (presque 100 mg/kg de plomb) s'approchait pourtant du seuil maximal fixé par la norme. Les contaminations aux polluants émergents tels que les microplastiques sont à regarder aussi de près. Leur présence peut être assez fréquente dans les Technosols, avec des déchets qui en contiennent.* »

LE DÉVELOPPEMENT D'ESPÈCES INVASIVES

La prolifération d'insectes ou de micro-organismes invasifs est devenue un fléau aussi bien dans les villes que dans les zones rurales. Les causes de ce phénomène sont plus ou moins connues : importation de substrats ou de végétaux exotiques porteurs de ces espèces, en vue d'implanter une végétation qui résistera aux impacts futurs du changement climatique, réchauffement climatique propice à la survie et au développement de ces espèces, etc. Par ailleurs, certaines formes urbaines favorisent l'installation et le développement d'espèce problématiques (moustique-tigre). Parmi les autres espèces problématiques pour des raisons sanitaires ou de maintien de la biodiversité, ont été mentionnés par exemple la fourmi électrique détectée à Toulon et le vers sauteur, dans le Sud de la France.

La maintenance de la nature en ville appelle ici divers travaux de recherche, pour qualifier les réalités observées et proposer des pistes de solution.

Un intervenant suggère ainsi de **faire la part des choses entre les espèces qui vont vraiment poser un problème en ville et celles qui s'accommodent du milieu urbain sans le perturber**. « *Le MNHN a mené une étude sur la perruche à collier, qui a montré qu'elle n'allait pas faire décliner les espèces locales d'oiseaux ; on peut aussi citer le buddleia (arbre à papillons) qui s'installe là où d'autres espèces ne vont pas. Il y a un donc un double travail à faire :*

- *sur l'évitement de la prolifération en amont, qui peut amener à privilégier des espèces locales par exemple ;*
- *et sur le choix des méthodes de gestion des différentes espèces, en fonction des éventuels problèmes qu'elles vont poser (ou pas) ».*

Un autre intervenant, renvoyant notamment aux travaux François Chiron (AgroParisTech), pointe le fait que « **ces espèces dites envahissantes renvoient parfois seulement à un problème de perception**. *Là aussi, pour les espèces ne posant pas de réel problème de santé ou de biodiversité, la non-gestion peut être préférable à la gestion... »*

Et là encore, les équilibres à trouver entre adaptation des écosystèmes à de nouvelles espèces adaptées aux évolutions climatiques et limitation des nuisibles envahissants sont au cœur des enjeux de la maintenance de la nature en ville, et appellent une connaissance plus approfondie des espèces et des situations. Des travaux sont déjà en cours, par exemple, comme le mentionne un participant, dans le cadre du PEPR Solu-BioD, avec en particulier un réseau de Living Labs pour partager des connaissances, expérimenter et promouvoir des Solutions fondées sur la nature en matière de biodiversité en ville.

3. Questions économiques : quels coûts complets, quels systèmes comptables ?

En matière de maintenance de la nature en ville, il peut paraître plus économique de laisser faire la nature, puisqu'on n'a alors plus à payer le coût de l'entretien des espaces : jardiniers, produits etc. Les situations budgétaires étant généralement tendues, un intervenant souligne l'intérêt « *d'avoir une faune et une flore les plus autonomes possibles : il faut arriver à se passer d'entretien le plus possible, pour que ce développement de la nature en ville au bon niveau soit économiquement possible.* »

Mais on arrive très vite au constat que la réalité est plus compliquée, notamment par **manque de connaissance suffisamment fine des coûts complets**, concernant aussi bien les situations actuelles que les projections d'autres types de maintenance – pour lesquels divers scénarios peuvent être envisagés, allant du laisser-faire intégral à des solutions fondées sur la nature plus ou moins sophistiquées.

Des travaux récents ou en cours permettent d'avancer sur ces questions. On peut citer le volet « *Evaluation économique* » du projet Life ARTISAN, projet qui vise à mettre en place un cadre propice au déploiement des Solutions d'adaptation au changement climatique fondées sur la Nature⁴⁶ : il s'agit d'un travail de fin d'études réalisé par Auriane Bahuau, qui synthétise les méthodes existantes et mobilisables pour comparer économiquement les projets de SafN aux solutions grises⁴⁷.

Si « *le coût d'entretien des espaces verts par les mairies est estimé de 1 à 4 euros / an par m²* », selon une intervenante, de nombreux autres éléments ne font

46 <https://www.ofb.gouv.fr/le-projet-life-integre-artisan>

47 <https://www.ofb.gouv.fr/le-projet-life-integre-artisan/documentation-life-artisan/evaluation-economique-des-solutions>

l'objet d'aucune estimation économique. « *Quand on ramasse les feuilles mortes des bords de route, qu'en fait-on ? Les considère-t-on comme des matériaux écologiques, alors qu'elles sont probablement très polluées par le sol et par l'air ? Ce sujet des bilans des entretiens n'est pas bien traité* », note par exemple la conseillère scientifique du GT.

Autre angle mort dans l'évaluation des coûts de la maintenance ou de la non-maintenance de la nature en ville : « *la façon dont les habitants prennent part à cette gestion du vivant, des sols etc. dans la ville. On pourrait imaginer d'évaluer la valeur économique de cette gestion par les habitants* », relève une intervenante.

Enfin, même lorsqu'on a progressé sur la capacité à évaluer économiquement tel ou tel coût écologique ou social, reste à **aligner l'ensemble des compétences et des outils pour prendre en compte ces nouvelles données, et à généraliser la diffusion et l'usage de nouvelles normes et de nouveaux systèmes comptables.**

Concernant les SfN de gestion des eaux pluviales, un intervenant précise : « *Au début, on n'avait sans doute pas tous les outils pour cette maintenance, notamment financiers. Aujourd'hui, cependant, on sait calculer l'amortissement de ces infrastructures fondées sur la nature sur le temps long, provisionner, etc. Reste à mobiliser ces connaissances, mettre en place une comptabilité écologique, etc. Et à valoriser la capacité à penser l'ensemble du cycle de vie de ces infrastructures, y compris culturellement, au-delà de l'investissement initial.* »

4. Questions sociales : quelles compétences collectives, quels nouveaux systèmes d'acteurs, quelles régulations ?

Les enjeux de maintenance font intervenir des parties prenantes beaucoup plus diverses que ceux de la production initiale (y compris usagers eux-mêmes), avec des enjeux de collaboration plus élevés : qui paye, qui est responsable, qui agit pour quel type de maintenance, sachant de plus que les bénéfices sont multifonctionnels ? Ces sujets sont sources de controverses et reconfigurations majeures entre services (Espaces verts / Eau et assainissement par exemple), et entre catégories d'acteurs, voire, à terme, à la structuration de nouveaux systèmes d'acteurs.

Là encore, ce sujet a été abordé dans la partie III, même s'il n'a pas été exploré spécifiquement par le GT. Contentons-nous donc ici de mettre l'accent sur la **transformation du système social local** que suppose une maintenance efficace de la nature en ville.

Le premier met l'accent sur la **diversité des compétences à mobiliser** pour organiser cette maintenance. Une intervenante met ainsi en garde : « *Il y a certes l'idée de travailler la circularité dans les amé-*

nagements urbains, de travailler à ce qu'ils puissent s'autogénérer... mais attention à ne pas donner le sentiment – contre-productif – que la nature peut se gérer elle-même. On est dans des espaces avec beaucoup d'injonctions contradictoires, et il faut de toute façon la main de l'homme, au moins une vision politique, qui se traduit sur le terrain par des équipes, des agents, des urbanistes, des paysagistes, qui à un moment vont penser toutes les conditions pour que la nature en ville, la végétation, les paysages, puissent vraiment durer dans le temps. »

La conseillère scientifique du GT le souligne : « *La question de la maintenance fait appel à d'autres acteurs que ceux de la conception et de la mise en place des SfN, et elle peut représenter un véritable point faible. Pour un toit végétalisé, par exemple, il faudrait impliquer les services urbains, les habitants, expliquer, former – et on voit qu'on ne sait pas très bien comment faire passer ce message, au-delà de l'investissement ponctuel réalisé dans la mise en place.* »

Autre exemple de la recomposition des interactions sociales autour du développement de la nature en ville : la mise en tension des frontières entre services à l'intérieur d'une collectivité, déjà évoquée mais qui est particulièrement vive s'agissant des enjeux de maintenance. Comme **le fait observer une intervenante, le fait que ces solutions soient productrices de co-bénéfices fait surgir des problématiques de répartition des responsabilités, des financements etc.** entre domaines et services concernés. « *Par exemple, un service des Espaces verts pourra considérer que les coûts d'entretien d'une bande plantée qui aura des bénéfices pour la gestion des eaux, la protection de la biodiversité, la santé humaine et la qualité de vie, relèvent d'un co-financement avec trois ou quatre autres services.* »

Ces divers exemples illustrent le fait que les Solutions fondées sur la nature peuvent être qualifiées d'« **infrastructures relationnelles** », selon le concept proposé par un intervenant. Faisant référence aux travaux de Jewett & Kling⁴⁸, il rappelle que toute infrastructure, grise ou verte, implique un tissu de relations qui lui permettent d'exister : cadre juridique, gouvernance, pratiques organisées, etc. Comme toute infrastructure, les SfN nécessitent une activité de maintenance qui est déterminante pour leur pérennité. Or, souligne-t-il, on prête généralement une attention insuffisante à cette activité. Lorsque les compétences ne sont pas disponibles directement au sein des collectivités locales, il peut être utile de développer des partenariats pour assurer cette maintenance, par exemple avec des agriculteurs, des paysagistes, des acteurs environnementaux, voire de simples usagers de l'infrastructure. D'une façon générale, rappelle-t-il, « **la question de savoir si une infrastructure fonctionne ou non est davantage liée au contexte politique (au sens**

48 Jewett, T. & Kling, R. (1991) – « The Dynamics of Computerization. In a Social Science Research Team: A Case Study of Infrastructure. Strategies, and Skills » - *Social Sci. Computer Rev.*, 9, 246-275.

large) qu'aux propriétés inhérentes de celle-ci ».

Et il est préférable de privilégier une gestion adaptative, qui n'obère pas les choix futurs.

Il s'agit aussi, selon cet intervenant, de « *prendre au sérieux la question des **pratiques sociales** imbriquées à l'infrastructure* ». Par exemple, lorsqu'une infrastructure verte vient remplacer une infrastructure grise, il est important d'identifier quelles pratiques formelles et informelles étaient adossées à l'infrastructure préexistante. Ainsi, une digue peut être aussi le support de pratiques de pêche ou de baignade, dont la suppression peut être source de conflits avec les riverains. La mise en place de nouvelles solutions peut, de son côté, être la source de nouvelles pratiques non prévues, qu'il faudra éventuellement encadrer.

Conclusion

Les parties I, II et III ont mis l'accent sur de nombreuses pistes de travail renvoyant à des besoins de connaissance et d'innovation spécifiques concernant le développement de la nature en ville, en lien avec un **besoin de connaissances plus approfondies des diverses composantes de la nature en ville, notamment du fait de leur variabilité spatiale et temporelle**. Les éclairages proposés dans la partie IV sur la question de la maintenance illustrent par ailleurs **l'importance d'une approche systémique pour comprendre et agir sur les conditions du développement de cette nature urbaine**. Celles-ci doivent être abordées de façon coordonnée entre une diversité de parties prenantes, de disciplines et de niveaux d'action territoriaux et temporels.

Au-delà des questions de granularité fine qui conditionnent la viabilité et la « performance » globale de la nature en ville, une autre interrogation apparaît en filigrane des travaux du groupe : n'est-ce pas vers un nouveau modèle ou un nouveau projet, philosophique, social, politique et économique, que nous entraîne la quête d'une véritable intégration de la

nature en ville, condition clé d'une réelle efficacité en tant que solution d'adaptation au changement climatique ?

La recherche a en tout cas vocation à réfléchir aussi à cette question, qui l'invite à prendre au sérieux la complexité des liens qu'entretiennent ville et nature - y compris en se remettant elle-même en question en tant que mode de connaissance et d'interprétation du réel. En d'autres termes, la recherche n'a-t-elle pas aussi vocation à proposer un **éclairage différent sur la réalité des besoins respectifs des divers occupants, humains et non-humains, de notre écosystème Terre ?** N'est-ce pas aussi cet éclairage qui contribue à faire de la nature en ville un démonstrateur de transition écologique ?

Le mot de la fin revient à un membre du GT :

« On ne peut pas planter de la végétation et estimer qu'on a fini. La nature est déjà dans la ville. Il faut regarder ce qui est là, ce qu'en font les gens, comment on peut l'améliorer, et l'évaluer sur le temps long – passé et à venir. »

Annexe A

Réunions et intervenants

Plusieurs intervenants étaient par ailleurs membres du GT, et/ou ont participé aux travaux au-delà de leur intervention dans le cadre de l'une des réunions.

Réunion 1, 27 février 2024 – Introduction et cadrage

Charlotte Roux, chargée de recherche - Mines Paris-PSL / lab recherche environnement (ParisTech - Vinci)

La prise en compte des limites planétaires à l'échelle de la ville renaturée

Patrick Stella, maître de conférences - AgroParisTech

Maxime Trocmé, directeur Déploiement R&D - Vinci (lab recherche environnement (ParisTech - Vinci)

Nature en ville : concepts, enjeux et questions de recherche & d'innovation

Marc Barra, écologue - Agence régionale de la biodiversité en Île-de-France / Institut Paris Région

Nature en ville : concepts, enjeux et questions de recherche & d'innovation

Réunion 2, 19 mars 2024 – Air et climat urbains

Marjorie Musy, directrice de recherche - CEREMA

Impacts climatiques de la végétation en ville : état des connaissances et travaux actuels, enjeux des recherches à venir

Stéphanie Vallerent, directrice adjointe Climat et Territoire – ACTIERRA

Lucille Alonso, chef de projet – ACTIERRA

Rafraîchissement urbain : solutions innovantes et pistes de recherche

Karine Sartelet, directrice de recherche - CEREA - Ecole des Ponts ParisTech

Impact de la végétation sur la qualité de l'air

Anthony Daneyrolle, directeur du département Hydraulique Environnement Ecoconception - ARTELIA

Bioclimatique et qualité de l'air : enjeux opérationnels et défis scientifiques

Réunion 3, 23 avril 2024 – L'eau en ville

Pierre-Antoine Versini, directeur de recherche en hydrologie - Ecole des Ponts ParisTech

Nature en ville pour la gestion des eaux pluviales : perspectives de recherche à travers les échelles urbaines

Jérémie Sage, chercheur en hydrologie urbaine – CEREMA

La renaturation du cycle de l'eau pluviale en ville et le projet GreenStorm (AAP DUT 2022)

Laure Fass, ingénieure en systèmes énergétiques, chargée d'études et de suivi du plan Parispluie - Ville de Paris

Le plan Parispluie. Présentation du zonage pluvial parisien, un outil pour la ville durable

Christian Piel, géographe, urbaniste, hydrologue - fondateur et dirigeant d'Urban Water

Du grand paysage au jardin de pluie : gestion, maîtrise et valorisation des eaux en milieu urbain

Antoine Brochet, chercheur post-doctoral (géographie et science politique) - Institut des Géosciences de l'Environnement (CNRS - Grenoble)

Compétences, leviers et limites de l'action publique territoriale pour l'intégration de SfN dans le domaine de l'eau

Réunion 4, 17 juin 2024 – Terre : sols urbains

Christophe Schwartz, professeur en pédologie urbaine, INRAE-Université de Lorraine

Sols urbains : terres inconnues ?

Sophie Joimel, maître de conférences - AgroParisTech

La construction de sols fertiles et les besoins de désimperméabilisation des sols urbains pour la végétalisation de la ville

Robin Dagois, chargé de mission Agronomie, sols urbains et conduite des végétaux - Plante et Cité

Renaturer la ville avec les Technosols : impact sur la biodiversité des sols

Lukas Madl, doctorant en Aménagement et urbanisme, Université Gustave Eiffel / AREP

Renaturation, refonctionnalisation, restauration : l'enjeu de choisir la bonne terminologie pour un domaine de recherche récent

Cécile Brazillier, European Project Manager, DEDALE

Le projet Terroir Urbain

Mathilde Salin, doctorante - CIRED / Banque de France

Les coûts de la restauration des sols urbains

Sylvain Riss, directeur Groupe, Digital et BIM – WSP|BG Ingénieurs Conseils

Fanny Josse, architecte et doctorante – Université Gustave Eiffel / WSP|BG Ingénieurs Conseils

Le jumeau numérique environnemental, un outil d'aide à la décision pour répondre à l'objectif ZAN 2050 ?

Caroline Gutleben, directrice – Plante et Cité

Evolution des enjeux de la nature en ville et perspectives pour les villes-nature

Annexe B

Membres du groupe de travail

Fanny ALAMELLE, CNRS - IMM
Joël AMOSSÉ, CEREMA
Hasnaa ANISS, UNIVERSITE GUSTAVE EIFFEL
Eleni ASSAF-MEDAWAR, ADEME
Richard AUDOIRE, DASSAULT SYSTEMES
Bernard BADIN, LSE NATURAL STONES
Mariia BAKHAREVA, CSTB
Anne-Laure BARON, CDA LA ROCHELLE
Lucie BAYARD, CARA
Béatrice BECHET, UNIVERSITE GUSTAVE EIFFEL
Valérie BERT, INERIS
Gilles BETIS, ESTP
Aude BLOM-RAQUIN, UNIVERSITE COTE D'AZUR
Olivier BOCQUET, ROUGERIE TANGRAM
Camille BONNET, UNIVERSITE DE LA REUNION
Christophe BORTOLASO, BERGER-LEVRAULT
Mathieu BOUSSOUSSOU, KARDHAM
Charlotte BRACCO, SAINT-GOBAIN
Olivier CARTERET, THE TINY VILLAGE
Cyrille CHAZALLON, INSA STRASBOURG
Marine CLAVEL, MAIRIE DE LORIENT
Gabrielle COSTA DE BEAUREGARD, ALSTOM
Damien CUNY, UNIVERSITE DE LILLE
Louis CUZIN, OCCITANIE EUROPE
Paul DAMBREVILLE, UNIVERSITE DE GUYANE
Jérôme DEFRANCE, CSTB
Sylvette DENEFLÉ, AIX MARSEILLE UNIVERSITE
Dominique DEWEVRE, MANAGERS EN MISSION
Anne-Valentine DUFFRENE, CENTRALIE LILLE INSTITUT
Alain DUPUY, BRGM
Hugo DUWIKUET, ENGIE
Elizabeth EL HADDAD, INRIA
Lison EPIFANIE, BDCO
Pascal FUGIER, CEA
Anne-Céline GAREL-LAURIN, SGR-PARIS
Edith GAROT, UNIVERSITE DE LA REUNION
Giulia GIACCHE, INRAE
Zoé GINTER, UNIVERSITE DE TOURS
Flovic GOSSELIN, UNIVERSITE CATHOLIQUE DE LILLE
Mathilde GRALEPOIS, UNIVERSITE DE TOURS
Frédéric GRONDIN, ECOLE CENTRALE DE NANTES
Claire GUIHENEUF, CMA
Martial HAEFFELIN, IPSL / CNRS
Christelle HENAO, AFNOR
Nathan HENRI, KALLIOPE
Rachida IDIR, CEREMA
Djamila IOUALALEN-COLLEU, MTECT
Jean-Pascal JOSSELIN, IAU RENNES
Rouba KAEDBEY, UNILASALLE
Zied KBAIER, SATT SAYENS
Gaël LAMBERTHOD, SCE
Stéphanie LE MEUR, KARDHAM
Sophie MAILLEY, CEA
Frédéric MAISON, NAMR
Patrick MASSIN, CEREAL
Caroline MERCADER, PERPIGNAN MEDITERRANEE METROPOLE
Dominique MIGNOT, UNIVERSITE GUSTAVE EIFFEL
Caroline MILLAN, COLAS
Axel MILLARD, UNIVERSITE DE MONTPELLIER
Sandra MOLINERO, CONTINENTAL AUTOMOTIVE France
Francesca MORUCCI, ASP MER TYRRHENIENNE DU NNORD
Florence NASSIET, COMM. D'AGGLO. LA ROCHELLE
Camille PAYRE, EIFER
Anne PENILLARD, SAINT-GOBAIN RECHERCHE
Erwan PERSONNE, AGROPARISTECH
Charlotte PEYRAT VAGANAY, INRIA
Carole POURCHEZ, MTECT-CGDD-SRI
Marie RESCAN, CATALAN INSTITUTE FOR WATER RESEARCH
Tatiana REYES, ENSAM
Elodie ROURE, REGION CENTRE VAL DE LOIRE
Nicole ROUX, UNIVERSITE DE BREST
Karine SAUTEREAU, CENTRE INFFO
Alexander SCHRAGE, CGDD / MTECT
Tudal SINSIN, ALTEREO
Chao Zhong TAN, UNIVERSITE DE TOURS
Laura THUILLIER, OASIIS
Christelle TRIBOUT, UPS
Arthur VAUGEOIS, AVITEM
Alan VERGNES, UNIV. PAUL VALERY MONTPELLIER 3
Baptiste VIVIER, HOLCIM INNOVATION CENTER



33, RUE RENNEQUIN - 75017 PARIS
TÉL. : 01 55 35 25 50
WWW.ANRT.ASSO.FR