

VILLE RENATURÉE ET RÉGÉNÉRATIVE : DES CONCEPTS À LA RÉALITÉ, QUELS ENJEUX POUR LA RECHERCHE ET L'INNOVATION ?

En collaboration avec l'Association Nationale de la Recherche et de la Technologie

Michael Matlosz

Membre de l'Académie des technologies et coordinateur du groupe de travail « Transition écologique - Ville durable » de l'ANRT

Séance co-organisée par **Nadège Bouquin**, directrice de projet à l'ANRT, le 26 avril 2023

Résumé

Comment transformer la ville « dégénérative », caractérisée par l'étalement urbain, l'imperméabilisation des sols, la consommation déraisonnable de matières premières, la production de déchets, l'absence de circularité, l'éradication de la biodiversité, les émissions de GES, les îlots de chaleur, en ville « régénérative », qui renforce la biodiversité des écosystèmes, des espèces et des individus ainsi les services apportés par la nature, et ce depuis l'échelle cellulaire jusqu'à celle du territoire, afin d'instaurer un cercle vertueux centré sur le vivant ? Les expériences de biomimétisme à l'échelle d'un bâtiment, d'un quartier ou d'une ville, la prise en compte de la valeur environnementale à côté des valeurs économique et sociale dans les plans locaux d'urbanisme, le fait de se demander de quelle façon un bâtiment peut apporter une contribution environnementale positive à son territoire plutôt que l'inverse, une fiscalité foncière basée sur le potentiel de densification ou de biodiversité d'une parcelle plutôt que sur les constructions existantes, la réalisation de diagnostics agro-pédo-biologiques sur les sols urbains pour une meilleure prise en compte des potentialités de chaque parcelle et l'optimisation des usages qu'elle peut accueillir, telles sont quelques-unes des pistes qui s'offrent à une planification tournée vers la renaturation et la régénération des villes.

Intervenants

Delphine Mathou

Responsable du développement territorial du biomimétisme chez Ceebios

Luca Bertacchi

Architecte associé chez Béchu & Associés

Benoît Boldron

Maître de conférences et chercheur à l'Université de Toulouse (Lisst-Cieu - centre interdisciplinaire d'études urbaines), chef de service « Habitat public » à la direction « Habitat et Opérations foncières » de Toulouse Mairie Métropole

Quentin Vincent

Directeur scientifique et co-fondateur de Sol & co

Sommaire

Ville régénérative et biomimétisme	2
Planification urbaine : quelle valeur environnementale pour une ville contributrice ?	4
Vers une meilleure prise en compte des sols dans l'aménagement urbain	6
Débats	8

Introduction par Michael Matlosz

La séance d'aujourd'hui est le fruit d'une collaboration entre l'Académie des technologies, dont je préside le groupe de travail sur l'économie circulaire, et l'ANRT, dont je préside le groupe de travail sur la transition écologique et la ville durable. Ce dernier fait partie d'un Groupe miroir national piloté par le ministère de l'Enseignement supérieur et de la recherche et le ministère de la Transition écologique et de la cohésion des territoires pour animer la participation française à deux initiatives européennes autour de la ville durable.

L'une, la Mission Ville, organisée dans le cadre du programme Horizon Europe, a conduit à sélectionner neuf villes françaises qui vont tenter de démontrer qu'elles peuvent devenir neutres en émissions de GES (gaz à effet de serre) à l'horizon 2030 ; leurs initiatives feront l'objet de projets de recherche. L'autre, baptisée DUT (*Driving Urban Transitions to a Sustainable Future*), est un Partenariat européen qui rassemble 27 États volontaires et plus d'une soixantaine d'organisations ; l'ANRT est membre de ce Partenariat. Ce programme est structuré autour de trois grands axes : la mobilité et la proximité, autour de la notion de « *la ville du quart d'heure* » ; les quartiers à énergie positive ; la ville circulaire. La France finance les partenaires français des projets relevant de ce programme (4,5 millions d'euros en 2022). L'un des objectifs est de développer la participation des organismes de recherche, des collectivités et des entreprises françaises.

La séance d'aujourd'hui est la première réunion du groupe de travail de l'ANRT pour l'année 2023. Merci à nos quatre orateurs, qui vont nous initier au concept de ville renaturée et régénérative et nous aider à en comprendre les enjeux pour la recherche et l'innovation.



Ville régénérative et biomimétisme

Delphine Mathou et
Luca Bertacchi

Delphine Mathou est ingénieure en industries graphiques et transformation de l'École Française de Papeterie de Grenoble, et titulaire d'un master de recherche en génie des procédés et de l'environnement à l'INSA de Toulouse. Après avoir développé ses compétences en accompagnement de l'innovation au sein d'un cabinet de conseil européen, elle se spécialise dans les éco-industries au sein de Midi-Pyrénées Innovation, où elle travaille notamment à l'émergence de la filière Hydrogène. Delphine intègre ensuite la Communauté d'Agglomération Pays Basque où elle contribue au développement de l'économie bleue et de l'innovation et œuvre au déploiement du biomimétisme marin. Riche de cette expérience, elle rejoint le Ceebios en 2021 pour participer au développement territorial du biomimétisme.

Luca Bertacchi est architecte, urbaniste et photographe. Il a étudié l'Urban Design à l'Université IPPUC de Curitiba au Brésil avant d'obtenir son diplôme d'architecture à l'Université de Ferrara en Italie en 2005. Formé dans les équipes de Mario Cucinella en Italie, il a travaillé sur des projets à différentes échelles, depuis leur conception jusqu'à leur livraison, en Italie, au Brésil, au Ghana et au Maroc. Architecte, mais aussi photographe pour les Jeux Olympiques d'Hiver de 2006 à 2010 et globe-trotter à ses heures, Luca a rejoint l'agence Béchu & Associés en 2015 en tant qu'associé. Passionné par les voyages et les cultures dans lesquels nos projets s'insèrent, et fort de son expérience en matière de développement durable, sa démarche permet la création de projets à forte identité par la recherche de solutions solides et complètes sur la base de paramètres complexes.

Exposé de Delphine Mathou

Le Ceebios (Centre d'étude et d'expertise en biomimétisme) est une société coopérative d'intérêt collectif à but non lucratif, dont l'objectif est d'accélérer la transition écologique et sociale par le biomimétisme. Ses trois missions sont d'explorer le potentiel du biomimétisme par le développement d'outils et de méthodes ainsi que la coopération entre recherche et industrie ; d'innover avec le biomimétisme

en accompagnant les acteurs économiques et institutionnels dans leurs processus d'innovation et de conception pour développer des solutions et des projets bio-inspirés et régénératifs ; de déployer le biomimétisme en France à travers un réseau d'experts, à travers la formation, l'enseignement et la communication.

Ville dégénérative, ville régénérative

D'ici 2050, près de 75 % des êtres humains vivront dans une aire urbaine, contre 56 % actuellement.

La ville « dégénérative » se caractérise par l'étalement urbain, l'imperméabilisation des sols, la consommation déraisonnable de matières premières, la production de déchets, l'absence de circularité, l'éradication de la biodiversité, les émissions de GES, les îlots de chaleur. Alors que les villes représentent 3 % de la surface de la planète, elles consomment 75 % des ressources naturelles, 60 % de l'énergie et 70 % de l'eau douce.

Avec un urbanisme plus durable (*green urbanism*), comme celui des « écoquartiers », on passe à un concept plus vertueux en matière de gestion de l'énergie ou de l'eau, mais sans résoudre la problématique de l'étalement urbain, de l'éloignement des centres, de l'accès à des mobilités douces, de formes d'architecture et d'urbanisme pouvant avoir des impacts négatifs sur la biodiversité.

L'urbanisme régénératif promeut la circularité des matières, la symbiose avec les systèmes naturels, l'utilisation de ressources abondantes (carbone, oxygène, hydrogène et azote, massivement utilisées par la nature) alors que nous avons tendance à privilégier les ressources rares, l'utilisation de réactions chimiques à pression et température modérées, la régénération des services écosystémiques et de la biodiversité.

Quatre grands principes

L'urbanisme régénératif repose sur quatre grands principes. Le premier est la régénération des trois types de biodiversité qui sont le socle de toute vie sur Terre, celle des milieux ou écosystèmes, celle des espèces et celle des individus. Cette dernière désigne la diversité des gènes au sein d'une même espèce, indispensable à l'adaptation des espèces aux variations de leur environnement.

Le deuxième grand principe de la ville régénérative consiste à régénérer les services écosystémiques, qu'il s'agisse des services d'approvisionnement (alimentation, production de matières premières renouvelables, ressources médicinales...), de régulation (qualité de l'air, purification de l'eau...), des fonctions dites de soutien (photosynthèse, fertilisation des sols...), ou

encore des services culturels (valeur esthétique, contribution à la santé mentale et physique...).

Le troisième grand principe vise à concevoir un socio-système complet à toutes les échelles. Dans cette approche, la notion même de vie n'est pas la somme des vies de tous les individus de toutes les espèces, mais plutôt l'ensemble des interconnexions et relations entre tous les organismes à toutes les échelles, depuis les organismes unicellulaires jusqu'à la biosphère. Il s'agit, par conséquent, de créer des systèmes humains qui co-évoluent avec les systèmes naturels, dont ils font partie intégrante.

Le quatrième est la coévolution positive avec le vivant. Ce dernier est placé au cœur des stratégies de conception et de fabrication des villes afin d'instaurer un cercle vertueux : préserver le vivant, bénéficier des services écosystémiques, valoriser la richesse de la biodiversité, nourrir notre connaissance du vivant, s'inspirer des solutions du vivant pour améliorer les conditions de vie humaine tout en limitant les impacts sur la biosphère.

Bio-inspiration et biomimétique

Le biomimétisme consiste à s'inspirer du vivant qui, en 3,8 milliards d'années d'évolution et d'adaptation, a mis au point des solutions, fonctionnelles, économiques en ressources, adaptées, etc. Autour du biomimétisme, on trouve d'autres approches telles que la bio-inspiration, un processus créatif puisant son inspiration dans un ou plusieurs systèmes vivants, que ce soit pour concevoir un aéronef comme l'ornithoptère de Léonard de Vinci ou pour diverses formes d'art comme la peinture ou la danse ; et la biomimétique, un processus de conception interdisciplinaire entre biologie et technologie reposant sur l'abstraction, le transfert et l'application de connaissances issues de modèles biologiques. Ainsi, les fleurs de bardane ont inspiré le velcro, l'imitation de la forme du bec du martin-pêcheur a servi à faire gagner de la vitesse et économiser de l'énergie au TGV japonais Shinkansen, l'extrémité des ailes des avions a été dotée de petites ailerettes à l'instar de celles des oiseaux afin d'améliorer la stabilité des avions.

La philosophie du biomimétisme

Au-delà de ces innovations technologiques, le biomimétisme se veut une philosophie consistant à prendre la nature comme modèle dans le but de répondre aux enjeux de développement durable, c'est-à-dire en limitant l'impact des activités humaines sur l'environnement. Il nous invite ainsi à nous inspirer non seulement des performances fonctionnelles du vivant, mais de son cahier des charges, c'est-à-dire des grands principes de fonctionnement de la vie sur terre. Par exemple, le vivant privilégie l'énergie solaire, optimise

sa consommation, séquestre le CO₂ ; ses matériaux sont hiérarchisés, hybrides, composites, optimisés et adaptatifs ; les habitats biologiques accueillent généralement plusieurs espèces, sont multifonctionnels, évolutifs et démontables. Nous pourrions nous en inspirer pour concevoir des habitats utilisant des matériaux abondants, accueillant plusieurs espèces, contribuant à la qualité de l'air, assurant une régulation thermique, etc.

Ceebios a financé trois thèses CIFRE sur la place du design et du designer dans le processus de conception biomimétique, les enveloppes bâties bio-inspirées et le biomimétisme des écosystèmes associés au design régénératif appliqué au projet urbain. Il pilote également un groupe de travail sur le biomimétisme au service de la ville régénérative, le Biomim'City Lab, un collectif d'acteurs de la maîtrise d'œuvre et de la maîtrise d'ouvrage dont fait partie Luca Bertacchi en tant qu'architecte associé de l'agence Béchu. Luca va maintenant illustrer mes propos par des exemples concrets.

Exposé de Luca Bertacchi

L'expérience de l'agence Béchu & associés

L'agence Béchu & associés, que j'ai rejointe il y a huit ans, a été fondée en 1920. Depuis quelques années, elle cherche à aller au-delà du concept de développement durable et s'efforce, pour cela, de s'inspirer du vivant.

En 2017, par exemple, elle a gagné le concours du Skolkovo Innovation Center, un ensemble de pavillons destinés à héberger des chercheurs dans une région de Russie aux conditions climatiques très rudes. Au lieu de disposer les pavillons selon un schéma linéaire classique, l'agence a proposé de les organiser de façon circulaire, en s'inspirant des manchots qui se tiennent en cercles serrés afin de se tenir chaud sur la banquise. Les pavillons ont été équipés de capteurs permanents montrant que dans les périodes les plus froides, il existe un écart de 5°C entre le centre du lotissement et l'extérieur.

Pour le concours du Centre d'excellence en biomimétisme marin, à Biarritz, nous nous sommes inspirés de l'*estran*, c'est-à-dire de la partie du littoral située entre les limites des plus hautes et des plus basses marées, qui constitue un biotope spécifique abritant de nombreux sous-habitats naturels. Nous avons imaginé un « toit liquide » qui capte les eaux de ruissellement, nombreuses sur ce site, les filtre et les réutilise, soit dans le bâtiment, soit pour l'arrosage de jardins d'agrément qui participent à la vie du bâtiment.

Nous avons également participé à un concours pour un bâtiment de bureaux et de laboratoires qui, bien que situé à Nice, devait être passif et exclure le recours à la

climatisation. Pour ce projet, baptisé Meridia, nous nous sommes inspirés du ferocactus, un cactus en forme de tonneau présentant des côtes rectilignes et crénelées. Dans notre projet, le « plissage » des façades génère des ombres portées qui réduisent de 70 % l'apport de chaleur solaire en journée. La nuit, le linéaire du bâtiment, plus important qu'avec des façades lisses, facilite les échanges thermiques qui permettent son rafraîchissement.



Planification urbaine : quelle valeur environnementale pour une ville contributrice ? Benoît Boldron

Benoît Boldron est économiste de formation et urbaniste par qualification. Il conduit un travail de recherche sur un « urbanisme contributeur » pour faire face aux nouveaux défis environnementaux, notamment la régénération de la santé environnementale, y compris humaine. Ces réflexions l'amènent à s'inspirer du vivant pour développer une nouvelle méthodologie de planification pour les villes, afin d'appréhender le développement de l'activité humaine en contribution à l'écosystème des autres espèces de la biosphère. Pour cela, il identifie la planification urbaine et foncière comme la clé de voûte juridique de ce développement, en fondant son approche sur la définition et les enjeux de trois valeurs générées par la planification urbaine : économique, sociale et environnementale.

J'ai piloté un programme intitulé *Faire la métropole bio inspirée*, qui a fait l'objet d'un partenariat de trois ans entre Toulouse Métropole, l'Université de Toulouse et le CIEU (Centre interdisciplinaire d'études urbaines), et auquel a également participé le Ceebios. Nous avons travaillé sur trois thèmes, le partage des habitats, la ville circulaire, les multifonctionnalités. Cette démarche a permis de fédérer plus de 350 professionnels de l'immobilier et chercheurs universitaires. Dans les sciences humaines, la recherche en biomimétisme ne débouche pas sur des brevets mais permet, par une approche renouvelée et sensible, de créer un effet d'entraînement et d'accélérer la transition environnementale.

Six prix pour un cyprès

Fondamentalement, la question est de savoir comment la planification urbaine, qui génère trois types de valeurs (économique, sociale et environnementale), pourrait accroître sa contribution à la création de valeur environnementale. En premier lieu, on peut s'interroger sur les approches économiques passées et actuelles qui permettent de définir la valeur de l'environnement.

Prenons l'exemple d'un jeune cyprès, acheté dans une pépinière au prix de 50 euros. Pour un cyprès adulte poussant dans la campagne toscane, la valeur marchande serait plus difficile à définir, sauf s'il apparaissait possible de l'arracher pour le transplanter ailleurs. Un premier écueil est justement que la valeur d'un bien naturel est plus facile à définir et supérieure, en termes de valeur marchande, lorsqu'il est mort, que lorsqu'il est vivant. Or, un des objectifs est de donner une valeur à la nature vivante dans le but de la préserver.

Pour cela, on ne doit pas se contenter de mesurer la valeur de l'arbre seul, mais tenir compte de son écosystème, car le fait de le couper aura forcément divers impacts sur son environnement. La valeur d'un arbre au sein d'un écosystème devrait ainsi être supérieure à la valeur de l'arbre en lui-même, mais on ne connaît pas non plus d'approche économique fiable pour la calculer, d'autant que, dans notre exemple, il faudrait, pour cela, définir le périmètre de l'écosystème concerné par le cyprès, alors qu'un écosystème, par définition, n'a pas de limites précises.

Pour calculer la valeur de cet arbre, on peut aussi tenter de se fonder sur les services qu'il rend à l'homme, appelés SfN (solutions fondées sur la nature). C'est la démarche adoptée par l'UICN (Union internationale pour la conservation de la nature). Un cyprès planté dans un parc d'agrément, par exemple, remplit diverses fonctions, dont une fonction culturelle. Celle-ci est cependant difficile à monétariser. Des chercheurs ont proposé de contourner la difficulté en mesurant le consentement à payer des bénéficiaires du service rendu par la nature. Les habitants de Munich, par exemple, ont été interrogés sur le budget qu'ils seraient prêts à consacrer à la préservation du bon état de la rivière Isar. L'inconvénient de cette approche est qu'elle est anthropocentrée (la nature n'a de valeur qu'autant qu'elle est utile à l'homme) et ne vaut qu'à l'instant t : comment mesurer la valeur des services que la nature nous rendra demain, par exemple à travers les brevets des futurs médicaments qui seront tirés de plantes de la forêt amazonienne ?

Une cinquième piste consiste à estimer la valeur d'un arbre d'après le volume de CO₂ qu'il est susceptible de capter, sachant que le prix de la tonne de CO₂ fait l'objet de cotations. Toutefois, non seulement, dans cette approche, la valeur de l'arbre varie en fonction de celle du CO₂ et de sa capacité, dans le temps, à capter du CO₂, mais surtout, en tant que puits de carbone, il se

retrouve en concurrence avec des solutions technologiques plus efficaces que les arbres, telles que les capteurs de CO₂ installés par la société Liquid Tree dans les rues de Belgrade. Fonctionnant à base de microalgues, ces appareils sont censés être dix fois plus efficaces que les arbres pour piéger le CO₂. Une valeur fondée sur le volume de CO₂ que le cyprès est capable de stocker ne serait donc pas suffisante pour le préserver.

Une sixième et dernière approche consiste à se fonder sur la valeur esthétique et culturelle des arbres en essayant, par exemple, de définir la valeur des cyprès bordant un chemin dans les collines toscanes. Serait-il pertinent, en se fondant sur la valeur marchande du cyprès acheté en pépinière, de réduire la valeur de ce paysage à 1 500 euros ? Certainement pas. Mais peut-on sérieusement donner une valeur économique au syndrome de Stendhal, cet intense sentiment de ravissement ou d'extase éprouvé par l'écrivain face à la beauté (« *J'étais arrivé à ce point d'émotion où se rencontrent les sensations célestes données par les Beaux-Arts et les sentiments passionnés. En sortant de Santa Croce, j'avais un battement de cœur, la vie était épuisée chez moi, je marchais avec la crainte de tomber* ») ?

Peut-être, en fin de compte, le vivant est-il inestimable, au sens propre ? Dans ce cas, ce ne serait ni aux économistes de définir sa valeur, ni même aux écologues, mais aux artistes, aux peintres, aux poètes, aux philosophes, à toutes ces personnes que l'on n'interroge généralement pas lorsque l'on conçoit la ville.

Mesurer les interactions de la valeur environnementale avec les autres valeurs

À défaut de pouvoir définir la valeur environnementale d'un aménagement urbain, on peut essayer de mesurer ses interactions avec la valeur économique et sociale de la ville.

La ville de Copenhague, dont le port était particulièrement pollué, a décidé de rendre son eau propre dans un objectif de renaturation du biotope aquatique, puis d'y ajouter une valeur sociale et d'usage en offrant à la population six piscines flottantes naturelles. Cette démarche contribue, avec les autres démarches environnementales adoptées par cette ville, à la création d'une valeur économique qui se traduit par une hausse du prix de l'immobilier. C'est ce que l'on appelle la *gentrification verte*, qui vient généralement du fait que la planification urbaine s'est préoccupée prioritairement de la création de valeur environnementale et économique, sans considération pour la valeur sociale.

Vers une fiscalité au service de la valeur environnementale ?

En général, les acteurs de l'immobilier cherchent à mesurer quels avantages et aménités le territoire sur lequel ils veulent implanter leur projet apportera à ce dernier. Si l'on veut que l'urbanisme contribue à la valeur environnementale, on doit inverser le paradigme et se demander de quelles externalités positives le projet permettra au territoire dans lequel il s'insère de bénéficier. Par exemple, « *Quelle contribution ce projet pourrait-il apporter à la gestion de l'eau et au stress hydrique ? Comment pourrait-il produire de l'énergie redistribuée au niveau local (recharges électriques) ?* »

Sachant que les constructions neuves représentent seulement 2 à 3 % d'une ville, il est essentiel de se préoccuper de la contribution de l'existant. Prenons l'exemple de deux parcelles de même taille, chacune comprenant une maison entourée d'un grand terrain. L'un des deux propriétaires a transformé le terrain en parking et créé ainsi de la valeur économique. L'autre a décidé d'en faire un jardin conçu comme un réservoir de biodiversité et un îlot de fraîcheur urbain. Le premier suit uniquement un intérêt privé, alors que le second contribue à l'intérêt général par la création d'une valeur environnementale. Comment rééquilibrer la prise en compte de ces deux valeurs ?

La fiscalité attachée au permis de construire constitue un levier d'incitation majeur pour encourager la création de valeur environnementale dans le neuf et dans l'ancien. S'agissant des constructions existantes, on pourrait imaginer une fiscalité foncière basée non sur les mètres carrés existants, mais sur le potentiel constructible qu'un terrain offre. Pour densifier un quartier, par exemple, on pourrait considérer qu'un terrain d'une taille donnée doit accueillir vingt habitants plutôt qu'un seul, et établir la fiscalité sur ce critère, ce qui constituerait une incitation au renouvellement urbain. Cela paraît tout-à-fait justifiable par le coût des équipements et réseaux à réaliser par la collectivité, qui doivent profiter au plus grand nombre. On pourrait également prévoir un dégrèvement pour les propriétaires qui inscriraient leur parcelle dans une trame verte et en feraient un réservoir de biodiversité.



Vers une meilleure prise en compte des sols dans l'aménagement urbain

Quentin Vincent

Quentin Vincent est diplômé d'un master en écotoxicologie et écologie des systèmes anthropisés et d'un doctorat en écotoxicologie, biodiversité et écosystème. Expert en écologie des sols anthropisés, il est co-fondateur de Sol & Co et directeur scientifique et technique de la start-up. Il est spécialiste des (bio)indicateurs de la qualité des sols urbains et industriels pour l'évaluation des potentialités des sols dans le cadre de projets d'aménagement. La trame brune, l'intégration des sols dans le foncier, l'écosystème des friches industrielles, la renaturation, la traduction statistique des indicateurs de la qualité des sols, la sensibilisation des professionnels, élus, citoyens et étudiants sont les principaux sujets opérationnels et de recherche portés par Quentin.

Je suis docteur en écologie des sols et directeur scientifique et technique de la startup Sol & Co, qui a vocation à aider les aménageurs à tenir compte des différentes fonctions remplies par les sols urbains, en matière de biodiversité notamment.

Le sol, au-delà du visible

Un sol ne se définit pas seulement par sa surface. Dès qu'on le creuse, on s'aperçoit que la terre est organisée en couches distinctes, à travers lesquelles elle contribue à diverses fonctions : fourniture d'aliments, de fibres, de combustibles, de composants pharmaceutiques, de matériaux de construction, cycle des éléments nutritifs, habitat pour une multitude d'organismes, séquestration du carbone, purification de l'eau, régulation du climat, régulation des crues, fondement pour les infrastructures humaines, patrimoine culturel (conservation des vestiges archéologiques, notamment).

En dépit de tous ces services rendus par les sols, ceux-ci ne bénéficient d'aucun cadre réglementaire, à l'exception de quelques textes concernant la pollution et de l'objectif ZAN (Zéro artificialisation nette) qui figure dans la loi Climat et résilience du 22 août 2021. Il

existe une directive européenne sur l'eau, mais celle sur les sols est encore en pourparlers. Or, la structuration naturelle de la terre dans la couche supérieure des sols (de quelques centimètres à plusieurs mètres de profondeur) prend du temps : elle progresse de 0,05 millimètres par an, ce qui fait du sol une ressource non renouvelable, contrairement à l'eau et à l'air.

Des sols urbains mal connus

Sol &co intervient principalement sur les sols urbains qui, par rapport aux sols agricoles, se caractérisent par une forte proportion de couvertures scellées (c'est-à-dire imperméabilisés), mais également par une gamme particulièrement large de couvertures (semi-scillé, nu, potager, arbres, pelouses...). Ces sols sont tous plus ou moins impactés par les activités humaines, mais même un sol anthropisé ne devient pas impropre à toute fonction. Au contraire, ces sols souvent considérés comme dégradés ne le sont pas forcément et remplissent de nombreuses fonctions essentielles aux besoins des organismes et des humains.

Les sols urbains sont beaucoup moins bien étudiés et connus que les sols agricoles. L'objectif de Sol &co est de transférer les connaissances issues de la recherche vers le monde opérationnel. Par exemple, pour appliquer le ZAN, il est nécessaire d'évaluer à quel point un sol est artificialisé. Cette évaluation est d'autant plus complexe que les sols urbains sont très hétérogènes, à la fois horizontalement et verticalement, en raison des différents remblais et déblais dont ils ont fait l'objet au fil de l'histoire et des nombreux usages qu'on leur confère. Sur les cartes pédologiques fournies par Géoportail, on note d'ailleurs que les sols des villes apparaissent généralement en grisé, à la fois parce qu'ils sont mal connus et parce que, en raison de leur hétérogénéité, il est actuellement impossible de les modéliser.

Pourtant, même les sols urbains peuvent remplir des fonctions essentielles aux sociétés humaines : production alimentaire, support d'infrastructures, régulation de la qualité de l'air et du climat, stockage de carbone, habitat pour la biodiversité, approvisionnement en eau, notamment. En ayant une meilleure connaissance de ces sols, on peut optimiser les services qu'ils fournissent et orienter leurs usages afin de répondre aux enjeux environnementaux urbains.

Le diagnostic agro-pédo-biologique

À la demande des aménageurs, nous réalisons un triple diagnostic, pédologique (sur l'organisation du sol), agronomique (sur sa fertilité principalement) et biologique (sur sa biodiversité, en recensant notamment les lombriciens, insectes, araignées, cloportes, collemboles, etc. qu'il accueille). L'objectif est

d'évaluer les potentialités des sols dans chacun de ces trois domaines. Par exemple, si le diagnostic pédologique révèle qu'une dalle de béton se trouve à trente centimètres sous terre, cela compromet la possibilité de planter une forêt urbaine. Un diagnostic de faible biodiversité peut conduire à préconiser un mode de gestion particulier afin de favoriser le retour de cette dernière. L'analyse agronomique permet d'adapter la palette végétale aux caractéristiques du sol afin d'assurer la préservation des sols et de favoriser des milieux particuliers, sur des sols peu fertiles mais riches en biodiversité. Une activité agricole ne peut être envisagée sur un sol peu fertile ou contaminé et, inversement, il serait dommage de bétonner un sol fertile.

L'optimisation des projets

Concrètement, à partir d'un projet d'aménagement initial, nous réalisons les études documentaires et les visites de site pour définir une stratégie de sondage. Une fois ceux-ci effectués et le diagnostic établi, nous évaluons les potentialités des différentes parcelles et indiquons les usages qu'elles sont aptes à accueillir pour maintenir les bienfaits qu'elles produisent en l'état. Nous aidons ainsi l'aménageur à optimiser son projet, ce qui peut avoir un impact économique : maintenir le projet initial est susceptible d'accroître les coûts s'il s'avère nécessaire de recourir au génie pédologique, de reconstruire les sols, d'apporter de la terre végétale, etc.

Les potentialités des sols à l'échelle du territoire

Nous pouvons également intervenir à l'échelle d'un territoire, en évaluant, là aussi, le potentiel agronomique ou hydrique des sols, leur potentiel en termes d'habitat pour la biodiversité ou encore de stockage de carbone. De manière générale, plus un sol apparaît comme multifonctionnel, plus il mérite d'être préservé. Des sols peu fonctionnels peuvent, cependant, revêtir un intérêt patrimonial, par exemple. Cette approche à l'échelle du territoire est surtout pratiquée en périurbain, faute de données suffisantes pour les centres urbains. Elle repose majoritairement sur l'analyse limitée de l'occupation des sols, car il est actuellement difficile de lancer des projets reposant sur des centaines de sondages. Pour la même raison, elle comprend actuellement très peu de diagnostics biologiques.

Un travail en partenariat

Nous travaillons avec de nombreux partenaires, comme la SCIC Crisalid ou le groupe d'intérêt scientifique GISFi sur les friches industrielles, l'UPGE (Union professionnelle du génie écologique), la SCIC Képos sur la transition écologique, ou encore le LIFTI (Laboratoire d'initiatives foncières et territoriales innovantes).



Débats

Régénération versus densification ?

Le concept de ville régénérative remet-il en cause l'idée selon laquelle il serait souhaitable de densifier les villes ?

Benoît Boldron : Entre la volonté de densifier l'habitat autour des services et des transports en commun, et celle de laisser de la place à la nature, des arbitrages sont nécessaires, qui dépendent à la fois du territoire, de la concertation citoyenne et des choix politiques.

Luca Bertacchi : La densification présente de nombreux avantages mais elle a aussi des limites. Certaines villes, comme Paris, gagneraient à être dédensifiées. L'ouvrage de Philippe Bihouix, Sophie Jeantet et Clémence de Selva, « La ville stationnaire - Comment mettre fin à l'étalement urbain ? » permet de dépasser le binarisme entre étalement urbain et densification.

Cultiver des légumes en ville ?

Plusieurs intervenants ont évoqué la possibilité de pratiquer des cultures maraîchères ou agricoles en ville, mais ces activités ne couvriront jamais qu'une part minime des besoins. Ne laissons pas croire à nos concitoyens qu'ils se nourriront un jour des légumes produits dans leur propre ville...

Benoît Boldron : À mon sens, la pratique de cultures en ville a une vocation essentiellement pédagogique. Sachant que, d'ici 2050, 70 % des humains seront des citadins, il est important de leur permettre de conserver un contact avec la nature, de leur montrer que les fruits et légumes ne poussent pas toute l'année, qu'ils peuvent

se développer sans pesticides, etc. Les jardins partagés sont également un facteur de lien social.

Luca Bertacchi : Il est malgré tout intéressant de produire au plus près de l'endroit où les gens habitent. On commence à voir des expériences de fermes verticales, sous la forme de tours dans lesquelles on peut produire des légumes et des fruits.

Utiliser les matériaux de déconstruction pour reconstruire des sols ?

Que pensez-vous de la pratique consistant à réutiliser des matériaux de déconstruction, mélangés à des composts issus de matières organiques collectées en ville, par rapport à l'importation de terres végétales issues de milieux ruraux ?

Quentin Vincent : Dans l'idéal, la reconstruction des sols urbains doit s'effectuer à partir de matériaux issus de l'économie circulaire, donc considérés comme des déchets, qu'il s'agisse de remblais ou de composts. Dans ce domaine, les recherches se poursuivent, mais des expériences ont d'ores et déjà été réalisées, avec un certain succès. En trois ans environ, on retrouve, sur ces sols reconstruits, un niveau de biodiversité comparable à celui de milieux naturels ou semi-naturels. Des tassements peuvent parfois se produire, entraînant des problèmes d'imperméabilité. Dans tous les cas, c'est effectivement une bonne alternative à l'importation de terre végétale, qui n'est pas une solution durable. Non seulement le prix de la terre végétale est en train de s'envoler mais tous les usages des sols urbains ne nécessitent pas des matériaux aussi nobles. Pas besoin de terre végétale, par exemple, pour faire pousser une prairie.

Les méthodes de simulation numérique

Dans l'exemple de Skolkovo, peut-être peindre les bâtiments de la même couleur que le dos des manchots, c'est-à-dire en noir, augmenterait-il le gain de chaleur en hiver, mais cela poserait sans doute des problèmes en été. Existe-t-il des méthodes de simulation numérique pour ajuster l'arbitrage entre confort d'hiver et confort d'été ?

Luca Bertacchi : Notre agence dispose d'outils paramétriques pour préconcevoir les bâtiments sans pour autant effectuer une simulation numérique proprement dite. Nous préférons travailler en partenariat avec des ingénieurs, dont c'est le métier. Notre processus de conception est itératif : nous dessinons différentes formes, puis nous les testons, puis nous les ajustons. Lors du projet Meridia, par exemple, dont le but était de protéger le bâtiment du rayonnement solaire du côté sud, tout en offrant de la lumière naturelle aux bureaux et laboratoires, nous

avons testé différents angles pour les « pliures » de la façade.

Le rôle crucial des PLU

En France, ce sont les maires qui délivrent les permis de construire. Comment les informer de ces réflexions, notamment les élus des moyennes et petites villes ?

Benoît Boldron : L'urbanisme est un des grands domaines dans lesquels les élus locaux restent décisionnaires, même si ce sont généralement les intercommunalités qui planifient et instruisent les dossiers. C'est en amont, au moment de la rédaction du PLU (plan local d'urbanisme), qu'il est possible de faire de la pédagogie et d'informer les élus sur les nouveaux enjeux de l'urbanisme.

Delphine Mathou : Agir au niveau d'un bâtiment isolé n'a effectivement pas beaucoup d'intérêt. C'est à l'échelle du territoire et par conséquent dans la conception du PLU qu'il faut intervenir, pour faire en sorte qu'il soit lui-même bio-inspiré et régénératif, et fixe de grandes règles d'urbanisme et d'aménagement de la ville, que les projets devront respecter. Pour cela, encore faut-il sensibiliser les élus, par exemple en organisant des événements comme le fait France Ville Durable, une association réunissant des collectivités locales leaders et leurs associations, les entreprises de toutes tailles (groupes français mais aussi TPE), l'État (administration centrale et opérateurs spécialisés) et les experts de la ville (en particulier les organisations professionnelles nationales).

Végétaliser les toits ou les blanchir ?

Pour limiter les îlots de chaleur l'été et réduire la consommation d'énergie l'hiver, est-il préférable de végétaliser les toits ou plutôt de les blanchir, voire d'adopter des revêtements qui peuvent, sous tension électrique, être blancs l'été et noirs l'hiver ?

Luca Bertacchi : De nombreuses startups travaillent sur le blanchissement des toitures, mais elles vont avoir fort à faire avec les Architectes des bâtiments de France...

Delphine Mathou : Les toitures végétalisées ne présentent réellement d'intérêt que si elles sont connectées aux autres habitats, notamment ceux en pleine terre. Pour cela, il faut relier les toitures et les sols par des murs végétalisés. De plus, les toitures végétalisées ne doivent pas être conçues comme ornementales mais accueillir toute forme de biodiversité, ce qui nécessite de mobiliser un volume de substrat important, éventuellement contraignant pour la structure des bâtiments, et donc de recourir à de nouveaux matériaux.

Les futures villes vertes d'Afrique

D'ici trente ans, l'Afrique comptera un milliard d'habitants supplémentaires, qui vivront principalement dans les grandes métropoles, dont une partie est encore à construire. À quoi pourraient ressembler les futures villes vertes d'Afrique ?

Luca Bertacchi : Pour avoir vécu quatre ans au Ghana et monté un grand projet dans ce pays, je crois possible d'inciter les Africains à apprendre de nos propres erreurs. Au début, le projet en question, financé par des investisseurs anglais, a surpris nos partenaires locaux, car il s'agissait d'un bâtiment de 40 000 m² dépourvu d'air conditionné. Ils ont cependant été convaincus par le résultat.

Benoît Boldron : Le partage des connaissances va dans les deux sens. À titre d'exemple, les Occidentaux ont des connaissances à apporter aux Africains en matière d'urbanisme durable, par exemple sur le concept de planification par la création de trames écologiques : vertes (milieux naturels et semi-naturels terrestres), bleues (milieux aquatiques), noires (milieux offrant un niveau d'obscurité propice à la biodiversité nocturne) ou brunes (continuité écologique des sols). Il faut cependant rappeler que la conception de la ville ne relève pas uniquement de l'ingénierie. Elle a aussi une dimension culturelle et sociale. De ce point de vue, nous devons nous montrer prudents dans l'exportation de nos modèles. Par exemple, dans l'urbanisme européen, les rues en impasse sont proscrites depuis la fin des années 1980 et nous cherchons systématiquement à privilégier les flux. Dans le Kurdistan irakien, au contraire, on trouve un modèle de ville en impasse lié à une culture tribale, dans laquelle le chef habite au bout de l'impasse et exerce un contrôle social sur la rue.

Delphine Mathou : Il existe déjà des bâtiments bio-inspirés au Sénégal ou encore au Zimbabwe, par exemple. Je pense à une église et à un bâtiment de commerce qui, tous deux, ont été inspirés par le modèle de la termitière.

En matière de biomimétisme, il est particulièrement intéressant de s'inspirer du fonctionnement des écosystèmes locaux pour les appliquer à la construction de la ville. En Europe, par exemple, une agence d'urbanisme a cherché à caractériser les grandes propriétés des forêts de feuillus pour les transposer dans des projets urbains adaptés à des aires géographiques européennes.

Urbanisme et valeur sociale

Benoît Boldron a rappelé que la planification urbaine génère de la valeur économique, environnementale et sociale, mais il a été assez peu question de la dernière. Comment aborder la question de la ville régénérative dans les zones urbaines dites difficiles ?

Benoît Boldron : La valeur sociale est fondamentale, car c'est ce qui fait le ciment de nos villes. En revanche, elle ne se prête pas facilement à la concertation. Dans les réunions publiques, ce qui touche à la dimension sociale des aménagements suscite généralement des réactions plutôt négatives. À partir du moment où la concertation sera menée de façon vraiment qualitative, il faudra sans doute envisager de modifier le droit français, afin que, lorsqu'une concertation aura eu lieu, les habitants n'aient plus le droit de déposer des recours individuels...

Les réalisations dont il a été question aujourd'hui restent exceptionnelles. Comment passer à l'échelle d'une ville ou d'un territoire, ce qui, au passage, obligerait à intégrer la dimension sociale ?

Luca Bertacchi : Dans notre métier, nous allons être de plus en plus confrontés à la nécessité de travailler non seulement sur le neuf, mais également sur l'existant. Comme en acupuncture, nous devons nous concentrer sur les points sensibles des bâtiments, et chaque cas sera différent. Il sera alors utile de répertorier les bonnes idées afin de les mutualiser.

Mots clés : analyse des sols, architecture, bio-inspiration, biodiversité, biomimétisme, densification, écosystèmes, plan local d'urbanisme, urbanisme, ZAN

Citation : Michael Matlosz, Nadège Bouquin, Delphine Mathou, Luca Bertacchi, Benoît Boldron & Quentin Vincent. (2023). *Ville renaturée et régénérative : des concepts à la réalité, quels enjeux pour la recherche et l'innovation ?* Les séances thématiques de l'Académie des technologies. @

Retrouvez les autres parutions des séances thématiques de l'Académie des technologies sur notre site

Académie des technologies. Le Ponant, 19 rue Leblanc, 75015 Paris. 01 53 85 44 44. academie-technologies.fr

Production du comité des travaux. Directeur de la publication : Denis Ranque. Rédacteur en chef de la série : Hélène Louvel. Auteur : Élisabeth Bourguinat. N°ISSN : 2826-6196.

Les propos retranscrits ici ne constituent pas une position de l'Académie des technologies et ils ne relèvent pas, à sa connaissance, de liens d'intérêts. Chaque intervenant a validé la transcription de sa contribution, les autres participants (questions posées) ne sont pas cités nominativement pour favoriser la liberté des échanges.