



BIODIV'2050

Végétalisation du bâti
et biodiversité

MISSION ÉCONOMIE DE LA BIODIVERSITÉ

Numéro 13 - Novembre 2017

cdc
biodiversité

GRUPE

Caisse
des Dépôts



EDITO

L'urbanisation croissante du monde et, en parallèle, l'érosion préoccupante de la biodiversité, modifient la place du végétal en ville.

Depuis longtemps, et peut-être depuis que les villes existent, les parcs et jardins ont joué un rôle important dans la cité, mais avant tout culturel, récréatif et esthétique. S'ajoutent désormais la recherche de fonctions alimentaires, climatiques, de séquestration de CO₂, d'intégration dans la trame régionale de la biodiversité ou de régulation hydrique, pour aboutir à l'émergence, un peu partout dans le monde, d'un nouveau type d'espace : les infrastructures vertes. Celles-ci comportent presque toujours trois composantes de base : des arbres, de l'agriculture urbaine, des terrasses et murs végétalisés.

Dans un précédent numéro de BIODIV'2050 (numéro 5 : « Biodiversité et économie urbaine »), nous avons évoqué les aspects économiques de ces infrastructures et la valeur des services qu'elles rendent. Le présent numéro se penche sur leur déploiement concret, les avantages et inconvénients des différents dispositifs possibles et leurs coûts. Ceci, afin d'apporter aux praticiens de la ville des outils d'aide à la décision et à l'action.



LAURENT PIERMONT

Directeur de la
Mission Economie de la Biodiversité

SOMMAIRE

TRIBUNE

4

Intégrer la nature en ville

- **ISABELLE LE MANIO**
Adjointe à l'Environnement et aux Espaces verts de la ville d'Angers
- **JEAN-ERIC FOURNIER**
Directeur développement durable de la Foncière des Régions

COMPRENDRE

8

Développer la végétalisation des villes en favorisant la biodiversité : Enjeux, solutions et défis opérationnels

- Des solutions de végétalisation aux caractéristiques techniques, économiques et écologiques variables
- La prise en compte de la biodiversité dans la végétalisation : conditions et enjeux d'une végétalisation favorable à la biodiversité
- Quels sont les leviers d'action pour un déploiement et une mise en œuvre opérationnelle des infrastructures végétalisées favorables à la biodiversité ?

INVENTER

24

- La Mission Economie de la Biodiversité développe la recherche sur les procédés d'intégration de la biodiversité en ville
- La biodiversité créatrice de valeurs et de lien social : l'exemple de la Résidence des Folies à Choisy-le-Roi

INTERNATIONAL

29

L'architecture pour recréer du lien entre l'urbain et la nature : Transformer nos villes en forêt, le rêve réalisé de Stefano Boeri Architeti.

INITIATIVES

32

- Le label BiodiverCity®
- Un guide de recommandations pour l'intégration des critères du label Végétal local dans les marchés publics
- Un indicateur pour mesurer l'état de la Biodiversité Potentielle dans les Jardins privés

DIRECTEUR DE LA PUBLICATION : **LAURENT PIERMONT**
RÉDACTEUR EN CHEF : **PHILIPPE THIÉVENT**
COORDINATION-CONCEPTION : **LÔRA ROUVIÈRE ET ANTOINE CADI**
RÉDACTION : **FLORA BOURGÈS, AURÉLIEN GUINGAND ET LÔRA ROUVIÈRE.**
COMMUNICATION : **EMMANUELLE GONZALEZ**
EDITION : **MISSION ECONOMIE DE LA BIODIVERSITÉ**
GRAPHISME : **JOSEPH ISIRDI** – www.lisajoseph.fr
MAQUETTE : **PLANET 7 PRODUCTION**
CONTACT : meb@cdc-biodiversite.fr

BIODIV'2050 PRÉSENTE LES TRAVAUX EN COURS ET LES AVANCÉES DE LA MISSION ECONOMIE DE LA BIODIVERSITÉ. LA RUBRIQUE TRIBUNE ET LES ENCARTS «POINTS DE VUE» PERMETTENT AUX ACTEURS CONCERNÉS DE DONNER LEUR POINT DE VUE SUR LES SUJETS TRAITÉS. LES PROPOS QUI Y FIGURENT N'ENGAGENT QUE LA RESPONSABILITÉ DES PERSONNES INTERROGÉES.
PHOTO DE COUVERTURE : © AGAFAPAPERIAPUNTA



TRIBUNE

INTÉGRER LA NATURE EN VILLE



ISABELLE LE MANIO

Adjointe à l'Environnement et aux Espaces verts de la ville d'Angers

La ville d'Angers a été classée première du Palmarès 2017 des villes les plus vertes de France réalisé par l'Unep. Pouvez-vous nous expliquer quelle place est accordée au développement de la nature en ville dans l'aménagement du territoire de la commune ?

La ville d'Angers compte en moyenne 100 m² d'espaces verts par habitant. Les espaces verts publics (hors forêts) représentent plus de 14 % de la surface de la ville. Nous avons une typologie variée de parcs, jardins et paysages d'accompagnement d'espaces de voirie ou de bâti. C'est un territoire un peu particulier, de basses vallées, qui possède de nombreux cours d'eau et dont une partie est en zone inondable. Celui-ci offre une biodiversité exceptionnelle qui lui vaut une reconnaissance internationale. Nous avons donc une utilisation et une gestion différenciée de ces parcs, jardins et paysages, avec des espaces de type jardin à la française horticole sur lesquels nous travaillons sur le zérophyto, des zones sur lesquelles nous nous concentrons

sur la conservation d'un point de vue naturel et, au sein des zones inondables, nous travaillons plus spécifiquement sur la préservation de la biodiversité et une gestion par les animaux (prairies inondables pâturées par exemple). Enfin, nous possédons également une zone Natura 2000, au sein d'une île totalement inondable, qui est travaillée en collaboration avec des agriculteurs. C'est cette diversité de gestion des paysages qui est intéressante. De plus, l'engagement zérophyto de la ville d'Angers depuis 2010 a fait revenir un certain nombre d'espèces animales et végétales dans l'enceinte de la ville et nous tenons à les maintenir. Nous travaillons, par exemple, en partenariat avec la Ligue pour la Protection des Oiseaux (LPO) pour tenir compte des cycles de la faune et pour réduire les impacts des travaux engagés par nos services. Nous sommes aujourd'hui absolument certains qu'il faut conserver l'équilibre entre végétaux et animaux au sein des villes.

Comment la préservation de la biodiversité est-elle prise en compte dans le développement de cette nature en ville ?

Nous menons des actions auprès des habitants afin de les sensibiliser à la préservation de la biodiversité. Depuis juillet 2010, la ville d'Angers propose à ses habitants la mise à disposition de petits espaces sur le domaine public, au droit des façades ou des murs extérieurs, afin qu'ils puissent revégétaliser un morceau de trottoir devant chez eux, que nous appelons « mini jardins ». Nous leur fournissons et nous leur proposons une première palette de plantation et ils en assurent l'entretien. Cela a beaucoup d'avantages. Tout d'abord, cela permet de favoriser la biodiversité et, notamment, les pollinisateurs. Pour la ville, cela nécessite un entretien différent de ces zones, notamment pour le nettoyage, qui doit être à l'eau et sans produits chimiques. Enfin, les habitants s'approprient mieux l'espace

public devant chez eux, ils adoptent un comportement plus responsable et entretiennent eux-mêmes ces zones. Plus de 400 mini jardins ont ainsi été créés. Notre prochain projet en matière de biodiversité est d'amener des arbres fruitiers de variétés anciennes en ville. Cela a un double intérêt. Tout d'abord pour le public : la cueillette sera autorisée, ce qui permet de favoriser la redécouverte des arbres fruitiers par les citoyens qui sont de plus en plus déconnectés des éléments de nature. Mais aussi pour les oiseaux : les arbres fruitiers entraînent l'apparition de nouvelles espèces.

Par ailleurs, la ville d'Angers possède des zones et des quartiers très paysagers dans lesquels nous mettons en place des dispositifs permettant de réduire l'impact de la présence humaine sur la faune. Par exemple, nous avons installé un crapauduc, avec des bénévoles, afin de permettre aux crapauds d'accéder à un étang, dont la trajectoire était coupée par une route nationale, lors des périodes de reproduction. Cela fonctionne très bien, nous allons développer une nouvelle expérimentation avec la mise en place d'un écuroduc. En effet, en matière de biodiversité il y a des risques identifiés pour certaines espèces, comme c'est le cas chez nous pour les crapauds et les écrevilles. Il faut donc travailler à la fois sur l'apport du végétal en ville et permettre aux animaux de s'y développer le plus naturellement possible.

Qu'est-ce que cela implique en termes de budget et de compétences des services de la ville ?

3,5 % du budget communal est alloué au développement du vert en ville, soit quatre fois plus que la moyenne nationale. Cela représente en moyenne 67 € par an et par habitant. Il est difficile d'isoler la part consacrée à la préservation et au développement de la biodiversité. Nous avons des budgets fléchés sur les plans de gestion, qui représentent au minimum

30 000 € par an. A titre d'exemple, en 2017 le budget alloué à la révision de notre plan de gestion différenciée des espaces paysagers représentait 60 000 €. Mais de nombreux aménagements, non comptabilisés ici, contribuent également à la biodiversité.

En termes de compétences, la ville d'Angers a la chance d'avoir en son sein des écoles d'agriculture, d'horticulture et de paysage, c'est d'ailleurs la ville de l'horticulture et du paysage en France. Le maire d'Angers préside l'association Plante & Cité. Spécialisé dans les espaces verts et le paysage, Plante & Cité est un organisme national d'études et d'expérimentations. Ce centre technique assure le transfert des connaissances scientifiques vers les professionnels des espaces verts, des entreprises et des collectivités territoriales. Plante & Cité produit des ressources qui répondent aux attentes prioritaires des professionnels : réduire les produits phytosanitaires, économiser l'eau, choisir des végétaux adaptés aux contraintes urbaines, préserver la biodiversité, comprendre les bienfaits du végétal sur la santé et le bien-être, etc. Nous travaillons beaucoup avec elle sur les bonnes pratiques et les retours d'expérience de nombreuses communes en France. La ville d'Angers possède donc une vraie expertise grâce à cette structure qui, si elle est une association nationale, possède un fort ancrage local.

Quels ont été les leviers du développement de la végétalisation et de la biodiversité en ville ? Et quels en sont les bénéfices d'un point de vue socio-économique ?

D'un point de vue économique c'est très intéressant. L'annonce du zérophyto a créé une forme de panique pour les villes qui, pour la plupart, envisageaient comme solution la minéralisation en l'absence de moyens pour entretenir la ville sans produits chimiques. Mais c'est une vision courttermiste car même le développement du minéral nécessite de l'entretien. En effet, les plantes vont toujours pousser et, *in fine*, il faudra quand même gérer le végétal qui va apparaître de façon anarchique. A l'inverse, en empruntant la voie opposée, c'est-à-dire en choisissant de végétaliser les paysages urbains, le coût sera différent

car vous serez capables de mettre en œuvre des végétalisations rustiques, qui nécessitent très peu d'entretien, d'eau ou de suivi et qui apportent un intérêt paysager. Pour donner un exemple concret, à Angers, nous avons remplacé l'ensemble des allées goudronnées ou ensablées des cimetières, qui est le procédé classique, par de l'engazonnement. Au lieu de désherber, les services concernés entretiennent les espaces enherbés. Cela apporte des gains en temps par rapport à du désherbage manuel, en qualité paysagère et cela contribue à la réduction des températures et du bilan carbone. Il faut donc envisager ces nouveaux enjeux en termes de conversion, en revisitant les conceptions paysagères et en travaillant sur des typologies de paysages et, ainsi, améliorer la façon dont certains trottoirs, rues, places, etc. sont conçus et gérés. Et c'est très intéressant en termes de budget. Il ne faut pas non plus hésiter à faire participer les habitants à cette transition. Comme je l'ai expliqué précédemment, nous proposons aux habitants d'adopter le pied d'arbre devant chez eux ou d'adopter leur trottoir et ainsi de le gérer, ce qui facilite l'entretien pour les services de la ville. Les habitants s'en occupent directement,

ce qui n'entraîne pas de surcoût pour la commune. La ville ne peut pas être la réponse unique.

En ce qui concerne les leviers, pour l'instant nous travaillons beaucoup sur l'habitant, nous encourageons le compost avec du prêt de matériel afin qu'il commence aussi à intégrer le zérophyto et la biodiversité dans son jardin. Nous avons développé des jardins potagers en agriculture biologique au sein de la maison de l'environnement, avec des jardiniers qui proposent des cours, des formations, du soutien et des conseils aux habitants. L'objectif est de favoriser les pratiques vertueuses chez les particuliers afin qu'ils comprennent que tout est équilibre et que l'introduction d'un certain nombre d'animaux dans leurs jardins va permettre un développement naturel de celui-ci. C'est un bon moyen de former et de sensibiliser les habitants à une nouvelle façon de gérer leurs jardins. Aujourd'hui, dans les projets de nouveaux quartiers, nous maintenons des zones très végétalisées et nous créons au moins un jardin collectif par an. L'idée est que les habitants recommencent à travailler la terre. C'est un très bon vecteur de sensibilisation pour la transition et le développement de la biodiversité en milieu urbain. ■





JEAN-ERIC FOURNIER
 Directeur développement durable de la Foncière des Régions

Quels ont été les leviers internes et facteurs externes qui ont conduit votre groupe à s'engager en faveur de la biodiversité ?

Opérateur immobilier à la tête d'un patrimoine européen de 21 Md€, Foncière des Régions s'est dotée d'une ambitieuse stratégie développement durable dès 2008, venant consolider ses savoir-faire immobiliers, techniques et financiers. En 2010, la biodiversité a été intégrée à la stratégie globale du groupe. Cet engagement a été renforcé par la signature de deux chartes biodiversité en interne : l'une pour les opérations de construction ou de rénovation, l'autre pour les sites en exploitation. Cette politique biodiversité, publiée chaque année dans notre rapport développement durable, intègre notamment la logique des trames vertes issues de la loi Grenelle 2 et son reporting est conforme à la version G4 de la Global Reporting Initiative (GRI).

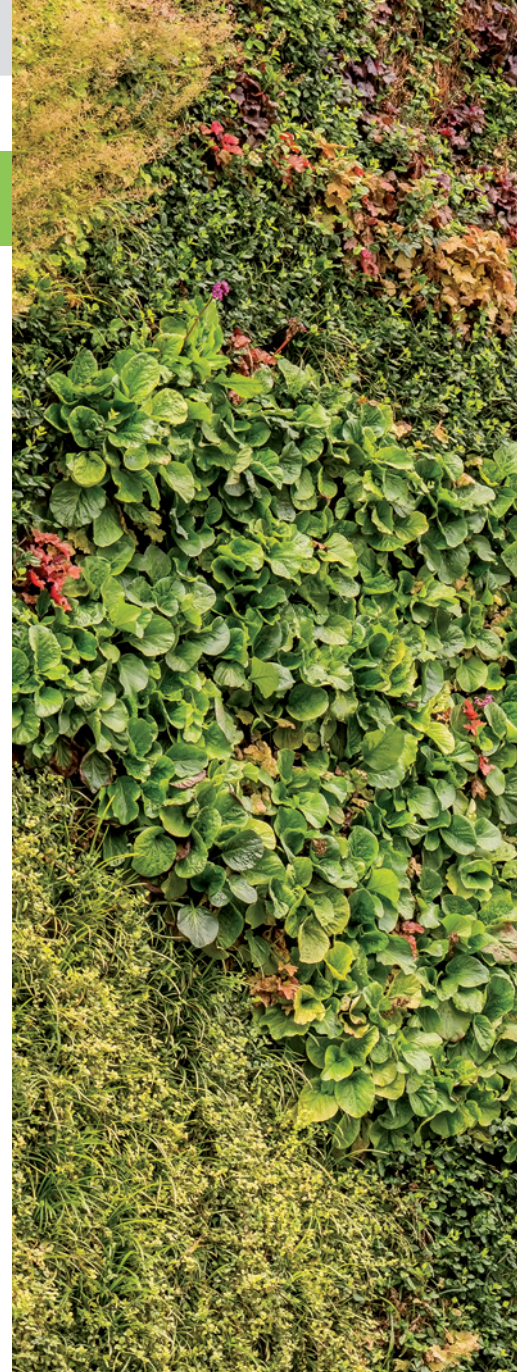
Il importe pour Foncière des Régions que ses sites offrent, sur le plan de la biodiversité, une vraie valeur ajoutée aux occupants finaux, à l'environnement au sens large ainsi qu'à la collectivité. De nombreuses études démontrent le lien entre la présence de la nature et le

bien-être ressenti par les occupants des immeubles. En ce sens, nos locataires ont des attentes importantes en matière de confort apporté à leurs collaborateurs. Afin de répondre à ces attentes, Foncière des Régions s'attache à développer la mixité en concevant des lieux de vie qui associent bureaux, services, commerces et espaces verts, afin d'améliorer et de simplifier l'expérience utilisateur. En définitive, les bénéfices sont nombreux à l'échelle de la valorisation du bâtiment et du cadre de travail de ses occupants, tout en favorisant la biodiversité.

Comment le sujet de la biodiversité s'inscrit-il au sein de votre politique RSE ? Quels sont, selon vous, les avantages et bénéfices tirés de votre engagement sur le sujet ?

Les différents travaux consacrés à la biodiversité par Foncière des Régions, seule ou avec ses partenaires (Plan Bâtiment, l'Alliance HQE-GBC France et l'association ORÉE), ont permis d'identifier deux types d'enjeux prioritaires en matière de préservation de la biodiversité : le premier vise les sites que nous développons, restructurons et gérons. Dans ce cas, il s'agit de limiter l'empreinte écologique de nos actifs et de favoriser la biodiversité. Le second vise l'empreinte en amont de nos opérations, avec l'extraction des matières premières puis leur transformation en matériaux ou matériels, ce qui impacte l'environnement. Les analyses du cycle de vie que nous conduisons depuis 2010 sur nos opérations de construction ou de rénovation nous ont sensibilisés à ce sujet.

La politique biodiversité que Foncière des Régions a initiée dès 2010 intègre les enjeux suivants à chaque stade du cycle de vie de l'immeuble : l'écoconception des développements et rénovations en prenant en compte la biodiversité en amont, la plantation de végétaux indigènes limitant l'arrosage et préservant la faune et la flore, la valorisation des fonctions de l'espace vert auprès des utilisateurs, l'adaptation de l'entretien des espaces verts pour répondre à des critères écoresponsables et enfin la participation à la recherche et à l'innovation.



Depuis, soucieuse de ces différents enjeux, Foncière des Régions s'attache à favoriser la biodiversité sur ses sites. En définitive, les impacts sur la biodiversité s'avèrent souvent plus importants en amont du cycle de construction que sur les sites en développement et en rénovation. Désireuse de réduire ces impacts sur la « biodiversité grise », ou « ex-situ », Foncière des Régions a notamment engagé différentes initiatives touchant au choix des matériaux et à l'économie circulaire. C'est dans ce cadre qu'elle soutient par exemple, depuis 2015, le projet de l'association Le Pic Vert visant à la reconversion sociale et environnementale de l'ancienne carrière CARBIEV, dans la réserve de la laine de Bièvre (38), pour sa valorisation auprès du public.



Comment, selon vous, la biodiversité peut-elle être pleinement intégrée dans la ville de demain ? En particulier, quel rôle et place voyez-vous pour le déploiement de dispositifs de végétalisation du bâti ? Quelles sont vos perspectives futures sur le sujet biodiversité ?

Foncière des Régions réalise annuellement une cartographie de la biodiversité sur le portefeuille d'immeubles qu'elle gère sur son parc Bureaux en France. L'intégration de la biodiversité dans la ville de demain doit s'instruire selon un plan d'ensemble, une compréhension élargie du sujet, les bâtiments ainsi que leurs jardins, terrasses et murs végétalisés. Il ne s'agit pas de reconstituer la biodiversité dans le

cadre de chaque projet immobilier, mais de l'intégrer au mieux dans un schéma cohérent permettant le développement de la biodiversité et ce, en prenant en compte l'environnement urbain et les interactions existantes : îlot, quartier, etc. Et, à ce titre, Foncière des Régions est signataire de la charte « Objectif 100 hectares » de terrasses et murs végétalisés à Paris. Dans ce cadre, nous avons par exemple travaillé à la refonte et à la valorisation de l'immeuble Carré Suffren à Paris et aménagé 2 000 m² de jardins et terrasses végétalisés. Carré Suffren est ainsi devenu le premier site en exploitation ayant obtenu le label BiodiverCity® qui récompense la qualité de la conception et de la réalisation des aménagements paysagers et leur intégration dans le paysage urbain.

Foncière des Régions s'attache à limiter l'étalement urbain en inscrivant ses développements dans des opérations de requalification qui favorisent la reconstruction de la ville sur la ville. L'utilisation parcimonieuse des sols correspond à une volonté de limiter leur imperméabilisation, à ne pas utiliser de terres vivrières pour construire de nouveaux immeubles et à prendre en compte d'éventuels risques d'inondation. Les opérations Cœur d'Orly, Hélios (Vélizy-Villacoublay) ou Euromed Center (Marseille) par exemple, illustrent cette démarche : elles permettent de valoriser les terrains déjà urbanisés ou des immeubles existants. ■

COMPRENDRE DÉVELOPPER LA VÉGÉTALISATION DES VILLES EN FAVORISANT LA BIODIVERSITÉ : ENJEUX, SOLUTIONS ET DÉFIS OPÉRATIONNELS

La loi biodiversité⁽¹⁾, promulguée le 8 août 2016, introduit l'obligation, pour toute création ou rénovation de surfaces de vente et d'ensembles commerciaux à partir de 1000 m², de dédier tout ou partie de leur toiture, de manière non exclusive, soit à des procédés de production d'énergies renouvelables, soit à un système de végétalisation basé sur un mode cultural garantissant un haut degré d'efficacité thermique et d'isolation et favorisant la préservation et la reconquête de la biodiversité, soit à d'autres dispositifs aboutissant au même résultat. Au-delà de cette avancée réglementaire, certaines communes françaises affichent des objectifs ambitieux en termes de végétalisation volontaire. Par exemple, la Ville de Paris s'est engagée dans un programme visant à végétaliser 100 hectares de bâti d'ici 2020 (Ville de Paris, 2017). Cela illustre une prise de conscience qui gagne peu à peu les métropoles. En 2050, la planète comptera plus de 9,7 milliards d'habitants dont 66 % d'urbains, soit 2,5 milliards de citoyens de plus qu'en 2014 selon l'ONU. L'accueil de ces populations nécessite une urbanisation constante des territoires, qui se traduit par la densification des cœurs urbains et l'étalement progressif des villes aux dépens des espaces naturels et agricoles.

Or, les écosystèmes et leurs fonctionnalités sont des composantes indispensables au bien-être humain ainsi qu'au développement économique et social. En effet, ils sont à l'origine de services, tels que la nourriture, la qualité de l'eau, la production de bois, la purification de l'air, la

formation des sols ou encore la pollinisation. Le *Millenium Ecosystem Assessment* (2005) a permis de recenser l'ensemble de ces services écosystémiques. Ils se regroupent sous plusieurs catégories : les services de support, les services d'approvisionnement, les services de régulation ou encore les services culturels. Le rôle structurel capital joué par la biodiversité dans la persistance des écosystèmes et de leurs fonctions a également été mis en évidence dans la continuité de ces travaux (Maes, 2013). Dans les villes, là où l'artificialisation des sols et la fragmentation des habitats sont les plus fortes, la dégradation des services de régulation a des conséquences déjà bien visibles sur le bien-être humain. Elle se traduit par des îlots de chaleur urbains⁽²⁾ et des épisodes de pollution de l'air engendrant des risques sanitaires pour les populations (Tan, 2010). La disparition des écosystèmes autour des villes prive également celles-ci d'autres services de régulation. En particulier, le recul des zones humides amplifie les phénomènes de crues et empêche l'élimination des polluants par certains végétaux et micro-organismes. Actuellement, les solutions mises en œuvre pour pallier la dégradation des services écosystémiques sont principalement curatives : les bâtiments sont climatisés et les eaux pluviales sont canalisées et traitées dans des stations d'épuration. Ces solutions présentent des limites car non seulement elles font appel à des investissements importants dans des infrastructures et des équipements adaptés, mais elles peuvent même alimenter les

phénomènes négatifs initiaux : par exemple, la climatisation des bâtiments qui rejette de la chaleur dans l'atmosphère accentue encore l'élévation des températures constatée dans les cœurs urbains.

C'est pourquoi, la réintroduction de la biodiversité et de ses services écosystémiques en ville s'impose progressivement comme une réponse durable et pertinente à la dégradation des conditions de vie en milieu urbain. En effet, la végétation peut être valorisée pour ses fonctions de régulation de la température (ombrage, évapotranspiration), de régulation de la pollution (captation de polluants dans l'air, le sol et l'eau) ou encore de stockage (eau, carbone). De plus, elle est généralement bien accueillie par les habitants car elle procure des sentiments de bien-être et de qualité de vie (Laille, 2013). En outre, elle peut être un vecteur de lien social et même un support de biodiversité. En effet, elle permet de faciliter les déplacements des espèces et de connecter les habitats (trame verte), un enjeu primordial pour la conservation de la biodiversité, dont dépendent les services écosystémiques. Si les parcs urbains, les alignements d'arbres ou autres parterres engazonnés et fleuris sont des aménagements déjà répandus, la densité du tissu urbain amène aujourd'hui à envisager chaque surface nue, notamment les murs aveugles et les toitures plates, comme un site potentiel de végétalisation. Ces formes de végétalisation font d'ailleurs, depuis 2013, l'objet d'un congrès annuel mondial, le *World Green Infrastructure Congress*, dont le dernier s'est tenu à Berlin en juin 2017.

(1) Loi n° 2016-1087 pour la reconquête de la biodiversité, de la nature et des paysages

(2) Phénomènes caractérisés par une température plus élevée dans les centres urbains que dans les zones périurbaines. Ceux-ci sont dus à l'association de la chaleur et des gaz dégagés dans l'atmosphère par les activités humaines avec la réverbération des rayons du soleil sur les surfaces minérales (Apur, 2012)



Les dernières décennies ont vu se développer de nombreuses solutions, tantôt inspirées de techniques ancestrales, tantôt innovantes, pour végétaliser le bâti. Celles-ci ont l'avantage de contribuer à l'amélioration de l'environnement urbain en évitant certaines dépenses. Et, selon la façon dont elles sont conçues et entretenues, elles peuvent également participer au maintien de la biodiversité à une échelle locale, voire plus étendue. La réflexion menée ici a pour but de donner des clés aux acteurs souhaitant mettre en œuvre une végétalisation du bâti favorable à la biodiversité. Dans un premier temps, les principales formes de végétalisation existantes seront présentées et leurs caractéristiques environnementales seront discutées. Puis des pistes de réalisations compatibles avec l'accueil de la biodiversité seront proposées à partir de prescriptions techniques recueillies dans la littérature ou auprès d'experts en écologie. Enfin, une dernière partie sera consacrée aux leviers à mobiliser pour dépasser les obstacles qui peuvent freiner le déploiement d'une végétalisation urbaine plus favorable à la biodiversité.

Des solutions de végétalisation aux caractéristiques techniques, économiques et écologiques variables

Panorama des dispositifs de végétalisation existants et typologie des principaux systèmes

En France, la végétalisation des villes est encouragée par différentes opérations : de la végétalisation des rues par les riverains à Bordeaux, Lille ou encore Hazebrouck (59) (« Permis de végétaliser », « Ma rue est un jardin ») aux appels à projets « Paris végétalisation innovante » (2013) ou « Réinventer Paris » (2015). Elle a la particularité d'être réalisable aussi bien par un particulier sans compétences techniques spécifiques que par une entreprise spécialisée. Cela s'explique par la grande diversité des systèmes de végétalisation existants, des plus simples aux plus complexes. Sur le bâti, on distingue deux catégories de systèmes

de végétalisation : les dispositifs sur murs et les dispositifs sur toitures. En effet, les techniques utilisées sur les façades verticales ne sont pas transposables sur les toits horizontaux et inversement. Ensuite, à l'intérieur de ces catégories, des typologies peuvent être faites.

Pour les dispositifs sur toitures, les systèmes se différencient principalement par leur hauteur de substrat. Liée à la résistance de la structure porteuse, elle détermine la palette végétale possible et les capacités de rétention d'eau et d'éléments nutritifs. Les toitures végétalisées sont dites **extensives** lorsqu'elles ne peuvent accueillir qu'une mince couche de substrat et donc une palette végétale limitée (muscinale ou herbacée). Au contraire, elles sont dites **intensives** lorsque la structure porteuse permet de supporter une importante épaisseur de substrat dans laquelle se développent toutes les strates végétales (herbacée, arbustive et arborée). Enfin, les **toitures semi-intensives** sont celles dont l'épaisseur de substrat intermédiaire permet aux plantes herbacées et à certaines plantes arbustives de s'établir (voir le Tableau 1, p.10).

Tableau 1 : Typologie et caractéristiques des dispositifs de végétalisation des toitures

	INTENSIVES	SEMI-INTENSIVES	EXTENSIVES
Support de la végétation	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Eléments porteurs béton. ▶ Etanchéité anti-racines. 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Eléments porteurs béton, bois ou acier. ▶ Etanchéité anti-racines. 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Eléments porteurs béton, bois ou acier. ▶ Etanchéité anti-racines.
Type de construction	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Neuves uniquement 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Neuves ou rénovées si la toiture le permet 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Neuves ou rénovées
Substrat	<ul style="list-style-type: none"> ▶ > 30-40 cm d'épaisseur (varie selon auteurs). Terre végétale généralement. 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 12-30 cm, 15-40 cm d'épaisseur (varie selon auteurs). ▶ Substrat léger à dominante minérale. 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ < 12-15 cm d'épaisseur (varie selon auteurs). ▶ Substrat léger à dominante minérale.
Palette végétale possible	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Végétation souvent horticole, grande diversité d'espèces possibles, strates muscinale à arborée. 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Intermédiaire entre intensif et extensif, gamme de végétaux intéressante, strates muscinale, herbacée et arbustive. 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Tapis végétal, association de plantes spécialement adaptées, peu de diversité possible, strates muscinale et herbacée.
Equipement de maintenance	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Système d'irrigation 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Système d'irrigation (optionnel) 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Système d'irrigation (optionnel)
Poids	<ul style="list-style-type: none"> ▶ > 600 Kg/m² 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 150-350 kg/m² 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 30-180 kg/m²

Références : (ADIVET, CSFE, SNPPA, UNEP, 2007), (Toiture.pro), (Laille et al., 2013), (OBDU, Natureparif, Plante & Cité, MNHN, 2011), (CSTC, 2006)

Tableau 2 : Typologie et caractéristiques des dispositifs de végétalisation des murs

	VÉGÉTALISATION VERTICALE			
	FAÇADES VÉGÉTALISÉES		MURS VIVANTS	
	FAÇADES DIRECTES	FAÇADES INDIRECTES	MURS CONTINUS (ex. : murs Patrick Blanc)	MURS MODULAIRES
Support de la végétation	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Néant 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Câbles, treillis, filets 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Plaque de PVC 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Alvéoles en plastique, cages métalliques
Substrat	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Sol naturel ou terre végétale dans jardinière 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Sol naturel ou terre végétale dans jardinière 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Néant 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Sphaigne, substrat minéral inerte et incompressible, substrat organominéral (70/30)
Palette végétale possible	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Grimpantes à racines aériennes ou ventouses, peu d'espèces utilisées 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Grimpantes à vrilles ou tiges volubiles, peu d'espèces utilisées 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Très grande diversité d'espèces herbacées ou arbustives, souvent exotiques 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Diversité moyenne d'espèces herbacées ou arbustives. Fougères, petites graminées, vivaces
Equipement de maintenance	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Néant 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Néant 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Irrigation goutte-à-goutte 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Irrigation goutte-à-goutte
Poids	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Négligeable 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 14 kg/m² (bois) Jusqu'à 50 kg/m² selon support 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 30 kg/m² 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 70 kg/m² et 85 à 95 kg/m² à saturation d'eau (alvéoles préformées) 100 kg/m² (cages métalliques)

Références : (Bernier, 2011) (Norpac et IDDR (a)), (Vertiss), (Modulogreen), (Lambert clôtures), (Truffaut) (Bruxelles environnement, 2010)

En ce qui concerne les dispositifs verticaux (voir Tableau 2, ci-contre), on distingue deux types de système. Les façades végétalisées désignent les systèmes de plantes grimpantes enracinées au sol et qui croissent le long du mur (façades directes) ou le long d'un support (façades indirectes), tandis que le terme mur vivant désigne des dispositifs hors-sols : les systèmes modulaires (assemblage de caissettes renfermant le substrat dans lequel poussent les plantes) et les systèmes continus (nappe de feutre sur support rigide à laquelle sont fixés des végétaux sans substrat). Ces derniers sont aussi appelés murs Patrick Blanc, du nom du paysagiste qui a utilisé le procédé pour la première fois et dont certaines œuvres sont visibles à Paris, sur le mur du musée du Quai Branly ou encore sur celui du Bazar de l'Hôtel de Ville.

Par ailleurs, le secteur de la végétalisation du bâti connaissant un essor important, il est fréquent de voir apparaître de nouvelles techniques qui sont pour l'instant marginales et ne s'intègrent pas forcément dans ces typologies. C'est le cas par exemple des biofaçades : des murs rideaux intégrant des photobioréacteurs de microalgues dans un objectif alimentaire et d'amélioration des performances énergétiques des bâtiments (Culturesciences, 2017).

L'innovation continue en matière de solutions de végétalisation montre l'intérêt de la recherche et développement (R&D) pour cet enjeu. Mais, grâce à la diversité des solutions existantes, il est déjà possible d'aménager une infrastructure végétalisée sur de nombreuses constructions en tenant compte des possibilités parfois restreintes qu'elles offrent.

Analyse du marché, du cadre technique et des coûts

Le potentiel de végétalisation du bâti semble important au regard des surfaces disponibles. Par exemple, les toits représentent jusqu'à 32 % des surfaces horizontales des aires construites (Frazer, 2005). Le Centre Scientifique et Technique

du Bâtiment annonce qu'en France, 22 millions de m² de toitures étanchées seraient potentiellement transformables en toitures végétalisées (CSTB, 2005). A titre d'exemple, en 2013, une étude réalisée par l'APUR a recensé 80 ha de toitures plates à fort potentiel de végétalisation (ni fragiles, ni encombrées et de plus de 200 m²) dans Paris intramuros, soit presque 1 % de la surface de la ville (Apur, 2013). De même, les ruptures entre styles architecturaux ont donné naissance à de nombreux murs aveugles qui pourraient facilement être valorisés par de la végétalisation verticale. L'Apur réalise actuellement une autre étude dans Paris pour évaluer ce potentiel, sachant que la capitale compte déjà 30 ha de murs végétalisés (Apur, 2017).

Le potentiel de végétalisation est réel et bien exploité au niveau national. Le marché est dynamique, comme le montre le seuil de 1 000 000 de m² de toitures végétalisées par an franchi en 2010 selon les données de l'Adivet (Association des toitures et façades végétales). La végétalisation des murs est moins répandue et concerne majoritairement les acteurs privés. Les données chiffrées sont donc plus difficiles à obtenir mais elles seraient de l'ordre de 8 000 m² par an. L'association note cependant un ralentissement du rythme de la végétalisation des toitures. Cela pourrait s'expliquer par plusieurs raisons. D'une part, une grande partie des toitures techniquement les plus simples à végétaliser a déjà été aménagée. Et, d'autre part, les maîtres d'ouvrage des toitures végétalisées sont en majorité des acteurs publics, ce qui peut compromettre les projets de végétalisation dans un contexte de réduction des moyens budgétaires publics.

Les contraintes réglementaires et techniques associées à la végétalisation peuvent aussi être un frein important à son essor, en particulier sur les toitures. En effet, un tel aménagement nécessite des dispositifs de mise en sécurité des personnes (garde-corps, lignes de vie), des points d'eau de débit dimensionné

pour la surface végétalisée, une réfection systématique de l'étanchéité et des chemins de circulation pour l'accès aux équipements techniques (ADIVET, CSFE, SNPPA, UNEP, 2007). Un maître d'ouvrage ne soupçonne pas forcément ces obligations lorsqu'il se lance dans un projet de végétalisation. Quant aux opérations d'entretien, elles sont semblables à celles d'un espace vert mais elles ont lieu dans un contexte particulier auquel ne sont pas toujours formés les gestionnaires : installations difficilement accessibles, matériel spécifique (nacelles et cordées pour les murs végétaux par exemple) ou encore régulation de l'apport en eau via des systèmes très techniques. Toutes les infrastructures végétalisées ne sont toutefois pas aussi complexes à entretenir : les murs vivants nécessitent une surveillance constante (ferti-irrigation, contrôle du système d'irrigation, mise hors gel en hiver), mais les toitures ont besoin d'interventions plus ponctuelles (nettoyage des évacuations d'eau pluviale, fertilisation d'appoint, irrigation optionnelle) et les façades végétalisées ne font l'objet que de très peu d'interventions (surveillance de la croissance des plantes). L'entretien des murs et toitures végétalisés peut faire l'objet d'un contrat entre le maître d'ouvrage et l'entreprise ayant réalisé les travaux d'aménagement (ADIVET, CSFE, SNPPA, UNEP, 2007). Il ne semble pas être assez pris en compte à l'amont des projets, pourtant il permet de conserver l'aspect des ouvrages et d'assurer leur pérennité (OBDU, Natureparif, Plante & Cité, MNHN, 2011).

Mais le coût, ou le surcoût en cas de construction neuve, des infrastructures végétalisées est sans doute le principal frein à leur développement. Pourtant, là encore l'éventail de solutions existantes permet de végétaliser à différentes hauteurs d'investissements (voir Tableau 3, p.12).

Hormis les investissements liés à l'installation et à l'entretien du système de végétalisation en tant que tel, il existe d'autres coûts associés à la structure

COMPRENDRE DÉVELOPPER LA VÉGÉTALISATION DES VILLES EN FAVORISANT LA BIODIVERSITÉ : ENJEUX, SOLUTIONS ET DÉFIS OPÉRATIONNELS

Tableau 3 : Coûts des principaux dispositifs de végétalisation

SYSTÈME DE VÉGÉTALISATION	COÛT À L'INSTALLATION	COÛT À L'ENTRETIEN	RÉFÉRENCES
Toiture végétale	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 50-100 € TTC/m², étanchéité comprise (toiture extensive) ▶ 100-200 € TTC/m², étanchéité comprise (toitures semi-intensives) ▶ > 200 € TTC/m², étanchéité comprise (toitures intensives) 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 1 à 2,50 € TTC/m²/an (toiture extensive) ▶ 2 à 5 € TTC/m²/an (toiture intensive) 	(Entretien avec expert) (Pierrey-Sud Développement) (Toiture.pro) (leboncouvreur.pro)
Mur végétal Patrick Blanc	▶ 350-750 €/m ²	▶ 75 € HT/m ² /an (45 à 160 € HT/m ² /an) (main d'œuvre ou sous-traitance, hors consommations d'eau et d'électricité)	(Plante & Cité et Arddhor Critt Horticole, 2013) (Perini et al., 2011)
Mur végétal modulaire	▶ 400-600 €/m ² (modules HDPE)	▶ 45 € HT/m ² /an (25 à 120 € HT/m ² /an) (main d'œuvre ou sous-traitance, hors consommations d'eau et d'électricité)	(Plante & Cité et Arddhor Critt Horticole, 2013) (Perini et al., 2011)
Façades directes	<ul style="list-style-type: none"> ▶ < 75 €/m² ▶ 30-45€/m² 	▶ Négligeable	(Manso et al., 2015) (Perini, et al., 2011)
Façades indirectes	<ul style="list-style-type: none"> ▶ < 75 €/m² ▶ 40-75 €/m² 	▶ Négligeable	(Manso et al., 2015) (Perini, et al., 2011)
Aménagement paysager urbain	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 35 €/m² HT (gazon, massifs) ▶ 200 €/m² (réalisations dans un cadre minéral, arrosage, bacs de plantation, ...) 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 25 €/m²/an (massif fleuri horizontal classique) ▶ 5 à 7 €/m²/an (espaces verts faiblement qualitatifs) ▶ 12 à 15 €/m²/an (Jardin de prestige) 	(Plante & Cité et Arddhor Critt Horticole, 2013)

Tableau 4 : Coût global d'un projet de végétalisation de toiture

COMPOSANTE DU COÛT	DESCRIPTION	MONTANT
INSTALLATION		
Coût de définition et de conception du projet	▶ Intervention d'un spécialiste	▶ 5 à 10 % du coût global du projet de toit végétalisé
Coût du diagnostic initial du toit	▶ Étude de structure	▶ 2,5 à 5 % du coût global du projet de toit végétalisé
Coût de la réfection du toit	▶ Pose d'une membrane d'étanchéité anti-racines	▶ 80 à 130€/m ²
Coût de la mise en sécurité	▶ Clôtures, garde-corps, ...	▶ 35 à 80 €/m ²
Coût des matières premières	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Base du complexe de végétalisation : bordure, système drainant, tissu filtrant ▶ Plantes 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 45 à 90 €/m² (végétalisation extensive) ▶ 130 à 250 €/m² (végétalisation intensive) ▶ 9 à 25 €/m² (végétalisation extensive) ▶ 45 à 1800 €/m² (végétalisation intensive)
Coût d'installation et de main d'œuvre	▶ Transport des matériaux, main d'œuvre	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 25 à 70 €/m² (végétalisation extensive) ▶ 70 à 160 €/m² (végétalisation intensive)
Coûts supplémentaires	▶ Système d'irrigation (optionnel)	▶ 18 à 35 €/m ²
MAINTENANCE		
Charges d'entretien	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Entretien 1 à 4 fois par an, arrosage facultatif (végétalisation extensive) ▶ Entretien continu, plus fréquent et plus conséquent 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 10 à 18 €/m²/an les deux premières années puis 1 à 2 visites de contrôle par an. ▶ 11 à 18 €/m²/an sur l'ensemble de la durée de vie de la toiture

Référence : Ernst & Young, 2009

↳ d'accueil qui peuvent dissuader les maîtres d'ouvrage. En 2009, Ernst & Young a réalisé pour la ville de Nice une étude des coûts d'un projet de végétalisation de toiture, obtenant les résultats présentés dans le Tableau 4 (Ernst & Young, 2009).

Ainsi, d'après ces résultats et à titre d'exemple, l'installation d'une toiture végétalisée de 100 m² avec mise en sécurité du toit et irrigation coûterait entre 23 000 € et 50 000 € pour un système extensif et entre 40 000 € et 290 000 € pour un système intensif. Ces chiffres sont des estimations de coûts moyens. Dans la réalité, la surface de l'aménagement est un paramètre important, ainsi les coûts au m² sont plus élevés pour les petites surfaces. D'autre part, cette étude estime à 100 €/m² le coût moyen d'une toiture terrasse nue contre 180 à 380 €/m² pour une toiture extensive et 360 à 2 700 €/m² pour une toiture végétalisée intensive. La différence paraît importante mais elle est moindre à l'échelle d'une construction neuve. Par exemple, un projet de trois bâtiments certifiés Bâtiment Basse Consommation de type R+2, représentant 1 600 m² de surface construite, dont 60 % de la surface de toitures a été végétalisée de manière extensive, a engendré un surcoût de 30 % à l'échelle de la toiture mais de seulement 1,38 % à l'échelle de l'ensemble du projet (Ernst & Young, 2009).

A l'échelle du projet : un investissement initial important mais des économies, voire même des bénéfices sur le long-terme pour le maître d'ouvrage

Si l'investissement initial dans une infrastructure végétalisée est important, ce coût devrait être considéré sur le long-terme car c'est tout au long de sa durée de vie que l'aménagement sera une source d'économies pour le maître d'ouvrage.

Tout d'abord, **la végétalisation permet de réduire les dépenses énergétiques grâce à l'isolation thermique qu'elle procure,**

tout particulièrement en période estivale. Ainsi, la température mesurée au contact d'un mur nu peut être supérieure de 12°C (Ottelé et al., 2011) ou même de 14°C (Bernier, 2011) à celle mesurée au contact d'une façade végétalisée et la température mesurée au contact d'une toiture nue peut être supérieure de 35°C à celle mesurée au contact d'une toiture végétalisée (Lassalle, 2006). La réduction de la température intérieure par la végétalisation en période estivale se traduit en économies d'énergie de climatisation. Ainsi, une étude menée à l'échelle d'un immeuble à Madrid a montré une diminution des coûts de climatisation de 25 % au dernier étage, puis de 9 %, 2 % et 1 % aux étages inférieurs (Oberndorfer, Lundholm, & Bass, 2007). De plus, une toiture de sedums mise en place sur une mauvaise isolation réduit les flux de chaleur entrant de 89 % (Niachou, 2001), ce procédé est donc particulièrement intéressant en rénovation. Quant à la végétation verticale, elle conduirait à une économie de 43 % des dépenses annuelles de climatisation d'un bâtiment, quel que soit le système utilisé (Ottelé et al., 2011).

Ensuite, **les murs et toitures végétalisés protègent les bâtiments des intempéries et agressions qu'ils subissent** (rayons solaires ultra-violets, fluctuations journalières de température, gaz atmosphériques, etc.) et accroissent considérablement la durée de vie des matériaux. En végétalisant une toiture, il est possible de prolonger la durée de vie de l'étanchéité d'un toit jusqu'à 50 ans, tandis que l'étanchéité d'une toiture nue a une durée de vie moyenne de 15 ans (Kosareo & Ries, 2006). De même, la plupart des systèmes de végétalisation verticale comprennent une lame d'air, entre le complexe de végétalisation et la surface du mur, qui réduit les variations de température et d'humidité auxquelles sont soumis les murs (Sternberg, Viles, & Cathersides, 2011). Seule exception : les façades directes, dont les plantes grimpantes ont la réputation d'endommager le bâti. Ces espèces à ventouses ou à racines-crampons comme le lierre commun (*Hedera helix*) ou la

vigne vierge (*Parthenocissus quinquefolia*) peuvent effectivement pénétrer et élargir des fissures de murs mais elles n'en sont pas à l'origine. Elles peuvent donc être implantées sans risque contre des murs en bon état (Bernier, 2011). En plus d'être esthétiques, les murs et façades végétalisés empêchent aussi le vandalisme : graffitis et affichage sauvage dont le retrait a coûté, par exemple, 11,4 millions d'euros à la Ville de Paris entre 2010 et 2012 (Michot, 2012) et 650 000 euros à la ville de Lyon en 2005 (Brancier, 2006). Certaines communes supportent entièrement ces coûts mais d'autres demandent un investissement de la part des propriétaires pour la prestation de retrait de tags, sous la forme d'abonnements annuels. Ainsi, à Lyon l'abonnement pour les copropriétés s'élève à 17,40 euros TTC par mètre linéaire de façade pour les immeubles de moins de 2 ans et à 15,95 euros TTC pour ceux de plus de deux ans, pour des interventions illimitées.

Enfin, il existe d'autres avantages réels, bien que difficilement quantifiables en termes de bénéfices économiques, à végétaliser les bâtiments. Pour le maître d'ouvrage, cela permet d'afficher un engagement en faveur de l'environnement et d'obtenir des certifications comme HQE (Haute Qualité Environnementale) ou BREEAM (Ecovegetal, s.d.). Il existe même un label permettant aux acteurs de l'immobilier d'afficher la prise en compte de la biodiversité dans leurs projets : le label BiodiverCity®, porté par le Conseil International Biodiversité et Immobilier (cf. INITIATIVES p.32). Elle peut aussi donner plus de valeur à leur bien immobilier.

Limite de la dimension écologique des procédés développés

La végétalisation étant annoncée comme un moyen de lutter contre la dégradation de l'environnement et l'érosion de la biodiversité en milieu urbain, il semble logique que le cycle de vie des dispositifs utilisés soit acceptable d'un point de vue

COMPRENDRE DÉVELOPPER LA VÉGÉTALISATION DES VILLES EN FAVORISANT LA BIODIVERSITÉ : ENJEUX, SOLUTIONS ET DÉFIS OPÉRATIONNELS

→ environnemental. Or, la comparaison des analyses de cycle de vie des principales formes de végétalisation verticale a montré que seule la façade végétalisée directe n'a pas un cycle de vie significativement plus impactant que celui d'un mur seul. Les façades indirectes et les murs vivants, en particulier les murs continus, ont un impact bien plus important sur des indicateurs comme le réchauffement climatique (ou effet de serre additionnel⁽³⁾), le potentiel de toxicité humaine⁽⁴⁾ et l'écotoxicité aquatique⁽⁵⁾. Cela s'explique par la courte durée de vie des matériaux et l'impossibilité de les recycler (Ottelé et al., 2011).

(3) Effet de serre additionnel (Global warming) : L'indicateur choisi pour quantifier l'impact environnemental exprime le potentiel d'effet de serre additionnel qu'engendre un produit sur l'ensemble de son cycle de vie. Ce n'est pas tant l'effet de serre qui peut être dangereux, mais son augmentation. L'effet de serre additionnel est impliqué dans les problématiques de changement climatique d'origine anthropique qui commence à affecter la planète. Parmi les conséquences du changement climatique, on peut citer l'élévation du niveau moyen des océans, la hausse des températures moyennes, les événements climatiques intenses ... (UVED, 2012)

(4) Potentiel de toxicité humaine (Human toxicity potential) : L'indicateur utilisé pour quantifier la toxicité humaine exprime le potentiel de toxicité que génère un produit considéré sur l'ensemble de son cycle de vie. C'est la capacité inhérente à une substance chimique de produire des effets nocifs chez un organisme vivant qui en fait une substance toxique. L'effet toxique peut toucher de nombreux organes (yeux, système digestif, reins, poumons, cerveau...) et se traduire par de multiples affections plus ou moins graves (irritation, dépression, essoufflement, œdèmes, maux de tête ...) (UVED, 2012).

(5) Ecotoxicité aquatique (Freshwater aquatic ecotoxicity potential) : L'indicateur utilisé pour quantifier l'impact sur les écosystèmes aquatiques exprime le potentiel d'écotoxicité dans l'eau douce que génère un produit considéré sur l'ensemble de son cycle de vie. Il concerne les molécules et métaux lourds toxiques pour les organismes vivants présents dans les écosystèmes aquatiques. Cette pollution conduit à plus ou moins long terme à la disparition d'espèces et à la dégradation de l'écosystème (UVED, 2012).

D'une manière générale, les systèmes de végétalisation de murs et de toitures utilisent des matériaux à haut impact environnemental, dont les plus courants sont décrits dans le tableau suivant (cf. Tableau 5, ci-dessous).

De plus, leur consommation en eau pose question. Par exemple, l'irrigation des murs vivants, entre 120 et 1 600 L/m²/an, est très largement réalisée à partir du réseau d'eau potable (Plante & Cité et Arrdhor Critt Horticole, 2013). Par ailleurs, le recyclage des eaux drainées est rare, ce qui signifie que les eaux de sortie qui rejoignent le réseau d'eaux pluviales sont potentiellement chargées en carbone, en azote et en métaux lourds issus des matériaux constitutifs (substrats, couche d'étanchéité anti-racines) (Schwager-Guilloux, 2014) ou bien des fertilisants appliqués. Ces éléments rappellent que, pour que la végétalisation soit véritablement favorable à l'environnement, elle doit s'inscrire dans une réflexion à plus grande échelle qui intègre les impacts potentiels des aménagements tout au long de leur cycle de vie.

Par ailleurs, les infrastructures végétalisées ont la capacité d'être à la fois des investissements intéressants pour les maîtres d'ouvrage, des sources de services écosystémiques et des vecteurs de

biodiversité en ville. Pourtant, le lien entre infrastructure végétalisée et biodiversité n'est pas automatique. En effet, les murs et toitures végétalisées sont des réalisations techniques souvent hors-sols, très contrôlées et qui répondent à des contraintes particulières (orientation, température, sécheresse, vent) laissant peu de place à la végétation locale et spontanée. Ensuite, la végétalisation mise en place dans le but de fournir des services écosystémiques, comme l'isolation thermique, est parfois conçue et entretenue comme un système monospécifique intensif afin d'optimiser ses performances, alors qu'elle pourrait aussi intégrer de la biodiversité. Enfin, l'environnement urbain dans lequel les murs et toitures végétalisés sont implantés incite à accorder une importance particulière à leur aspect esthétique (choix d'espèces horticoles, irrigation et utilisation de fertilisants) et à leur intégration auprès des riverains, qui sont demandeurs d'infrastructures vertes mais dont la proximité peut être une contrainte (réticence vis-à-vis de certaines espèces animales ou végétales, exclusion des espèces allergènes). Ainsi, pour que la végétalisation ne se résume pas à de simples tapis verts déployés sur des

Tableau 5 : Caractéristiques écologiques des matériaux utilisés pour la végétalisation

MATÉRIAU	UTILISÉ DANS	CARACTÉRISTIQUES
Laine de roche	▶ Fraction minérale du substrat	▶ Production très énergivore (fourmaise à 1600°C)
Fibre de coco	▶ Fraction organique du substrat	▶ Coproduit de l'extraction des longues fibres de coco. ▶ Ressource durable mais non locale.
Tourbe	▶ Fraction organique du substrat	▶ Ecosystème important et ressource non durable (renouvellement de 5 cm par siècle)
Terreau	▶ Fraction organique du substrat	▶ Produit principalement à base de tourbe et de sable. ▶ Ressource non durable.
Polymères	▶ Étanchéité, filtre, modules plastiques, ...	▶ Légers, recyclables et de longue durée de vie.
Acier inoxydable	▶ Support pour façades indirectes, cages pour murs modulaires, fixations, ...	▶ Durée de vie très longue mais 10 fois plus impactant pour l'environnement que le bois, le plastique recyclé ou l'acier galvanisé (ACV en tant que support de façade indirecte).
Pouzzolane et autres roches volcaniques	▶ Fraction minérale du substrat	▶ Ressources non renouvelables et difficilement recyclables.
Argile expansée	▶ Fraction minérale du substrat	▶ Capacité de sorption élevée, rétention de polluants. ▶ Produit coûteux en énergie grise, non renouvelable et difficilement recyclable.

Références : (Weinmaster, 2009), (Ottelé, Perini, Fraaij, Haas, & Raiteri, 2011), (Direction de la nature, des paysages et de la biodiversité CG93, 2014), (Schwager-Guilloux, 2014)

bâtiments, les écologues définissent peu à peu les critères d'aménagements plus favorables à la biodiversité.

La prise en compte de la biodiversité dans la végétalisation : conditions et enjeux d'une végétalisation favorable à la biodiversité

Les préconisations des scientifiques pour une végétalisation favorable à la biodiversité

Sur les toitures, l'accueil d'une biodiversité riche passe avant tout par une hauteur suffisante de substrat. En effet, s'il est possible de voir des mousses coloniser des toitures nues, le substrat est indispensable pour obtenir une végétation plus complexe : espèces herbacées, arbustives, voire arborées sur les structures les plus solides. La moindre variation de son épaisseur se traduit par une modification de la flore qu'elle accueille et donc du cortège d'espèces animales qui va l'accompagner (Clergeau, 2015). L'épaisseur optimale de substrat pour obtenir une biodiversité riche en conservant un entretien modéré serait ainsi comprise entre 10 et 20 cm⁽⁶⁾. Sa composition est également un moyen de jouer sur l'attractivité d'une toiture pour la biodiversité. Il est possible de s'inspirer de compositions de milieux naturels : gravières ou prairies sèches pour les toitures et falaises pour les murs (Obriet et al., 2012). Enfin, l'attrait des toitures vertes pour la biodiversité dépend surtout de la variété de milieux qu'elles présentent. Il est particulièrement intéressant de combiner les différences de conditions (ombre, ensoleillement, réverbération, exposition au vent) (Apar, 2013) et les variations de composition, d'épaisseur, de granulométrie et de taux de matière organique du substrat pour obtenir plusieurs micro-habitats qui seront colonisés par des espèces différentes. Compte-tenu des contraintes de portance des toitures et de la nécessité d'y intégrer un complexe drainage-filtre-

étanchéité, les toitures semi-intensives ou intensives sont celles qui permettent le plus de liberté avec le substrat.

En ce qui concerne le choix de la palette végétale, l'idéal pour la biodiversité est d'introduire au maximum des espèces locales, car celles-ci sont, *a priori*, les mieux adaptées au climat régional, les plus attractives pour la faune locale et les plus propices à créer une continuité dans la trame verte (LPO et CAUE Isère, 2012). Toutefois, il est plus simple d'introduire ces espèces sur les toitures que sur les murs car, pour l'instant, seules des plantes horticoles sont pré-cultivées pour s'adapter à la végétalisation verticale des murs vivants et le nombre d'espèces de grimpances adaptées aux façades végétalisées est limité. Là encore, si la valorisation des plantes locales est difficile, il est alors pertinent de s'inspirer d'associations de plantes que l'on trouve dans d'autres milieux naturels, sous des climats similaires aux microclimats qui existent sur les murs et toitures végétalisés. Par exemple, des gammes d'espèces alpines ou méditerranéennes sont adaptées aux conditions climatiques du bâti (Renard, 2015) et elles seront potentiellement adaptées aux changements climatiques sur le long-terme (Mayrand, 2015). Mais selon la littérature scientifique, le critère le plus important pour l'accueil d'une faune riche est la diversité structurale des végétaux : taille, forme, développement saisonnier et variété des parties aériennes (Lawton, 1983). Notamment, le lien entre l'abondance d'arthropodes et la diversité structurale a été constatée sur toits verts comme sur murs et façades végétalisés (Madre et al., 2015). Pour les murs vivants, la recherche d'esthétique induit à concevoir des compositions variées qui présentent, en général, une grande variété d'espèces et de structures végétales. Quant aux façades, elles sont souvent mono-spécifiques mais il est possible d'y introduire une certaine diversité en combinant par exemple espèces annuelles et espèces pluriannuelles.

Enfin, quelques adaptations simples des pratiques de gestion peuvent rendre les interventions d'entretien plus compatibles avec la conservation de la biodiversité établie sur place. L'usage de produits phytosanitaires est proscrit, une seule

fauche tardive annuelle permet aux invertébrés et aux végétaux de réaliser l'ensemble de leur cycle de développement et la tonte ou la fauche partant du milieu d'une toiture végétalisée et non des bords permet à la faune de se déplacer pour ne pas être broyée (Gecina, 2015). Les préconisations des experts sont autant de pistes que les maîtres d'ouvrage peuvent exploiter pour rendre leur aménagement plus accueillant pour la biodiversité. Ensuite, il n'est pas forcément évident pour eux d'évaluer l'impact positif de leur réalisation, mais il existe des pistes d'indicateurs, comme par exemple la présence des oiseaux nicheurs, qui sont les plus faciles à observer. En effet, l'augmentation du nombre d'espèces nicheuses suppose la présence de nouvelles proies (Gecina, 2015).

La biodiversité pour renforcer les services écosystémiques sur toitures : le cas des toitures végétalisées écosystémisées

Les conditions écologiques préconisées pour accueillir au mieux la biodiversité et les retombées économiques positives associées aux services écosystémiques fournis par les infrastructures vertes sont de mieux en mieux connues. Cependant, peu d'études ont pour l'instant analysé le rôle de la biodiversité comme facteur influençant la qualité des services écosystémiques urbains fournis. En étudiant plusieurs services écosystémiques à la fois, la thèse de Yann Dusza (2017)⁽⁷⁾ offre des perspectives nouvelles pour optimiser les services écosystémiques des toitures végétalisées en valorisant la diversité des associations plantes-substrat (cf. INVENTER, p.24).

L'objectif de cette thèse était de comprendre comment les interactions entre les composantes des toitures végétalisées influencent des fonctions majeures liées aux cycles biogéochimiques du carbone, de l'azote et de l'eau, ainsi que la pollinisation. Deux expérimentations ont été menées : la première dans des pots en milieu contrôlé et la seconde en conditions réelles sur une toiture parisienne. Les paramètres testés

(7) Cette thèse a été réalisée entre 2013 et 2016 par Yann DUSZA sous la direction de Luc ABBADIE, au sein de l'Institut d'Ecologie et des Sciences de l'Environnement de Paris et a été financée par CDC Biodiversité via la Mission Economie de la Biodiversité (MEB), la ville de Paris et ICADE.

(6) Damas O., Plante et Cité, Com. pers., juin 2015.

→ étaient la composition du substrat : artificiel (mélange de pouzzolane et de tourbe d'origine industrielle) ou naturel (sol sablo-limoneux prélevé dans une prairie locale), son épaisseur : 10 cm ou 30 cm, ainsi que 20 espèces de plantes, appartenant à 5 familles distinctes (Asteracées, Caryophyllacées, Crassulacées, Fabacées et Poacées). Les mesures ont été focalisées sur des paramètres peu présents dans la littérature scientifique : la production de biomasse aérienne et souterraine, la transpiration foliaire (qui entre dans le phénomène d'évapotranspiration), le carbone et l'azote foliaires (qui traduisent le stockage d'éléments chimiques), la rétention d'eau, le lessivage de carbone organique dissout et de nitrates (qui traduisent la fuite d'éléments chimiques) et les interactions plantes-pollinisateurs (qui traduisent la qualité du service de pollinisation).

Les résultats obtenus lors de l'expérimentation en milieu contrôlé indiquent que les services écosystémiques rendus par les toitures ne peuvent pas tous être maximisés avec une même association substrat-plantes. Certaines fonctions se contredisent et il faut donc faire des choix en fonction des services écosystémiques recherchés (cf. Tableau 6, ci-contre).

Parmi les familles de plantes testées, les Fabacées ont montré des propriétés intéressantes. Associées au substrat naturel elles ont une rétention d'eau 2 à 3 fois plus élevée que les autres familles de plantes. Toutefois, elles sont aussi responsables de plus grandes fuites de nitrates et de carbone. L'expérimentation a aussi montré que la Crassulacée *Sedum acre*, souvent utilisée sur les toitures végétalisées extensives, possède des capacités de transpiration foliaires plus limitées que la plupart des autres plantes testées, du fait de sa faible croissance. Les autres paramètres mesurés n'ont pas fait apparaître de différences significatives liées aux espèces.

Dans un second temps, les interactions substrat-plantes dans la production des services écosystémiques ont été étudiées en conditions réelles sur toiture. Cette fois, seulement 5 des plantes déjà testées dans l'expérimentation précédente ont été sélectionnées : *Centaurea jacea* (Asteracée), *Dianthus carthusianorum* (Caryophyllacée), *Hylotelephium maximum* (Crassulacée), *Lotus corniculatus* (Fabacée) et *Koeleria pyramidata* (Poacée), tandis que les deux substrats et les deux épaisseurs sont restés les mêmes. L'influence des espèces de plantes a été testée sous forme de monocultures et d'un mélange des 5 espèces. La mesure d'une série de caractéristiques des plantes (couverture, hauteur, surface foliaire, transpiration foliaire) et des communautés végétales (densité de la canopée, rétention d'eau, lessivage de DOC⁽⁸⁾ et de nitrate) a permis de déterminer les composantes les plus propices à fournir des services écosystémiques optimisés (cf. Tableau 7, ci-contre).

Enfin, les interactions des associations substrat-plantes avec les invertébrés ont également été mesurées sur toiture pour évaluer le service de pollinisation. Celui-ci est doublement important, d'une part, il améliore le fonctionnement naturel d'une toiture végétalisée et donc sa durabilité et, d'autre part, il permet de maintenir des communautés de plantes variées et d'attirer des communautés de pollinisateurs diversifiées, favorisant ainsi la biodiversité à l'échelle de la ville. Sur les 6 groupes fonctionnels d'insectes pollinisateurs recherchés, l'expérimentation a montré que 4 groupes avaient visité la toiture : les abeilles domestiques, les bourdons, les abeilles solitaires et les syrphes, avec des résultats différents selon les associations substrat – espèces. Les lépidoptères et les coléoptères n'ont par contre pas été observés (cf. Tableau 8, ci-contre).

Si le substrat naturel profond et le mélange d'espèces ont montré de meilleurs niveaux de services écosystémiques,

pour la pollinisation, les résultats sont moins tranchés. En effet, lorsque certaines associations favorisent le nombre d'unités florales, d'autres entraînent un plus grand nombre de visites de pollinisateurs ou une plus grande diversité de ces derniers.

Des choix à faire en fonction des objectifs poursuivis

Les travaux de recherche ont montré l'influence de combinaisons de différentes familles de plantes et de substrats pour favoriser un service écosystémique plutôt qu'un autre. Selon les zones géographiques et le climat régional, il sera peut-être plus intéressant pour un maître d'ouvrage de se focaliser sur un seul service écosystémique (cf. Tableau 9, ci-contre). Au contraire, d'autres pourront faire le choix d'optimiser l'ensemble des services écosystémiques en contrebalançant les desservices ou dys-services⁽⁹⁾ (fuite de nutriments).

En raison de leurs limites de portance, toutes les toitures ne peuvent pas accueillir les composantes les plus adaptées à la fourniture des plus hauts niveaux de services écosystémiques. En particulier, le sol naturel de 30 cm, qui est associé avec la plus grande efficacité pour plusieurs services écosystémiques, est aussi le substrat le plus lourd. Les substrats minces peuvent, quant à eux, offrir des fonctions efficaces mais à condition d'être irrigués car ils sont sensibles à la sécheresse, en particulier le substrat artificiel. Lorsque les caractéristiques techniques du bâti ne permettent pas l'installation d'un substrat épais, notamment sur les toitures existantes où la portance est limitée, ou lorsque l'irrigation de l'infrastructure n'est pas prévue, il est plus difficile d'atteindre de hauts niveaux de services écosystémiques. Dans ce cas, miser sur la biodiversité pour obtenir une toiture extensive fonctionnelle, plus autonome et durable, est un moyen de réduire les coûts d'aménagement et

(9) Les termes « desservices » ou « dys-services » désignent les impacts des infrastructures végétalisées considérés comme négatifs car ils correspondent à une dégradation d'une fonction écosystémique. Par exemple : la fuite des nutriments au lieu de leur stockage, l'émission de polluants au lieu de leur élimination, etc.

(8) DOC : Carbone organique dissout

Tableau 6 : Choix des composantes du système de végétalisation selon les fonctions recherchées

FONCTION À MAXIMISER	COMPOSANTES À PRIVILÉGIER
Lutte contre les îlots de chaleur urbains*	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Substrat naturel (transpiration foliaire des pentes plus élevée que sur substrat artificiel**). ▶ Espèces à transpiration foliaire élevée comme <i>Koeleria pyramidata</i> (Poacée)+ substrat épais.
Rétention d'eau	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Espèces au système racinaire dense comme les Fabacées + substrats naturels profonds. ▶ Substrats épais et secs, même si les substrats minces s'asséchant rapidement ont une plus grande rétention d'eau par unité de substrat.
Limitation de la pollution par les nitrates ***	▶ Espèces autres que Fabacées + substrat naturel profond.
Limitation des fuites de carbone organique dissout ****	▶ Substrat naturel, peu épais.
Production de biomasse	▶ Substrat artificiel, épais.

Tableau 7 : Effets des différentes composantes du système de végétalisation sur les services écosystémiques

COMPOSANTES DE LA TOITURE	EFFETS SUR LES SERVICES ÉCOSYSTÉMIQUES
Comparaison des différentes familles de plantes	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Peu de différences entre les différentes monocultures. ▶ Pour les Fabacées, confirmation de la bonne rétention d'eau, des faibles rejets de carbone organique dissout et des hauts rejets de nitrates. ▶ Pour les Crassulacées, faibles rejets de nitrates mais faible rétention d'eau et rejets importants de carbone organique dissout.
Comparaison Monocultures / Mélange d'espèces	▶ Fort potentiel du mélange d'espèces pour les toitures multifonctionnelles (niveaux similaires aux meilleures monocultures pour la plupart des fonctions évaluées).
Comparaison 10 cm de substrat / 30 cm de substrat	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Meilleurs services écosystémiques mais plus grandes fuites de carbone organique dissout avec le substrat de 30 cm. ▶ Capacité des substrats minces à offrir de hauts niveaux de services écosystémiques mais seulement s'ils sont irrigués.

Tableau 8 : Effets des différentes composantes du système de végétalisation sur le service de pollinisation

COMPOSANTES DE LA TOITURE	EFFETS SUR LE SERVICE DE POLLINISATION
Comparaison Monocultures / Mélange d'espèces	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Plus d'unités florales et plus de visites de pollinisateurs pour les monocultures. ▶ Plus de diversité de pollinisateurs pour le mélange d'espèces car prépondérance de certains groupes fonctionnels en fonction de la monoculture : <i>H. maximum</i> attire les abeilles domestiques, <i>C. jacea</i> les abeilles solitaires et <i>L. corniculatus</i> les bourdons.
Comparaison 10 cm de substrat / 30 cm de substrat	▶ Plus d'unités florales et plus de visites de pollinisateurs avec 30 cm de substrat.
Comparaison Mélange d'espèces + substrat naturel / Mélange d'espèces + substrat artificiel	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Moins d'unités florales mais plus de visites de pollinisateurs sur substrat naturel. ▶ Plus d'unités florales et plus grande diversité de pollinisateurs sur substrat artificiel.

Tableau 9 : Choix d'aménagement et d'entretien de végétalisation en fonction des services écosystémiques recherchés

SERVICE ÉCOSYSTÉMIQUE RECHERCHÉ	A PRÉFÉRER	A ÉVITER
Lutte contre les îlots de chaleur urbains	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Toiture à substrat épais, naturel + plantes à forte transpiration foliaire comme <i>Koeleria pyramidata</i> (Poacée). ▶ Murs et façades végétalisés. ▶ Irrigation en été. 	▶ Toiture à substrat mince, artificiel + plantes à faible croissance et faible transpiration foliaire comme <i>Sedum acre</i> (Crassulacée), sauf irrigation, de préférence par les eaux pluviales récupérées.
Isolation thermique du bâti	▶ Tout type de végétalisation	▶ -
Rétention d'eaux pluviales	▶ Toiture à substrat épais + monoculture de Fabacées.	▶ Murs et façades végétalisés.
Pollinisation	▶ Tout type de toiture à substrat épais.	▶ -
Optimisation de l'ensemble services écosystémiques	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Toiture à substrat épais, naturel + mélange de plantes de familles différentes. ▶ Toiture à substrat mince, irrigué + mélange de plantes de familles différentes. 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Toitures à monocultures d'espèces végétales. ▶ Murs et façades végétalisés.

Références : D'après Dusza Y. (2017). «Toitures végétalisées et services écosystémiques : favoriser la multifonctionnalité via les interactions sols-plantes et la diversité végétale», Ecologie, Environnement. Université Pierre et Marie Curie - Paris VI.

* La végétation réfléchit une partie du rayonnement et en absorbe une autre, activant ainsi le phénomène d'évapotranspiration par lequel l'eau contenue dans les plantes est transpirée et celle retenue dans le substrat est évaporée.

** Cela peut s'expliquer par la biomasse moins importante dans le premier, impliquant des besoins en eau plus faibles et donc une meilleure disponibilité de l'eau pour la transpiration, tandis que le caractère plus drainant du second peut induire des stratégies d'adaptation des plantes à la sécheresse se traduisant par une diminution de la transpiration foliaire.

*** La quantité d'azote initialement présente dans le substrat influence la quantité de nitrates lessivée, et ce indépendamment de la profondeur du substrat.

Les fuites de nitrates sont donc plus importantes à l'installation mais diminuent lorsque le substrat s'appauvrit avec le temps.

**** Les fuites de carbone organique dissout se réduisent également dans le temps avec l'appauvrissement du substrat.

→ d'entretien de l'infrastructure, permettant ainsi aux propriétaires de bénéficier d'économies de fonctionnement du bâtiment malgré des niveaux de services écosystémiques moins élevés.

Sur du bâti ancien, si la qualité de l'isolation est faible, même une couche de quelques centimètres de substrat participera à son amélioration. Au lieu d'être artificiel et peu écologique, celui-ci peut être remplacé, à moindre coût, par un mélange de ressources locales : sol naturel, co-produits comme les briques concassées (utilisé par exemple par l'Observatoire Départemental de la Biodiversité Urbaine de Seine-Saint-Denis) ou encore marc de café, à condition d'être suffisamment drainant et pas trop riche en matière organique. La palette végétale peut, elle aussi, être économique : prélever quelques poignées de sol naturel dans un milieu herbacé relativement pauvre et sec permet d'ensemencer la toiture grâce à la réserve de graines qu'il contient. Il est également possible de planter à faible densité certaines espèces, locales de préférence, afin d'occuper le substrat dès son installation, limitant ainsi les fuites de nutriments, et de laisser ensuite la flore spontanée coloniser l'espace disponible (Norpac et IDDR, 2011). Ces plantes locales et spontanées auront l'avantage d'être plus résistantes et de demander un entretien limité. Il n'existe pas encore de filières d'approvisionnement pour ces végétaux, malgré la création en 2015 par Plante et Cité et la Fédération des Conservatoires botaniques nationaux d'un label Végétal local. Cependant, en Ile-de-France par exemple, le Conservatoire Botanique National du Bassin Parisien ou le Centre Horticole de la Direction des espaces verts et de l'environnement (DEVE) de la Ville de Paris en produisent. L'intérêt de ces toitures sur mesure par rapport aux systèmes préconçus est que l'on peut facilement y créer des discontinuités de substrat et de végétation (alternance de zones de monoculture et de mélange d'espèces), permettant d'attirer différents types de pollinisateurs et de favoriser

différentes fonctions pour une végétalisation plus durable. En outre, il est intéressant d'agrémenter les toitures, voire les murs et façades végétalisés d'éléments ponctuels (nichoirs, perchoirs, bois mort, pierres) qui attireront certaines espèces (LPO et CAUE Isère, 2012), notamment des oiseaux dont les fientes apporteront une fertilisation naturelle à l'infrastructure.

Les enjeux économiques de la végétalisation à l'échelle de la ville : favoriser la multifonctionnalité et concilier rationalité économique et écologique

Les murs et toitures végétalisés sont sources d'économies pour les propriétaires du bâti, de confort pour ses usagers et de support pour la biodiversité. Mais les bienfaits de la végétalisation s'étendent au-delà de cette échelle et peuvent être particulièrement pertinents à l'échelle d'un quartier ou d'une ville. Tout d'abord, son rôle dans le rafraîchissement de l'air extérieur est indéniable. **Une toiture végétalisée entraîne une diminution de la température de l'air** de quelques dixièmes de degrés à quelques degrés sur plusieurs mètres de hauteur (Liang & Huang, 2011), une performance comparable à celle des parcs urbains, dans lesquels la diminution de température peut atteindre 1°C grâce à l'ombrage des arbres et à l'évapotranspiration. (De Munck, 2013). Au-delà de la différence de température, la végétalisation contribue fortement au confort thermique des citadins en augmentant l'humidité ambiante (Shashua-Bar, Pearlmutter, & Erell, 2009). De par leur situation en pied de bâtiment, ce sont les systèmes de végétalisation verticale qui sont les plus à même de participer à ce confort. Une étude en Allemagne a, par exemple, montré qu'une jardinière d'1 m² et 40 cm de profondeur contenant deux plants de grimpantes (Wistéria) pouvait évacuer 2 000 L d'eau par an par évapotranspiration (Norpac et IDDR, 2011). De même, des modélisations

de température dans des rues encaissées de Londres et de Montréal ont montré des diminutions allant de 1,7 à 2,1 °C sur les toits des bâtiments si les murs sont végétalisés (lierre) et de 3 à 3,8 °C si les murs et les toitures sont végétalisés (herbacées et lierre) (Cuny et al., 2016). La réduction des effets d'îlots de chaleur urbains est aujourd'hui un véritable enjeu de santé publique : pour rappel, les coups de chaleur, l'hyperthermie et la déshydratation ont causé une surmortalité de 15 000 personnes en France lors de la canicule de l'été 2003 (Institut national d'études démographiques, 2004).

Ensuite, **la ville est un lieu d'accumulation de polluants atmosphériques** : oxydes d'azote, monoxyde et dioxyde de carbone, composés organiques volatils (COV), particules, précurseurs de l'ozone (O₃). Les pics de pollution sont responsables d'un nombre d'hospitalisations et d'une mortalité accrues des populations sensibles en ce qui concerne les affections cardio-respiratoires (insuffisance cardiaque, asthme, accidents cardio-vasculaires, infarctus du myocarde). Mais la présence constante des polluants dans l'air impacte également à long terme l'ensemble de la population (hausse de l'incidence des maladies cardio-vasculaires et du cancer du poumon, développement de l'asthme chez l'adulte). Ainsi, près de 42 000 décès prématurés sont dus chaque année en France aux particules fines selon l'OMS. Ces impacts sur la santé ne sont pas sans conséquences économiques puisque le coût sanitaire de la pollution de l'air a été évalué entre 71 et 100 milliards d'euros par an pour la France (Commission d'enquête sur le coût économique et financier de la pollution de l'air, 2015). Contrairement aux infrastructures grises, les infrastructures végétalisées permettent de réduire cette pollution et les dépenses de santé qu'elle engendre. L'effet de la végétalisation est, ici, à la fois indirect et direct. L'isolation thermique des bâtiments permet une réduction des oxydes d'azote (précurseurs d'ozone) (Banting et al., 2005) et du CO₂ (Sailor, 2008) émis par

la climatisation, tandis que le substrat et la végétation piègent des polluants. Ainsi, 19,8 ha de toitures végétalisées extensives à Chicago pourraient diminuer la pollution de 1 675 kg par an, dont 52 % d'ozone et 14 % de particules fines (Yang, Yu, & Gong, 2008), et 109 ha de toitures végétalisées à Toronto pourraient capter 7 870 kg d'éléments polluants par an (Currie & Bass, 2008). Les toitures végétalisées stockent aussi du carbone, à hauteur par exemple de 137 g/m² pour une toiture extensive de *Sedum acre* ou à 339 g/m² pour une toiture de *Sedum album* au bout de deux ans (Getter & Rowe, 2008). La végétalisation verticale a, elle aussi, un potentiel non négligeable pour améliorer la qualité de l'air : 4 % du dépôt annuel de particules pourraient être piégés par les feuilles si un quartier de centre-ville était végétalisé sur toutes les façades possibles (Köhler, 1996 cité par Köhler, 2008).

De plus, **la végétalisation a un impact positif en termes de gestion de l'eau**, le taux d'imperméabilisation des sols en ville rendant les quantités d'eau ruisselées particulièrement importantes. Les murs et façades végétalisés influent peu sur le ruissellement, mais les toitures végétalisées peuvent réduire le débit maximum observé lors d'un épisode de pluie (Fassman-Beck, 2013) ou encore retarder le débit de pointe d'un orage (CSTC, 2006). Le substrat se chargeant progressivement en eau, sa rétention d'eau sera d'autant plus efficace que celui-ci est sec et épais (Oberndorfer, Lundholm, & Bass, 2007). La capacité des infrastructures végétalisées à retenir de l'eau est un enjeu important pour les collectivités locales puisque la gestion des eaux pluviales représente 20 % de leur budget assainissement (Garrigues, 2012). Les toitures et éventuellement les murs et façades végétalisés ont aussi un impact positif sur d'autres paramètres physico-chimiques de l'eau de pluie : ils participent à augmenter son pH, réduisant ainsi l'effet de pluies acides, et à réduire l'augmentation de sa température au contact des surfaces imperméables, ce qui nuit moins aux écosystèmes des cours d'eau dans lesquels elle est rejetée (Bass & Baskaran, 2003).

Comme l'a montré le chapitre précédent, les fonctions écologiques des toitures végétalisées peuvent être renforcées

lorsqu'elles s'appuient sur une plus grande biodiversité que les systèmes habituels. La végétalisation favorable à la biodiversité offre ainsi aux collectivités la perspective de services écosystémiques plus performants et d'une plus grande réduction des dépenses publiques. Les bienfaits de la végétalisation en ville ont été largement démontrés. Toutefois, leur ampleur reste dépendante de deux principaux enjeux : la multiplication du nombre d'infrastructures végétalisées, car les modélisations réalisées par les scientifiques sont basées sur des hypothèses où de grandes surfaces de bâti sont végétalisées, et leur pérennité, car les expérimentations souvent menées au moment de l'installation des murs, toitures ou façades végétalisés ne garantissent pas le maintien des mêmes niveaux de services écosystémiques tout au long de la vie des aménagements. Afin d'orienter les maîtres d'ouvrages vers des infrastructures vertes performantes, durables et favorables à la biodiversité, plusieurs outils politiques, réglementaires et financiers peuvent être mobilisés.

Quels sont les leviers d'action pour un déploiement et une mise en œuvre opérationnelle des infrastructures végétalisées favorables à la biodiversité ?

Les défis urbains sont aujourd'hui de plusieurs ordres : densification et vieillissement démographique, réduction de l'impact environnemental, contraintes budgétaires, développement de la qualité de vie et amélioration de l'attractivité économique notamment. En tant qu'acteur historique de la ville, le groupe Caisse des Dépôts est aujourd'hui porteur d'une vision de la Smart City (ville intelligente) et joue un rôle dans l'émergence d'un modèle français de ville intelligente d'intérêt général. Parmi les éléments clés de la ville intelligente demain : la mobilité, la conception de bâtiments durables, la gestion durable des déchets, la production d'énergies renouvelables dans les villes ou encore la prévention des risques naturels (CDC, 2017). La ville intelligente cherche à concilier

des piliers à la fois économiques, sociaux, culturels et environnementaux à travers une approche systémique. Dans ce contexte, la végétalisation devient un élément clé de la ville de demain. Les métropoles les plus denses et peuplées la voient aujourd'hui comme une mesure indispensable pour rendre les villes plus vivables et les adapter aux changements climatiques, ces derniers risquant d'amplifier les phénomènes d'îlots de chaleur urbains, de pollution, ou encore les événements climatiques extrêmes. Ainsi, par exemple, la province chinoise de Guangxi devrait voir apparaître en 2020 la première ville-forêt au monde. Peuplée de 30 000 habitants, la Liyzhou Forest City, imaginée par le studio italien Stefano Boeri Architetti, absorberait 10 000 tonnes de CO₂ et 57 tonnes de polluants par an, tout en créant des habitats pour les espèces locales (cf. INTERNATIONAL, p.29). Afin de pouvoir développer à plus large échelle les procédés de végétalisation du bâti en faveur de la biodiversité il convient de s'interroger sur les leviers favorables à leur déploiement.

Les incitations réglementaires

En France, le levier réglementaire est un moyen efficace pour appuyer l'essor de la végétalisation. Ainsi, la loi ALUR de 2014 a introduit la notion de Coefficient de Biotope par Surface ou CBS. Celui-ci décrit la proportion de surfaces éco aménageables⁽¹⁰⁾ de la parcelle sur la surface totale de la parcelle. Sa valeur cible est fixée selon les différents types de constructions (neuves ou rénovation, appartements, écoles, etc.). La surface totale éco aménageable est obtenue en calculant le total de m² de plusieurs types de surfaces (surfaces imperméables, surfaces semi-perméables, espaces verts sur dalle, etc.) multipliés respectivement par leur coefficient valeur écologique par m² (0,0 ; 0,3 ; 0,7 ; etc.). Si le CBS de la parcelle est inférieur au CBS fixé par le règlement, la surface de zones éco aménageables doit être augmentée, et ce, par exemple, en végétalisant les murs et les toits. Le recours des

(10) Les surfaces éco aménageables correspondent aux surfaces non imperméabilisées. Dans le calcul du CBS, elles sont associées à un coefficient compris entre 0 et 1 : un sol de pleine terre a un coefficient de 1 tandis que les murs végétalisés ont un coefficient de 0,5 et les toitures végétalisées un coefficient de 0,7.

→ collectivités territoriales à cet outil n'est pas obligatoire mais il apparaît peu à peu dans les documents d'urbanisme, assorti d'obligations variables selon les contextes locaux. Parmi les premières villes à avoir mis en place le CBS, on compte par exemple : Bourg-en-Bresse (Ain), Pont-Saint-Esprit (Gard), Meudon (Hauts-de-Seine), Dijon (Côte-d'Or), Beauvais (Oise), Guyancourt (Yvelines), La Teste de Buch (Gironde) ou encore Vire (Calvados) (MB, 2015).

La loi biodiversité renforce ce levier réglementaire en ce qui concerne les constructions neuves de bâtiments commerciaux de plus de 1 000 m². En effet, leurs toitures doivent désormais être dédiées, sur toute ou partie de la surface et de manière non exclusive, à l'accueil de la biodiversité et/ou à la production d'énergies renouvelables. Il a été montré précédemment que la végétalisation d'une toiture à l'échelle d'un bâtiment neuf n'entraîne qu'un faible surcoût. Et, la solidité des toitures concernées permet facilement de concevoir un aménagement à la fois performant du point de vue des services écosystémiques et accueillant pour la biodiversité. En outre, dans le cas où un maître d'ouvrage souhaiterait s'orienter uniquement vers la production d'énergie renouvelable, la végétalisation peut encore être un atout. En particulier, elle est compatible avec la pose de panneaux solaires thermiques et photovoltaïques. En effet, la présence des panneaux solaires inclinés sur des toitures plates crée des zones plus ombragées et humides favorables au développement de certaines espèces, tandis que la végétation limite la réverbération du soleil sur le toit et y réduit la température, augmentant ainsi le rendement des panneaux solaires (Ernst & Young, 2009).

La mobilisation des acteurs, source de stratégies économiques, de modes de gouvernance et de subventions en faveur de la biodiversité en ville

En Europe, comme en Amérique du Nord, la mobilisation pour le développement des projets de végétalisation urbaine vient majoritairement du secteur public. Certaines orientations réglementaires telles que les Directives et Communications Européennes, Natura 2000 en Europe, Grenelle I et II en France soutiennent les projets de maintien ou de restauration de la biodiversité en ville. Plus précisément, les financements peuvent émaner de plusieurs sources. A l'échelle locale, ce sont les financements régionaux pour l'intégration dans les trames vertes et bleues ou la mobilisation des ressources fiscales des villes (impôts locaux) décidée dans le budget annuel (I4CE, 2016). Par exemple, le Conseil régional d'Ile-de-France peut accorder une aide de 45 €/m² pour l'installation de toitures végétalisées et le département des Hauts-de-Seine jusqu'à 48 €/m² (Adivet). L'Agence de l'eau Seine-Normandie peut également subventionner jusqu'à 80 % des projets de végétalisation de toitures. Cela rend l'option de la végétalisation particulièrement intéressante au moment où l'étanchéité d'une toiture doit être refaite. Par exemple, l'entreprise Eau de Paris a végétalisé 1 600 m² de la toiture d'un pont-aqueduc en faisant un travail de diagnostic écologique pour proposer un aménagement comprenant des espèces végétales locales et spontanées. Le coût de cette végétalisation était de 300 000 € HT. Elle a été financée grâce à une aide de l'Agence de l'eau Seine-Normandie à hauteur de 80 % sur la part du projet dédiée à la gestion durable des eaux pluviales et à une aide de 100 000 € du conseil régional d'Ile-de-France au titre de sa contribution à la trame verte (Pruvot, 2016). Cela souligne que les différentes aides et subventions existantes, qui réduisent les coûts restant à la charge

du maître d'ouvrage, rendent l'infrastructure végétalisée d'autant plus compétitive par rapport à une infrastructure grise. A l'échelle nationale, les Eco-Prêts à Taux Zéro soutiennent les projets de végétalisation de toits et façades depuis 2010. Ils entrent dans les aides allouées plus largement à l'amélioration de la performance globale du logement (Service-public.fr). D'autres financements plus ponctuels existent, comme les subventions de l'Anah (Agence nationale de l'habitat) et de l'Ademe (Agence de l'environnement et la maîtrise de l'énergie) pour la mise en place de toits végétalisés à Paris ou des réponses à des appels à projets thématiques et sectoriels (I4CE, 2016). Enfin, à l'échelle européenne, la Banque Européenne d'Investissement (BEI) peut investir dans certains projets d'infrastructures vertes. En effet, elle s'est associée à la Commission européenne pour mettre en place le Mécanisme de financement du capital naturel (*Natural Capital Financing Facility*, NCOFF), « un instrument financier qui soutient, au moyen de prêts et d'investissements sur mesure bénéficiant d'une garantie de l'UE, des projets qui œuvrent en faveur de la biodiversité et de l'adaptation aux changements climatiques » (European Investment Bank). Les toitures et les murs végétalisés font partie des infrastructures vertes qui peuvent être financées par le NCOFF. En outre, le fonds European Energy Efficiency, sous-ensemble de LIFE+, s'adresse aux collectivités territoriales mais également aux entités privées. A l'étranger, il existe également des programmes d'incitations financières orientés vers le secteur privé. Par exemple, à Chicago, le *Green Permit Program*, intégré au *Green Building Agenda*, incite les entreprises à rendre leurs bâtiments plus « verts » et notamment à végétaliser leurs toits. De même, la ville de Bâle, en Suisse, a mis en œuvre une stratégie de développement des toitures végétalisées en trois phases. La première a permis l'essor de la végétalisation pour diminuer la consommation énergétique des bâtiments, grâce à un fonds abondé par des



redevances électricité de particuliers et des entreprises. La seconde a introduit la prise en compte de la biodiversité grâce au vote d'un amendement stipulant que tout toit plan neuf ou rénové devait être transformé en toit vert. Et la troisième incorpore de nouveaux objectifs d'adaptation au changement climatique (I4CE, 2016).

Mais, pour garantir la bonne mise en œuvre des projets, les incitations réglementaires et financières doivent être assorties d'une gouvernance adaptée. En ce qui concerne la végétalisation urbaine, il est important que toutes les parties prenantes soient impliquées tout au long du projet, dès la phase d'identification du besoin et jusqu'au suivi. Le contexte urbain nécessite une acceptation sociale des habitants, plus particulièrement lorsque l'aménagement est accessible ou visible par le public. La gouvernance participative permet de mieux cerner les besoins de chaque acteur et d'adapter le projet pour une meilleure appropriation, qui sera essentielle à la pérennité de l'infrastructure végétalisée (cf. INVENTER, p.24). Cela passe également par une bonne communication pour sensibiliser les acteurs politiques, les acteurs économiques et le public aux services écosystémiques rendus par les infrastructures vertes, aux objectifs économiques associés (attractivité, coûts évités pour le maître d'ouvrage, la collectivité ou les contribuables) et aux

spécificités de la gestion favorable à la biodiversité, cette dernière étant souvent perçue par le public comme un déficit d'entretien. Enfin, afin de mesurer la réussite d'un projet de végétalisation et de pouvoir le reproduire, il est important de définir et de suivre plusieurs indicateurs en fonction des objectifs visés au départ. L'outil de suivi doit être simple et peu coûteux à mettre en place, être adaptable dans le temps, permettre de mesurer l'atteinte des objectifs (température, rétention d'eau, biodiversité, etc.), intégrer un suivi des coûts de l'infrastructure verte et recueillir des données concernant les usages pour mesurer l'acceptabilité sociale du projet (I4CE, 2016).

Le développement de modèles économiques pour la biodiversité en ville : quels mécanismes de financement innovants pour la végétalisation ?

Au-delà des incitations existantes, d'autres initiatives peuvent être des sources d'inspiration pour accélérer le développement de la végétalisation urbaine, favoriser son financement et l'orienter davantage vers la biodiversité.

Ainsi, via une approche « pollueur-payeur », la ville de Perth en Australie a utilisé une partie de l'argent généré par les parcmètres

pour financer un vaste projet de plantation d'arbres avec l'objectif de réduire la pollution grâce au stockage de carbone. Un tel mécanisme pourrait être mis en place dans de nombreuses grandes villes au stationnement payant avec l'objectif de végétaliser le milieu urbain en faveur de la biodiversité tout en bénéficiant des services écosystémiques. D'autre part, la région Midi-Pyrénées a lancé en 2013 un dispositif de compensation carbone volontaire local animé par l'Arpe Midi-Pyrénées (Agence régionale d'appui aux stratégies territoriales) et l'organisme de certification Ecocert. Celui-ci permet aux entreprises de compenser volontairement leurs émissions de carbone locales en finançant des projets de réduction des émissions sur le territoire, notamment les haies champêtres. Cet exemple pourrait également être adapté en faveur de la végétalisation et de la biodiversité urbaine. En ce qui concerne les financements du marché du carbone réglementaire, les exemples de projets labellisés ne concernent pas le milieu urbain (I4CE, 2016).

Toujours sur le volet des financements innovants, les obligations vertes, titres de créance qui constituent une voie de financement alternative aux emprunts bancaires et dont l'objet est associé à un bénéfice environnemental sur lequel l'émetteur s'engage à faire un reporting détaillé, présentent aujourd'hui une



→ importance grandissante aux yeux des gérants de fonds ISR (Investissements socialement responsables). En France, en 2016, le Conseil régional d'Ile-de-France a réalisé sa 6ème opération de financement via un emprunt obligataire vert pour un montant de 650 millions d'euros à destination de projets dans différents secteurs d'activité comme le transport durable, les énergies renouvelables mais également la restauration de la biodiversité et la gestion de l'eau. Ces obligations peuvent constituer une source de financement pour les collectivités ayant une capacité d'emprunt suffisante, mais également de plus en plus pour les entreprises (hors PME) pour lesquelles l'accès au financement bancaire est limité ou qui souhaitent diversifier leurs sources. Pour le secteur privé, un emprunt obligataire visant à financer des projets « biodiversité » et plus particulièrement de végétalisation urbaine, pose néanmoins la question du retour sur investissement des projets ainsi financés, si ceux-ci ne sont pas adossés à des projets plus classiques ayant une rentabilité anticipée.

Ensuite, la végétalisation urbaine pourrait être prise en compte dans l'attribution de certificats d'économies d'énergie (CEE). Introduit en 2005 par la loi de programmation et d'orientation de la politique énergétique, ce dispositif oblige, entre autres, les grands fournisseurs d'énergie soit à inciter les clients consommateurs à investir dans des équipements économes en énergie, soit à investir eux-mêmes dans des programmes éligibles à CEE et recevoir en contrepartie des CEE, avec un objectif de 700 TWh

cumac⁽¹¹⁾ pour la période triennale (2015-2017). Les entités éligibles au CEE sont les obligés (les vendeurs d'énergie), les collectivités, l'Anah, les bailleurs sociaux et les Sociétés d'économie mixte (SEM) dans certaines conditions. Quant aux actions octroyant l'obtention de CEE, elles sont compilées dans un catalogue officiel. L'une d'elles concerne l'isolation des toitures terrasses, elle est décrite dans la fiche BAR-EN-105. La végétalisation d'une toiture-terrasse sur un bâtiment existant peut donc octroyer des CEE sous certaines conditions⁽¹²⁾ mais dans ce cas c'est uniquement le dispositif d'étanchéité qui est considéré, et non la couverture végétale qui le recouvre (Ministère de l'Ecologie, du Développement durable et de l'Energie, 2017). Les économies d'énergie réalisées par les différentes actions se traduisent en kWh cumac enregistrés dans un compte ouvert sur le registre électronique national, qui donnent droit à l'attribution de CEE par les services du ministère chargé de l'énergie. Le registre comptabilise les CEE émis et permet aux acheteurs et vendeurs de CEE de se rencontrer. La création d'une offre et d'une demande donne une valeur économique au CEE, qui lui permet d'agir comme un levier économique supplémentaire en

(11) Les actions d'économies d'énergie sont comptabilisées en kWh cumac d'énergie finale, « cumac » étant la contraction de « cumulé et actualisé ». Un bien, un équipement ou une mesure, est caractérisé par l'économie d'énergie qu'il génère sur la durée de l'action : les économies d'énergie sont cumulées. Une actualisation de 4 % est également appliquée : cette actualisation est à la fois financière (le CEE a une valeur économique) et technique (amélioration de la situation de référence dans le temps, donc dépréciation progressive du gain) (Ademe, 2015).

(12) Pour obtenir des CEE via l'isolation d'une toiture-terrasse sur un bâtiment existant, il faut que la résistance thermique de l'isolation installée soit supérieure ou égale à 4,5 m².K/W, être réalisée par un professionnel certifié et les matériaux isolants utilisés doivent être certifiés ACERMI, suivre les normes NF EN ISO/CEI 17025 et NF EN 45011 du COFRAC ou être de certification CE.

facilitant l'investissement dans les projets d'économies d'énergie (Ademe, 2015). Pour aller plus loin, il pourrait être pertinent de faire évoluer le cahier des charges des opérations éligibles à l'octroi de CEE pour y faire entrer notamment des critères relatifs à la végétalisation des toitures terrasses (résistance thermique du complexe substrat-végétation). Dans l'hypothèse où les opérations de végétalisation ne seraient pas compatibles avec le dispositif des CEE, ce dernier reste quand même une source d'inspiration. Une démarche similaire pourrait être développée pour d'autres services écosystémiques en milieu urbain, avec par exemple des certificats dont les obligés seraient les entreprises responsables des émissions de polluants dans l'air, et pour laquelle la végétalisation urbaine constituerait une action parmi d'autres pour réduire les émissions polluantes

Enfin, dans la continuité de la Loi biodiversité, il serait possible d'imaginer la végétalisation urbaine, y compris celle du bâti, comme une mesure de réduction des impacts des aménagements, voire de compensation écologique, dans le cadre de l'application de la séquence Éviter-Réduire-Compenser, à condition que l'impact du projet d'aménagement soit effectivement localisé en milieu urbain, et sous réserve du respect du principe d'équivalence écologique. Cela permettrait de mener des actions de restauration au plus près de l'impact sur la biodiversité et de de contrebalancer la densification du milieu urbain par un renforcement de la trame verte urbaine.

De nos jours, les services écosystémiques rendus par la végétalisation urbaine sont avérés, mais leur chiffrage demande à être davantage documenté et normalisé. La recherche et développement (R&D) en matière de végétalisation du bâti est dynamique, engendrant des dispositifs de plus en plus nombreux, accessibles et propices à l'installation de la biodiversité. Il reste maintenant à appuyer l'essor des infrastructures vertes en continuant à mobiliser les acteurs publics au travers des politiques publiques et des incitations réglementaires et financières et en impliquant davantage les acteurs privés grâce à des mécanismes de financement innovants pour une végétalisation plus orientée vers la biodiversité. ■

Références

- Ademe. (2015). *Certificats d'économies d'énergie - Dispositif 2015-2017*. Angers.
- Adivet. (s.d.). *Incitations et subventions* [en ligne]. Disponible sur : <http://www.adivet.net/realisation/incitations-et-subventions.html>
- ADIVET, CSFE, SNPPA, UNEP. (2007). *Règles professionnelles pour la conception et la réalisation des terrasses et toitures végétalisées*.
- Apur. (2012). *Les îlots de chaleur urbains à Paris - Cahier n°1* [en ligne]. Disponible sur : http://www.apur.org/sites/default/files/documents/ilot_chaleur_urbains_paris_cahier1.pdf
- Apur. (2013). *Etude sur le potentiel de végétalisation des toitures terrasses à Paris* [en ligne]. Disponible sur : http://www.apur.org/sites/default/files/documents/vegetalisation_toitures_terrasses.pdf
- Apur. (2017). *Recensement des murs végétaux - Etat avancement 2016* [en ligne]. Disponible sur : http://www.apur.org/sites/default/files/documents/recensement_murs_vegetaux_avancement_2016.pdf
- Banting, D., Doshi, H., Li, J., & Missios, P. (2005). *Report on the Environmental Benefits and Costs of Green Roof Technology for the City of Toronto*. Toronto: Ryerson University.
- Bass, B., & Baskaran, B. (2003). Evaluating rooftop and vertical gardens as an adaptation strategy for urban areas. Dans *Technical Report NRCC-46737*. Ottawa: National Research Council Canada.
- Bernier, A.-M. (2011). *Les plantes grimpances, une solution rafraîchissante*. Montréal: Centre d'Ecologie Urbaine de Montréal.
- Brancier, C. (2006, décembre). *Façades, en finir avec les graffiti* [en ligne]. Disponible sur : http://www.leparticulier.fr/jcms/c_44912/facades-en-finir-avec-les-graffitis
- Bruxelles environnement. (2010). *Réaliser des façades vertes*.
- Clergeau, P. (2015). Professeur au Museum National d'Histoire Naturelle et coordinateur du projet ANR Ecoville. *Colloque Natureparif Végétaliser le bâti en Ile-de-France*. Paris.
- Commission d'enquête sur le coût économique et financier de la pollution de l'air. (2015). *POLLUTION DE L'AIR : LE COÛT DE L'INACTION*. Paris : Sénat.
- CSTB. (2005). *Un jardin sur le toit...* [en ligne]. Disponible sur : <http://www.cstb.fr/archives/webzines/editions/fevrier-2005/un-jardin-sur-le-toit.html>
- CSTC. (2006). *Toitures vertes : évacuation des eaux pluviales*. Les dossiers du CSTC.
- Culturesciences. (2017, janvier 20). *Innovation : cultiver des micro-algues sur les façades des bâtiments* [en ligne]. Disponible sur : <http://www.culturesciences.fr/2017/01/20/innovation-cultiver-micro-algues-sur-facades-batiments>
- Cuny, M.-A., Verroustraete, L., Brocvielle, M., & Cuny, D. (2016). Les impacts de la végétation en ville sur l'air, le climat et la santé. *Conférence aménagement urbain et changement climatique*. Loos.
- Currie, B. A., & Bass, B. (2008). Estimates of air pollution mitigation with green plants and green roofs using the UFORE model. *Urban Ecosystems*, 409-422.
- De Munck, C. (2013). *Modélisation de la végétation urbaine et stratégies d'adaptation pour l'amélioration du confort climatique et de la demande énergétique en ville*. Université de Toulouse.
- Direction de la nature, des paysages et de la biodiversité CG93. (2014). *Les toitures végétalisées : un atout pour la biodiversité urbaine*. ureau des études générales, Conseil Général de la Seine-Saint-Denis.
- Ecovegetal. (s.d.). *LA HAUTE QUALITE ENVIRONNEMENTALE ET LE BREEAM* [en ligne]. Disponible sur : <http://www.ecovegetal.com/fr/solutions/demarche-hqe-breeam>
- Ernst & Young. (2009). *Etude pour la définition d'une démarche de développement des toitures végétalisées*. Nice: Nice Côte d'Azur, Direction de l'Environnement.
- European Investment Bank. (s.d.). *Mécanisme de financement du capital naturel* [en ligne]. Disponible sur : <http://www.eib.org/products/blending/ncff/index.htm?lang=fr>
- Fassman-Beck, E. V. (2013). 4 Living roofs in 3 locations: Does configuration affect runoff mitigation? *Journal of hydrology*, 11-20.
- Frazer, L. (2005). Paving Paradise: The Peril of Impervious Surfaces. *Environmental Health Perspectives*, A456-A462.
- Garrigues, A. (2012, février 20). *Taxe pluviale : un outil d'aménagement durable pour les collectivités* [en ligne]. Disponible sur : <http://www.lagazettedescommunes.com/101469/taxe-pluviale-un-outil-damenagement-durable-pour-les-collectivites/>
- Gecina. (2015). *Vous avez dit biodiversité? - Rapport 2010-2014*. Paris.
- Getter, K. L., & Rowe, D. B. (2008). Media depth influences Sedum green roof establishment. *Urban Ecosystems*, 361-372.
- Groupe CDC (2017). « Villes intelligentes : Innover en confiance. Analyse, vision et positionnement du groupe Caisse des Dépôts ». *Cahiers stratégiques. Synthèse du rapport*, Mai 2017.
- I4CE. (2016). *Végétaliser la ville, pour quels bénéfices, avec quels financements, suivis et gouvernances des projets ?* Paris.
- Institut national d'études démographiques. (2004, octobre 20). *La canicule d'août 2003* [en ligne]. Disponible sur : <http://www.ined.fr/fr/tout-savoir-population/memos-demo/fiches-pedagogiques/la-canicule-d-août-2003/>
- Köhler, M. 1996 cité par Köhler, M. (2008). Green façades : a view back and some visions. *Urban ecosystems*.
- Kosareo, L., & Ries, R. (2006). Comparative environmental life cycle assessment of green roofs. *Building and Environment*, 2606-2613.
- Laille P., P. D. (2013). *Les bienfaits du végétal en ville : étude des travaux scientifiques et méthode*. Angers: Plante et Cité.
- Lassalle, F. (2006). *Végétalisation extensive des terrasses et toitures*. Paris: Editions du Moniteur.
- Lawton, J. (1983). Plant architecture and the diversity of phytophagous insects. *Annual review of entomology*, 23-39.
- Liang, H., & Huang, K. (2011). Study on rooftop outdoor thermal environment and slab insulation performance of grass planted roof. *International Journal of the Physical Sciences*, 65-73.
- LPO et CAUE Isère. (2012). *Guide technique : Biodiversité et bâti*. Grenoble: Biodiversité et bâti.
- Madre, F., Clergeau, P., Machon, P., & Vergnes, A. (2015). Building biodiversity: Vegetated façades as habitats for spider and beetle assemblages. *Global Ecology and Conservation*, 222-233.
- Maes J., F. N. (2013). *Mapping and Assessment of Ecosystems and their Services (MAES)*. Luxembourg: Publications office of the European Union.
- Manso, M. et Castro-Gomes, J. (2015). Green wall systems : a review of their characteristics. [éd.] Elsevier. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015, 41, pp. 863-871.
- MB. (2015, novembre 19). *Végétalisation urbaine : le coefficient de biotope par surface sort de la marginalité* [en ligne]. Disponible sur : <http://www.environnement-magazine.fr/article/41407-vegetalisation-urbaine-coefficient-de-biotope-par-surface-sort-de-marginalite/>
- Michot, A. (2012, septembre 4). *À Paris, le nettoyage des tags coûte 4,5 millions d'euros* [en ligne]. Disponible sur : <http://www.lefigaro.fr/actualite-france/2012/09/04/01016-20120904ARTFIG00564-45millions-d-euros-le-cout-du-nettoyage-des-tags-a-paris.php>
- Ministère de l'Ecologie, du Développement durable et de l'Energie. (2017). *Opération n° BAR-EN-105 - Isolation des toitures-terrasses* [en ligne]. Disponible sur : <https://www.ecologie-solidaire.gouv.fr/operations-standardisees>
- Niachou A., P. K. (2001). Analysis of the green roof thermal properties and investigation of its energy performance. *Energy and buildings*, 719-729.
- Norpac et IDDR. (2011, janvier 5). *Optimisation de la biodiversité sur les toitures végétalisées* [en ligne]. Disponible sur : <http://www.biodiversite-positive.fr/wp-content/uploads/2011/10/Toitures-v%C3%A9g%C3%A9tales-v%C3%A9g%C3%A9tales-05-janv.pdf>
- Norpac et IDDR. (2011, mai 11). *Murs et pieds de murs à biodiversité positive* [en ligne]. Disponible sur : <http://www.biodiversite-positive.fr/wp-content/uploads/2011/10/Murs-et-pieds-de-murs-v%C3%A9g%C3%A9tales-v%C3%A9g%C3%A9tales-11-Mai.pdf>
- OBDO, Natureparif, Plante & Cité, MNHN. (2011). *Réaliser des toitures végétalisées favorables à la*
- Oberndorfer, E., Lundholm, J., & Bass, B. e. (2007). *Green Roofs as Urban Ecosystems: Ecological Structures, Functions, and Services*. American Institute of Biological Sciences.
- Obrist M. K., Sattler T., Home R. et al. (2012). *La biodiversité en ville – pour l'être humain et la nature*. Birmensdorf: Institut fédéral de recherches WSL.
- Ottel, M., Perini, K., Fraaij, A. L., Haas, E. M., & Raiteri, R. (2011). Comparative life cycle analysis for green façades and living wall systems. *Elsevier*, 3419-3429.
- Perini, Katia et al. (2011) Greening the building envelope, façade greening and living wall systems. *Open Journal of Ecology*, mai 2011, Vol. 1, 1, pp. 1-8.
- Plante & Cité et Arrdhor Critt Horticole. (2013, mars). *Enquête et retour d'expériences de gestionnaires de murs végétalisés* [en ligne]. Disponible sur : http://www.plante-et-cite.fr/data/fichiers_ressources/pdf_fiches/experimentation/VFRapport%20d%27%Etude-1.pdf
- Pruvot, A. (2016). Le réseau d'eau potable de Paris : la nature au service de l'eau et l'eau au service de la nature en ville. *Sciences Eaux & Territoires*, 80.
- Renard, M. (2015, juin 19). Adjointe à la chef de la division Etudes végétales du Service Sciences et Techniques du végétal de la Ville de Paris. (F. Bourgeois, Intervieweur)
- Sailor, D. J. (2008). A green roof model for building energy simulation programs. *Energy and buildings*, 1466-1478.
- Schwager-Guilloux, J. (2014). *Les toitures végétalisées, puits et sources d'éléments en traces métalliques*. CEREMA.
- Service-public.fr. (s.d.). *Éco-prêt à taux zéro (éco-PTZ)* [en ligne]. Disponible sur : <https://www.service-public.fr/particuliers/vosdroits/F19905>
- Shashua-Bar, L., Pearlmutter, D., & Erell, E. (2009). Microscale vegetation effects on outdoor thermal comfort in a hot-arid environment. *Proc. of the seventh international conference on urban climate*. Yokohama.
- Sternberg, T., Viles, H., & Cathersides, A. (2011). Evaluating the role of ivy (*Hedera helix*) in moderating wall surface microclimates and contributing to the bioprotection of historic buildings. *Building and Environment*, 293-297.
- Tan J., Z. Y. (2010). The urban heat island and its impact on heat waves and human health in Shanghai. *International journal of biometeorology*, 75-84.
- UVED. (2012). Impacts Environnementaux couramment utilisés en ACV [en ligne]. Disponible sur : http://stockage.univ-valenciennes.fr/MenetACVBAT20120704/acvbat/chap01/co/ch01_020_2-4.html
- Ville de Paris. (2017, juillet 3). *Végétalisons la ville* [en ligne]. Disponible sur : https://www.paris.fr/duvertpresdechex-moi#des-murs-et-des-toits-vegetalises_1
- Weinmaster, M. (2009). Are green walls as "green" as they look? An Introduction to the Various Technologies. *Journal of Green Building*, 3-18.
- Yang, J., Yu, Q., & Gong, P. (2008). Quantifying air pollution removal by green roofs in Chicago. *Atmospheric Environment*, 7266-7273.

LA MISSION ECONOMIE DE LA BIODIVERSITÉ DÉVELOPPE LA RECHERCHE SUR LES PROCÉDÉS D'INTÉGRATION DE LA BIODIVERSITÉ EN VILLE

L'intérêt croissant pour la végétalisation urbaine se reflète dans les questions traitées par le secteur de la recherche. Celles-ci dépassent aujourd'hui le simple enjeu de la présence de la nature en ville à des fins esthétiques ou de bien-être. Elles prennent désormais en compte les interactions des espèces de faune et de flore entre elles et avec leur milieu dans le contexte particulier que constitue la ville, et ce, dans le but de proposer de meilleures solutions d'aménagement et de gestion des espaces végétalisés. Afin de soutenir les travaux de recherche orientés vers une végétalisation urbaine plus pérenne et favorable à la biodiversité, CDC Biodiversité a participé au financement de deux thèses portant sur ce sujet.

→ La première est intitulée

« **Toitures végétalisées et services écosystémiques : favoriser la multifonctionnalité via les interactions sols-plantes et la diversité végétale** ».

Elle a été réalisée entre 2013 et 2016 par **Yann Dusza**, sous la direction de Luc Abbadie, au sein de l'Institut d'Ecologie et des Sciences de l'Environnement de Paris. Elle a été cofinancée par CDC Biodiversité, la ville de Paris et ICADE, société foncière, filiale de la Caisse des Dépôts. Cette thèse est centrée sur la quantité et la qualité des services écosystémiques rendus par les toitures végétalisées. Yann Dusza a choisi de focaliser ses recherches sur des fonctions écosystémiques peu étudiées dans la littérature scientifique : cycle biogéochimique des nutriments (stockage ou fuite de carbone et d'azote), cycle de l'eau (rétention, évapotranspiration), production de biomasse et pollinisation. Il a comparé l'influence de différentes composantes des toitures végétalisées

dans la réalisation de ces fonctions :

- Un substrat artificiel proposé dans le commerce (mélange de tourbe et de pouzzolane) ou un substrat naturel prélevé dans une prairie (sol limono-sableux).
- Un substrat mince (10 cm) ou épais (30 cm)
- Différentes familles de plantes : Astéracées, Caryophyllacées, Crassulacées, Poacées ou Fabacées.
- Monocultures (une seule famille de plante) ou mélange des cinq familles de plantes.

Pour cela, il a mesuré différents paramètres in vitro et/ou en conditions réelles sur toiture :

- La transpiration foliaire
- La qualité et la quantité de l'eau ruisselée
- La biomasse produite et le rapport carbone/azote des feuilles
- Le nombre d'unités florales
- Le nombre d'interactions plante-pollinisateur

Le premier constat formulé par Yann Dusza est que, selon leurs composantes, les toitures végétalisées ne peuvent pas maximiser l'ensemble des services écosystémiques attendus. En effet, l'augmentation de la qualité d'une ou plusieurs fonction(s) écosystémique(s) se fait au détriment d'autres fonctions. Par exemple, un substrat profond entraîne une meilleure rétention d'eau mais induit des fuites de carbone plus importantes qu'un substrat mince. Ensuite, les résultats ont montré que le choix de certaines familles de plantes influait sur la réalisation des services écosystémiques : les Crassulacées sont associées à des rejets importants de carbone, des faibles rejets d'azote et une faible rétention d'eau, tandis que les Fabacées sont responsables de faibles

rejets de carbone, d'importants rejets de nitrates et d'une bonne rétention d'eau. Enfin, cette thèse a fourni des arguments en faveur de la diversité végétale sur les toitures car le mélange d'espèces a montré d'aussi bons résultats que les meilleures monocultures dans la réalisation de chaque fonction écosystémique étudiée. En ce qui concerne la pollinisation, les conclusions de la thèse suggèrent que les monocultures génèrent plus de visites de pollinisateurs, mais le mélange d'espèces attire des groupes fonctionnels de pollinisateurs plus variés. La thèse de Yann Dusza a permis de mettre en évidence l'influence des composantes des toitures végétalisées sur la réalisation des fonctions écosystémiques. Elle invite ainsi les porteurs de projets à s'interroger en amont pour prioriser les services écosystémiques attendus et concevoir leurs toitures végétalisées dans ce sens.

→ La seconde thèse, soutenue par **Ambre David**, s'intitule « **Vers une compréhension du fonctionnement carboné et échohydrologique des tilleuls argentés (*Tilia tomentosa Moench*) plantés en alignement à Paris** ».

Elle a également été réalisée entre 2013 et 2016 au sein de l'Institut d'Ecologie et des Sciences de l'Environnement de Paris, sous la direction de Luc Abbadie, Jean-Christophe Lata et Jérôme Ngao. Ce travail de recherche répond à l'enjeu de la survie des arbres d'alignement, responsables de nombreux services écosystémiques mais ayant une faible espérance de vie en milieu urbain en raison du stress hydrique. Ambre David a choisi d'étudier spécifiquement les tilleuls argentés plantés en alignement à Paris. Elle a cherché à répondre à plusieurs questions :

- Comment le milieu urbain influence-t-il la croissance et la mise en réserves de ces arbres ?

- Mettent-ils en place des stratégies particulières (évitement ou tolérance) face au stress hydrique ?
- Ces stratégies sont-elles dépendantes de l'âge des arbres ?
- Quelles sont les sources d'eau potentielles utilisées par les arbres en ville ?

Pour cela, elle a mesuré différents paramètres :

- La croissance radiale des arbres (dendrochronologie)
- Leurs réserves glucidiques et lipidiques
- Le suivi des isotopes de l'eau (procédé qui sert à déterminer les sources hydriques utilisées par l'arbre)

Les résultats de la thèse suggèrent que la disponibilité en eau est le facteur principal impactant la croissance des arbres en milieu urbain. En particulier, ce sont les précipitations automnales et printanières qui influent le plus sur la croissance annuelle des Tilleuls argentés. Ensuite, Ambre David a constaté que, dans des conditions de stress hydrique, les Tilleuls argentés âgés adoptent une stratégie de survie consistant

à accumuler le carbone dans leurs réserves au lieu de l'utiliser pour réaliser d'autres fonctions comme la croissance, la défense, ou la respiration. Quant aux jeunes Tilleuls argentés, ils mobilisent le carbone pour leur croissance radiale. Enfin, les expérimentations ont conclu que les arbres de rue semblent dépendre principalement de l'eau du sol très superficiel (0-20 cm), mélange d'eau de pluie et d'eau non potable (source hydrique ponctuelle liée au nettoyage des rues et des canalisations). De plus, soumis à l'îlot de chaleur urbain, les arbres âgés prélèveraient plus d'eau dans le sol que les arbres jeunes, en raison d'une plus forte demande d'évaporation, ce qui réduirait rapidement leurs réserves d'eau. La thèse d'Ambre David invite à repenser les stratégies d'irrigation des arbres en ville en protégeant les sols nus d'une évaporation excessive et en appliquant une irrigation adaptée aux stades de développement de l'espèce afin de pallier les risques de mortalité dus au stress hydrique, phénomène qui risque de s'accroître dans le contexte actuel de changement climatique. ■

Références



YANN DUSZA

Toitures végétalisées et services écosystémiques : favoriser la multifonctionnalité via les interactions sols-plantes et la diversité végétale, Ecologie, Environnement.

Université Pierre et Marie Curie - Paris VI, 2017.



AMBRE DAVID

Vers une compréhension du fonctionnement carbonée et échohydrologique des tilleuls argentés (*Tilia tomentosa* Moench) plantés en alignement à Paris. Ecosystèmes.

Université Pierre et Marie Curie - Paris VI, 2016.

Retrouvez les thèses en ligne sur : tel.archives-ouvertes.fr

LA BIODIVERSITÉ CRÉATRICE DE VALEURS ET DE LIEN SOCIAL : L'EXEMPLE DE LA RÉSIDENCE DES FOLIES À CHOISY-LE-ROI

Les enjeux autour de la ville durable de demain ont marqué ces dernières années un intérêt certain pour l'analyse des avantages tant biophysiques que socio-économiques de la biodiversité en ville dans la littérature scientifique. Les services écosystémiques urbains, dans toute leur diversité, sont désormais identifiés comme des facteurs prépondérants dans l'amélioration de la qualité de vie et du bien-être des citoyens, et comme moyen d'endiguer les effets du changement climatique, avec un large panel d'expériences à l'appui qui varient tant par les services écosystémiques que par les pays concernés. Rares sont néanmoins les outils et projets ayant permis de développer une approche quantitative transverse visant à l'évaluation des bénéfices de la biodiversité en ville pour rendre compte, au travers de cas concrets, de l'intérêt de

projets de réaménagements urbains en faveur de la biodiversité, d'un point de vue écologique, social et économique.

Partant du constat que les espaces de nature présentent un fort potentiel au sein du parc immobilier urbain, mais que ces espaces sont souvent sous-valorisés et que leur gestion peut aller à l'encontre des attentes et besoins des résidents, le projet pilote de la résidence « Les Folies » de Choisy-le-Roi dans le Val de Marne, mené par Efidis, bailleur social, et CDC Biodiversité, toutes deux filiales du groupe Caisse des Dépôts (CDC), propose une avancée dans ce sens à travers une expérimentation innovante : le réaménagement des espaces verts d'une résidence de logements sociaux en zone périurbaine prenant la biodiversité comme levier de transformation. Développé dans le cadre du Lab CDC, l'incubateur de projets

innovants du groupe CDC, ce projet lancé en 2015 avait pour objectif de redéfinir les usages des espaces extérieurs, les embellir et les valoriser, améliorer le cadre de vie des habitants, et favoriser le lien social dans un lieu en proie à certaines tensions et à la petite délinquance. Prenant appui sur une dynamique locale impulsée par un collectif d'habitants, regroupés en association dès 2007 pour améliorer les espaces extérieurs de la résidence, et sur des diagnostics écologiques ayant révélé le fort intérêt faunistique et floristique de la résidence, plusieurs réaménagements ont été réalisés en concertation étroite avec les habitants :

➔ Installation d'une végétation structurante à l'entrée de la résidence pour matérialiser l'espace et accompagner les piétons ;

- Installation de bacs plantés le long des trottoirs pour sécuriser la circulation piétonne et éviter le stationnement sauvage ;
- Réaménagement complet d'un espace boisé avec création d'un sentier pédagogique ;
- Mise en place d'un rucher à l'arrière du bois ;
- Création d'un jardin partagé constitué de 18 parcelles cultivables en pleine terre, accompagné de l'installation de récupérateurs d'eau de pluie et de composteurs accessibles aux résidents ;
- Revégétalisation différenciée d'espaces verts en fonction des surfaces, topographies et usages considérés (prairies fleuries...) assortie de panneaux pédagogiques.

Du point de vue financier, l'enjeu était de construire un projet à budget constant, voire en réduction, en matière d'entretien des espaces verts. Une fois l'investissement initial réalisé, les coûts d'exploitation devaient donc rester stables : ceci a été rendu possible par la nature de la gestion différenciée des espaces proposée qui, bien que demandant un entretien et des outils spécifiques (outil de fauche des prairies par exemple), demande une régularité moindre par rapport à l'entretien d'une pelouse à quelques centimètres de hauteur. Par ailleurs, le fonctionnement des jardins partagés et du rucher ont chacun un modèle économique autonome car géré par des structures indépendantes (apiculteur pour le rucher, association financée sur cotisations pour les jardins partagés).

Un an après les aménagements et constructions, un travail de recherche a été mené par la Mission Economie de la Biodiversité en partenariat avec le Master Bioterre de l'Université Paris I Panthéon Sorbonne pour évaluer les impacts socio-économiques de ce projet innovant. Sur la base d'une large revue de littérature sur les avantages socio-économiques de la biodiversité en ville et d'une enquête réalisée auprès des habitants et des

gestionnaires de ces espaces, un outil d'évaluation des services écosystémiques urbains a été construit et appliqué au cas de la résidence de Choisy-Le-Roi. Cet outil permet de hiérarchiser l'importance des services écosystémiques rendus en fonction du type d'aménagement extérieur considéré. Une trentaine de services écosystémiques urbains, répartis en quatre familles (Environnement-écologie, santé, socio-culturel, économie), et quatre catégories d'aménagements urbains (aménagements pour la gestion de l'eau, mobiliers urbains, aménagements et entretiens, aménagement en faveur de la faune) amenant à un total de 17 aménagements distincts, ont ainsi été identifiés comme pertinents et ont été évalués.

Au regard du caractère disparate de l'étude des services écosystémiques les uns par rapport aux autres dans la littérature, de l'étendue des fourchettes de valeur ainsi estimées (qui peut aller jusqu'à un facteur 10 dans certains cas) et de la territorialisation de l'analyse des services écosystémiques qui rend toute comparaison entre diverses études de cas délicate, l'approche méthodologique comparative retenue est construite sur la base d'une hiérarchisation qualitative de l'importance des services écosystémiques par type d'aménagements urbains. Ces résultats se présentent sous la forme d'indicateurs synthétiques allant de 1 à 4 pour chaque service écosystémique considéré, correspondant à la somme des valeurs de ce service pour chaque aménagement du projet. Quatre niveaux d'impact ont donc été identifiés allant d'un impact nul ou faible (note entre 0 et 1) à un impact dit « très important » (note entre 3 et 4). Par construction, aucun impact négatif n'est possible. Cela implique que la notion de « dysservice » n'est pas prise en compte dans le modèle. La caractérisation de ces niveaux d'impact pour chaque aménagement a été réalisée compte tenu de la littérature scientifique disponible et permet d'opérer une analyse comparative entre les services et les aménagements en s'affranchissant des valeurs absolues,

souvent incomparables entre elles. La distribution des impacts entre différents acteurs (habitants, bailleurs, société) a également été analysée.

L'évaluation des impacts porte pour certains services écosystémiques sur les bénéfices biophysiques ou économiques des aménagements en tant que tels, d'une part, et sur la perception de ces bénéfices pour les habitants, d'autre part - ces deux évaluations, objective pour l'une, intersubjective pour l'autre, pouvant donner des résultats distincts. Une enquête portant sur un échantillon de 25 % des habitants a été réalisée à l'été 2016 pour évaluer la perception des bénéfices par les habitants. L'application de l'outil au site de Choisy-Le-Roi donne les résultats présentés dans le tableau 10 ci-contre.

Des valeurs théoriques mettant en évidence l'importance des services écosystémiques socio-culturels pour le projet...

L'application de l'outil au projet met en avant une amélioration notable du sentiment d'attachement au lieu et de son attractivité pour les habitants. Elle permet l'anticipation théorique d'une nette amélioration de l'image du bailleur.

...face à des valeurs d'importance moindre pour les services de régulation et liés à la santé

L'impact effectif des aménagements sur la santé physique et sur le sentiment d'appartenance à une communauté (lien social) est en revanche plutôt mitigé, de même que celui sur la réduction de stress et l'amélioration de la gestion des émotions des habitants. L'analyse amène une conclusion similaire pour les services de régulation comme la réduction des îlots de chaleur urbains, les économies d'énergie ou encore la limitation des émissions de carbone, l'emprise surfacique des aménagements réalisés étant bien entendu contrainte pour l'étendue des espaces verts de la résidence. A noter cependant la forte valeur théorique

Tableau 10 : application de l'outil d'évaluation des bénéfices socio-économiques au site de Choisy-Le-Roi.

FAMILLE	SEU	VALEUR THÉORIQUE (sur 4)	VALEURS À DIRES D'ACTEURS (sur 4)
Environnement - écologie	▶ Réduction de l'îlot de chaleur urbain (radiation)	1,71	
	▶ Régulation de la température de l'air	1,57	
	▶ Amélioration de la qualité de l'air	1,86	
	▶ Séquestration de carbone	1,86	
	▶ Limitation d'émissions de carbone	0,71	
	▶ Economies d'énergie	1,43	
	▶ Limitation des pollutions // Qualité de l'eau	1,71	
	▶ Rétention de l'eau // Gestion du ruissellement	2,00	
	▶ Protection contre les inondations	1,00	
	▶ Limitation de l'érosion	1,29	
	▶ Atténuation des nuisances sonores (physiques)	0,43	
	▶ Atténuation des nuisances sonores (perçues)	0,29	0,78
	▶ Sensibilisation à la préservation de la biodiversité	1,57	2,89
	▶ Fonction d'habitats pour la biodiversité	1,71	
Santé	▶ Santé physique (Accès aux lieux de plein air)	1,57	2,16
	▶ Santé physique (Impact sur le taux d'obésité)	1,14	1,16
	▶ Santé psychologique et lien social (Interaction/réconciliation)	1,57	2,63
	▶ Santé-bien-être (réduction du stress/gestion des émotions)	1,57	2,59
Socio-culturel	▶ Approvisionnement en fruits & légumes pour l'auto-consommation	1,14	
	▶ Réduction des incivilités	0,43	1,25
	▶ Attachement aux lieux (culturel)	2,14	2,88
	▶ Attractivité des lieux	2,57	
	▶ Image du bailleur vis-à-vis des habitants	2,14	0,00
Economie	▶ Hausse de la valeur du foncier		
	▶ Economie locale (développement de l'emploi, des entreprises)		
	▶ Durée de vie des matériaux		
	▶ Bénéfices économiques des services de production		
	▶ Valeur du carbone séquestré		
	▶ Valeur des économies d'énergie		
	▶ Baisse des coûts des inondations		
	▶ Coûts des dépollutions		

Note : en gras les services écosystémiques pour lesquels les valeurs théoriques et à dire d'acteurs ont été estimés et peuvent être comparés.

Légende : 0 à 1 : Faible 1 à 2 : Notable 2 à 3 : Important 3 à 4 : Très important Pas de données

→ associée au service de rétention d'eau et de gestion des ruissellements rendu par les aménagements réalisés.

Une fréquentation des espaces verts toute relative...

De manière générale, l'enquête montre que seule la moitié des interrogés disent fréquenter les espaces extérieurs de leur résidence, tandis que les 3/4 des habitants disent fréquenter les espaces publics extérieurs de la résidence. Bien que les habitudes de fréquentation soient diverses, suivant l'âge et la situation professionnelle des habitants, pour la majorité d'entre eux, ce sont des usages récréatifs, le weekend et occasionnellement. On en déduit ainsi que les espaces, bien que réaménagés sont assez peu fréquentés par les habitants de la résidence, souvent par manque de temps ou parce qu'ils « n'y pensent pas ». Surtout, le taux de fréquentation des espaces extérieurs n'a pas évolué depuis les aménagements.

...contrebalancée par un ressenti positif de la part des habitants sur l'amélioration de leurs conditions de vie et de leur santé depuis les aménagements

En revanche, les habitants ont un ressenti plutôt très positif quant à ce projet. 84 % des interrogés estiment que les infrastructures participent à une meilleure compréhension de la biodiversité. Ils considèrent à 78 % que ces aménagements ont permis une meilleure valorisation des espaces de la résidence et une « forte » participation à l'esthétisme et à la « beauté » générale du lieu.

Lorsque l'on se penche sur les externalités positives des aménagements, les résultats sont surprenants. Contrairement aux attentes théoriques, près de 81 % des habitants pensent que les espaces verts participent à leur bon état de santé avec une augmentation importante de ce sentiment depuis les aménagements. 67 % des personnes interrogées estiment également que les aménagements ont « un peu » contribué à la diminution des pollutions et donc à la qualité de l'air dans

leur résidence. En revanche, seul un tiers d'entre eux estiment qu'ils ont un léger impact sur le bruit extérieur.

...et par une forte amélioration du sentiment de lien social

En moyenne, les aménagements ne semblent pas avoir participé à une augmentation du sentiment de sécurité puisque seul un tiers des personnes l'ont évoqué lors des entretiens. Le sujet semble en revanche prêter à débat puisque l'écart type entre les réponses ayant des appréciations positives et négatives est le plus important. Quoi qu'il en soit, l'impact le plus notable, évalué par les enquêtés, correspond à celui ayant trait à l'amélioration du sentiment de « lien social ». Les résidents sont 85 % à estimer que les aménagements des espaces verts participent « fortement » aux liens sociaux, avec des opportunités de rencontres et d'échanges accrues via les différents aménagements, en particulier les jardins partagés.

Un projet à multiples facettes avec des résultats globaux à nuancer

Tous les aménagements en faveur de la biodiversité n'ont pas marqué l'esprit des habitants de la même façon. Les bacs à fleurs et les jardins partagés sont les aménagements les plus marquants (évoqués dans les 2/3 des cas), suivis par les ruches. Les autres aménagements n'ont été évoqués spontanément qu'à de rares occasions. Les ressentis sont également très différents : alors que 100 % des adjectifs évoqués pour les ruches et les jardins ont été positifs (évoqués à de multiples reprises comme des lieux de partage), près de 50 % des adjectifs pour les bacs à fleurs sont à connotations négatives. Pour finir, si près de la moitié des habitants (48 %) estiment avoir une meilleure opinion de leur bailleur (considéré comme le porteur principal de projet) depuis les réaménagements urbains, l'autre moitié reste critique vis-à-vis de celui-ci, notamment en raison d'éléments de contexte extérieurs au projet de réaménagements pour la biodiversité,

montrant ainsi toute la difficulté d'isoler les impacts nets des projets, en dehors de tout contexte.

A travers son caractère encore exploratoire, et bien qu'inscrit en tant qu'enjeu clé de la ville de demain, ce premier exercice d'évaluation transverse des bénéfices écologiques, sociaux et économiques des aménagements urbains en faveur de la biodiversité a permis de confirmer, via un projet et une étude de cas concrète, certaines relations mises en évidence dans la littérature et intuitions opérationnelles qui associent biodiversité, développement économique, santé et lien social. L'approche est désormais en cours d'intégration dans le contrat de performance Biodiversité (CPB) proposé par CDC Biodiversité aux maîtres d'ouvrage et aménageurs urbains (contrat permettant de lier l'atteinte d'objectifs de qualité biodiversité à un budget forfaitaire, stable ou en diminution par rapport à l'existant). Cependant, bien que permettant une première approche en matière d'aide à la décision, compte tenu de la littérature disponible, l'approche qualitative ainsi développée, renforcée par la conduite d'une enquête terrain, montre également ses limites. L'analyse des relations causales était toujours délicate en l'absence de l'utilisation de méthodes statistiques adéquates et la contextualisation de nombreux bénéfices, notamment ceux purement économiques, empêche d'adopter une approche hors-sol applicable à tous types d'aménagements. Par ailleurs, dans un contexte général de reconstruction d'une trame verte et bleue urbaine, le développement raisonné des aménagements urbains pourvoyeurs de bouquets de services écosystémiques écologiquement pertinents et socialement souhaités ne pourra faire abstraction d'une évaluation quantitative des valeurs tant biophysiques qu'économiques du large panel de services écosystémiques urbains disponibles. C'est notamment à cette condition qu'un changement d'échelle pour le retour de la biodiversité en ville pourra s'opérer. ■

INTERNATIONAL

L'ARCHITECTURE POUR RECRÉER DU LIEN ENTRE L'URBAIN ET LA NATURE : TRANSFORMER NOS VILLES EN FORÊT, LE RÊVE RÉALISÉ DE STEFANO BOERI ARCHITETTI.



Liuzhou Forest City (projet) © Stefano Boeri Architetti

STEFANO BOERI est un architecte italien de renommée internationale (Stefano Boeri Architetti). Il est également professeur à l'Ecole Polytechnique de Milan et professeur invité dans plusieurs universités prestigieuses telles que la *Harvard Graduate School of Design*. Il est à l'origine du concept de Bosco Verticale, littéralement « forêt verticales », dont les deux premiers immeubles ont été inaugurés à Milan en 2014. Ces immeubles forêts s'exportent aujourd'hui dans le monde entier.

Quel est l'origine du projet Bosco Verticale à Milan ?

SB : Le projet Bosco Verticale (« forêts verticales ») est né en 2007, commandité par Hines, un des leaders immobiliers mondiaux de la promotion, de l'investissement et de l'asset management, qui me demandait d'imaginer deux tours dans le quartier d'affaires Porta Nuova à Milan.

Je réfléchissais depuis un certain temps à la possibilité de **trouver une nouvelle relation entre le vivant et l'architecture**. J'ai eu l'opportunité de développer cette architecture de nouvelle génération qui utilise les arbres, les plantes et les arbustes de façon structurelle dans la composition du bâtiment, c'est-à-dire que les arbres soient une composante essentielle de

l'architecture. C'est quelque chose de tout à fait nouveau car habituellement l'architecture entretient une relation avec la nature qui est soit décorative soit métaphorique, c'est-à-dire lorsque l'architecture devient une imitation de la nature, comme par exemple des tours qui vont ressembler à des arbres. Selon moi, le plus important aujourd'hui c'est d'**imaginer une architecture qui intègre la nature et la biologie, qui englobe le vivant jusque dans ses matériaux**. C'est la problématique que j'ai voulu traiter en réalisant le projet Bosco Verticale à Milan. Et c'est aujourd'hui ce que nous sommes en train de répliquer à travers le monde, en France (Paris), aux Pays-Bas (Utrecht), en Albanie (Tirana), en Chine (Shanghaï), au Brésil (Sao Polo) ou encore en Egypte.

↳ **En ce qui concerne la dimension environnementale du projet, comment la biodiversité a-t-elle été prise en compte ?**

SB : Nous avons fait un travail de sélection des essences, avec l'aide d'un botaniste, d'un agronome et d'un éthologiste, qui tient compte des contraintes liées à l'exposition, à l'altitude et aux conditions climatiques, notamment le vent. C'est sur cette base que nous avons composé les façades et donc l'architecture du bâtiment. En effet, la proportion et la dimension des balcons est liée à l'espace que nous avons choisi de donner à chaque arbre ou arbuste. Ensuite, nous avons privilégié dans le choix des essences des arbres à feuillage caduc pour les façades nord, c'est-à-dire qui perdent leurs feuilles en hiver, et des arbres à feuillage persistant pour les façades sud. Cela permet de **créer des conditions microclimatiques**, afin que les façades nord soient ensoleillées en hiver et que les façades sud bénéficient de l'ombre et soient protégées du soleil en été. Cela permet de réduire sensiblement les coûts de chauffage en hiver et de refroidissement durant l'été. De nombreuses recherches sont actuellement menées pour mesurer ces effets et pour suivre la réduction de la consommation énergétique. Nous suivons également la capacité d'absorption de CO₂ et la production d'oxygène (cf. encart, ci-contre).

En ce qui concerne la biodiversité, lorsque vous visitez aujourd'hui le Bosco Verticale, il y a un vrai écosystème qui s'est créé, avec une continuité entre les feuilles des arbres, les feuilles des arbustes et les feuilles des plantes. Les façades sont composées de plus de 100 espèces différentes et nous avons recensé plus de 20 espèces d'oiseaux qui y nichent. Et, plus spécifiquement, nous avons pu constater le retour d'espèces comme le martinet que nous ne voyions plus à Milan.

Quelles sont les contraintes d'un point de vue financier et quelles en sont les implications en termes de reproductibilité ?

SB : Les Bosco Verticale peuvent être développés dans des contextes tout à fait différents de celui de Milan qui est une résidence de standing à destination d'un public aisé. Au Pays-Bas, nous sommes en train de bâtir un projet de forêt verticale pour des logements sociaux et donc à bas coût. En Chine, nous sommes en train de réaliser une ville forêt et, là aussi, nous ne pouvons pas imaginer construire des bâtiments trop coûteux et à destination d'un public unique. Il faut imaginer que, lorsque nous avons construit le premier projet de Bosco Verticale, nous avons été confrontés à de nombreux défis et contraintes techniques qu'il fallait relever. Par exemple : la résistance au vent. Nous avons dû réaliser une série de tests sur la résistance des arbres et trouver des solutions techniques permettant de fixer les racines. Des tests ont même été menés dans un centre spécialisé dans les ouragans à Miami. Toutes ces études ont été très coûteuses, mais aujourd'hui nous n'avons plus besoin de les renouveler pour construire de nouveaux bâtiments, ce qui réduit les coûts par rapport aux premières expérimentations. Ce ne sont pas les arbres qui coûtent cher mais le développement technique. **Nous pouvons donc envisager des projets similaires avec un coût moindre** car nous disposons désormais des solutions technologiques pour installer des arbres à de hautes altitudes et nous pouvons bénéficier des retours d'expérience des premiers projets : **nous connaissons les contraintes structurelles**. Cependant, concernant les arbres, nous devons toujours être en relation avec les botanistes locaux afin d'adapter le choix des essences à la région concernée. **Il est très important d'avoir une biodiversité et des essences adaptées aux conditions climatiques locales**. C'est une condition de succès du bâtiment et de sa pérennité sur le long terme.

Selon vous, quel rôle peut jouer l'architecte dans le développement de la biodiversité en ville et plus globalement pour intégrer les enjeux de durabilité dans la ville de demain ?

SB : L'architecte a un rôle très important à jouer dans le développement de la biodiversité urbaine. A travers ses idées et ses conceptions, il est à l'origine de l'innovation technologique qui est un point fondamental. Par exemple, nous avons aujourd'hui réussi à créer des bâtiments complètement autonomes d'un point de vue énergétique. Les architectes ont beaucoup développé et traité les questions liées aux énergies renouvelables dans les bâtiments. Mais il y a une autre question qui commence à être abordée par l'architecture : la biodiversité et la capacité des arbres, arbustes et autres espèces vivantes à devenir elles-mêmes l'architecture. C'est l'objectif le plus important de ma pratique architecturale. **Il est très important d'imaginer une architecture qui soit en condition d'intégrer la nature vivante**. Peut-on imaginer une architecture qui utilise la nature végétale pas simplement comme un élément de décoration mais comme un élément essentiel et structurel de sa composition ? Je pense que oui. Je prône une architecture simple mais qui soit capable de faire de la nature le protagoniste principal de la structure. Une architecture qui met la vie au centre. Et, ce qui est intéressant, c'est que la vie, le vivant, est évolutif. Ce que j'aime le plus dans les forêts verticales que nous construisons c'est qu'elles changent chaque jour, suivant le soleil, suivant les saisons, les couleurs sont toujours différentes, les proportions des feuilles évoluent et c'est fantastique. C'est **une architecture capable de marquer non seulement l'espace mais aussi l'évolution du temps**, ce qui reconnecte les habitants avec la temporalité des saisons.



De même, l'architecte a un rôle important à jouer dans l'adaptation des villes au changement climatique. **L'afforestation urbaine est une des grandes finalités de l'urbanisme contemporain**, et la pratique architecturale va en tenir compte. Il est nécessaire aujourd'hui d'imaginer que nous devons multiplier le nombre d'arbres, multiplier les forêts urbaines et péri-urbaines, pour réduire le CO₂ présent dans l'atmosphère, dont 75 % des émissions provient des villes. Dans ce but, il ne faut pas uniquement travailler sur les façades, mais aussi les parcs, les jardins, les murs, les toits, etc. Aujourd'hui nous travaillons sur un projet de « ville forêt » (Liuzhou Forest City) en cours de construction en Chine, dans la province du Guangxi, commandité par la municipalité de Liuzhou. Dans ce projet, l'ensemble des bâtiments sera recouvert de plantes et d'arbres (cf. image p.29). L'objectif était d'imaginer une alternative à la construction périphérique classique. Cette nouvelle ville devrait accueillir 30 000 habitants et absorber 10 000 tonnes de CO₂ par an avec plus d'une centaine d'espèces (40 000 arbres et 1 million de plantes). Cette ville sera aussi auto-suffisante en énergies. La livraison est prévue pour 2020. ■

Le Bosco Verticale en chiffres

20 000 m² de forêt

700 arbres

5 000 arbustes

15 000 plantes
grimpanes et vivaces

23 espèces d'arbres

94 espèces végétales
(hors arbres)

20 espèces d'oiseaux
recensées

113 logements

480 résidents

Absorption de CO₂ :
19 000 kg/an

Production d'Oxygène :
18 980 kg/an

Hauteur des tours :
85 et 116 mètres

Budget : 55 000 000 €

Coût de construction
moyen : 1 950 €/m²

Prix de vente moyen :
9 500 à 10 000 €/m²

Dépenses moyennes
d'entretien : 63 €/m²/an
(chauffage, eau, irrigation,
réception, sécurité, maintenance,
nettoyage, climatisation, etc.)

Volume d'eau pour l'irrigation :
3 500 m³/an

Source : Stefano Boeri Architetti

INITIATIVES

LE LABEL BIODIVERCITY®

Plus d'informations : cibi-biodiversity.com

Le Conseil International Biodiversité et Immobilier (CIBI) est porté par les acteurs de la ville, de l'immobilier et du vivant en milieu urbain, il vise à promouvoir la biodiversité urbaine et la relation homme-nature dans les secteurs de

l'aménagement, de la construction, de la vie quotidienne au sein des quartiers et des îlots bâtis. Il est à l'initiative du label BiodiverCity®. Celui-ci note et affiche la performance des projets immobiliers prenant en compte la

biodiversité. Il complète les certifications internationales qui intègrent la question de la biodiversité sans faire l'objet d'une évaluation approfondie. ■

UN GUIDE DE RECOMMANDATIONS POUR L'INTÉGRATION DES CRITÈRES DU LABEL VÉGÉTAL LOCAL DANS LES MARCHÉS PUBLICS

Plus d'informations : www.plante-et-cite.fr/Ressource/fiche/426

Le label Végétal local repose sur un référentiel technique pour assurer la traçabilité des végétaux sauvages depuis leur prélèvement durable en milieu naturel jusqu'à leur commercialisation. Les végétaux labellisés garantissent un patrimoine génétique local diversifié sur la base de 11 régions écologiques définies sur le territoire métropolitain. Le

marché français des végétaux sauvages ne disposait pas de garantie pour qualifier leur origine géographique. Dans ce contexte, le label Végétal local a été créé en 2015 à l'initiative de la Fédération des Conservatoires Botaniques Nationaux (FCBN), l'Association Française Arbres Champêtres et Agroforesteries (AFAC-Agroforesteries) et Plante & Cité.

Ce guide, publié en avril 2017, est une aide à la rédaction de Cahiers des Clauses Techniques Particulières (CCTP) pour la construction des marchés. Il s'adresse aux maîtres d'ouvrage et aux maîtres d'œuvre travaillant sur des projets ayant des exigences fortes en termes de fonctionnalité écologique. ■

UN INDICATEUR POUR MESURER L'ÉTAT DE LA BIODIVERSITÉ POTENTIELLE DANS LES JARDINS PRIVÉS

Dans le cadre d'une thèse intitulée « Les habitants et leur jardin. Relations au vivant, pratiques de jardinage et biodiversité au cœur de l'agglomération parisienne » (Université Paris 1 - LADYSS), Mathilde Riboulot-Chetrit a développé un Indicateur synthétique afin d'évaluer l'état de la Biodiversité Potentielle et vraisemblable dans les Jardins privés (IBPJ). Cet outil peut être utilisé par l'habitant afin de lui permettre de calculer l'état de la biodiversité

dans son jardin, de prendre conscience de cette biodiversité, voire d'améliorer cette biodiversité, le tout de façon ludique. Parallèlement et en complément d'autres méthodes (telles que des politiques ou des outils incitatifs), l'utilisation de cet indicateur par l'habitant participe d'une sensibilisation de cet acteur aux questions de biodiversité. Par ailleurs, les résultats liés au calcul de l'IBPJ permettent de montrer aux citoyens et aux élus locaux que les jardins en

milieu urbain peuvent aussi accueillir une biodiversité intéressante. A une échelle plus large, l'IBPJ peut également être mis en œuvre dans tout type d'espace végétalisé et être employé par les gestionnaires de ces espaces. Cet indicateur peut être utilisé dans plusieurs territoires dans des actions en faveur de la biodiversité urbaine et constituer un outil d'aide à la décision. ■