

RENATURER LES VILLES

MÉTHODE, EXEMPLES
ET PRÉCONISATIONS

DIRECTEUR DE LA PUBLICATION

Nicolas Bauquet

**DIRECTION DE L'AGENCE
RÉGIONALE DE LA BIODIVERSITÉ
EN ÎLE-DE-FRANCE**

Magali Gorce

DIRECTRICE DE LA COMMUNICATION

Sophie Roquelle

AUTEURS

Gaëtane Deboeuf De Los Rios, Marc Barra
et Gwendoline Grandin, ARB ÎdF

DIRECTION ARTISTIQUE

Olivier Cransac

**CONCEPTION ET
RÉALISATION GRAPHIQUE**

David Lopez
Studio TROISQUATRE
(www.troisquatre.fr)

RÉFÉRENCE BIBLIOGRAPHIQUE À UTILISER

Deboeuf De Los Rios, G., Barra, M., Grandin., G. 2022. Renaturer les villes.
Méthode, exemples et préconisations. ARB ÎdF, L'Institut Paris Region.

PHOTO DE COUVERTURE

Jardin des joyeux à Aubervilliers ©Marc Barra/ARB ÎdF

PARUTION

Juillet 2022

ISBN

978-2-7371-2277-4

© L'Institut Paris Région

Tous droits de reproduction, de traduction et d'adaptation réservés. Les copies, reproductions, citations intégrales ou partielles, pour utilisation autre que strictement privée et individuelle, sont illicites sans autorisation formelle de l'auteur ou de l'éditeur. La contrefaçon sera sanctionnée par les articles 425 et suivants du code pénal (loi du 11-3-1957, art. 40 et 41). Dépôt légal : 2e trimestre 2021.

FABRICATION

Sylvie Coulomb

RELATIONS PRESSE

Sandrine Kocki,
sandrine.kocki@institutparisregion.fr

IMPRESSION

Frazier

Institut Paris Région

15, rue Falguière
75740 Paris Cedex 15
01 77 49 77 49



www.arb-idf.fr



SOMMAIRE

#1

7

LA RENATURATION : DE QUOI PARLE-T-ON ?

LES DIFFÉRENTES APPROCHES ET SIGNIFICATIONS DE LA RENATURATION	7
LA RENATURATION EN VILLE	11
LES SOLS URBAINS AU CŒUR DE L'ENJEU DE RENATURATION EN VILLE	18
RENATURATION ET OBJECTIF « ZÉRO ARTIFICIALISATION NETTE »	24

#2

27

IDENTIFIER LES SECTEURS À FORT POTENTIEL DE RENATURATION

MÉTHODOLOGIE GÉNÉRALE	27
TYPOLOGIE DES ESPACES IMPERMÉABILISÉS POTENTIELLEMENT RENATURABLES	29
RENATURER POUR RECONQUÉRIR LA BIODIVERSITÉ	33
RENATURER AVEC UN OBJECTIF D'ADAPTATION AU CHANGEMENT CLIMATIQUE	52
RENATURER POUR AMÉLIORER LA SANTÉ ET LE CADRE DE VIE	65
QUEL POTENTIEL DE RENATURATION EN ÎLE-DE-FRANCE ?	79

#3

83

RÉUSSIR SON PROJET DE RENATURATION LES ÉTAPES ESSENTIELLES

PRIORISER ET ESTIMER LA FAISABILITÉ DES PROJETS	83
DIAGNOSTICS PRÉALABLES	84
MISE EN ŒUVRE	85
LA GESTION DES ESPACES RENATURÉS	101
SUIVI ET INDICATEURS	102
IMPLICATION CITOYENNE	104
PROTECTION DES SITES RENATURÉS	107

110

L'ESSENTIEL À RETENIR

113

CONCEPTS ET DÉFINITIONS COMPLÉMENTAIRES

119

ANNEXES

129

BIBLIOGRAPHIE

REMERCIEMENTS

POUR L'ÉLABORATION DE L'OUTIL CARTOGRAPHIQUE

Cécile Mauclair, Simon Carrage (L'Institut Paris Region) et Mustapha Taqarort (Agence régionale de la biodiversité en Île-de-France).

PARTENAIRES FINANCIERS

Métropole du Grand Paris, Commission européenne avec le programme de recherche et d'innovation Horizon 2020 REGREEN.

RELECTURE, RETOURS D'EXPÉRIENCE ET EXPLOITATION DES DONNÉES

Lucile Dewulf, Hemminki Johan, Olivier Renault, Gilles Lecuir et Gabrielle Huart (Agence régionale de la biodiversité en Île-de-France), Jean Benet, Erwan Cordeau, Laetitia Pigato, Nicolas Cornet, Manuel Pruvost-Bouvattier, Nicolas Laruelle, Alexandra Cocquièrre, Christine Morisceau et la médiathèque Françoise Choay (L'Institut Paris Region), Guillaume Lemoine (EPF Hauts-de-France), Robin Dagois (Plante & Cité), Franck Marchebout (Ville de Sevran), Gaëlle Kania (Communauté d'agglomération de Maubeuge-Val de Sambre), Adine Hector et Mina Charnaux (Eurométropole de Strasbourg), Yann Fradin (Association Espaces), Aurélien Régné (Communauté de communes Caen la Mer), Cathy Biass-Morin (Ville de Versailles), Samuel Lelièvre (Ville de Besançon), Grégory Morisseau (Chorème), Marcos Da Silva (Fieldwork SAS d'architecture), Yohan Tison (Ville de Lille), Eric Chanal (SIAH), Frédéric Ségur (Métropole de Lyon), Ivan Bernez (L'Institut Agro Rennes-Angers), Jean-Louis Ducreux (Atelier d'Écologie Urbaine), Jeanne Duvergé (Ville de Caen), Samia Smaallah et Franck Rogovitz (Ville de Metz), François Vadepiet (Wagon Landscaping), Olivier Taugourdeau (Valorhiz), Lionel Chabbey (Hepia), Maude Lalonde (Centre d'écologie urbaine de Montréal), Aurélien Hugué (AH Ecologie), René Perron et Bénédicte Vidaling (Les Amis du Transformateur).

POUR LEURS CONSEILS ET LE SUIVI DU PROJET

Luc Abbadie (Sorbonne Université), Mathieu Rivet et Tamami Owada (CDC Biodiversité), Sophie Gonguet (département de la Seine-Saint-Denis), Irène Nenner et Pierre Salmeron (Environnement 92), Marianne Zandersen (Aarhus University), Åsa Ode Sang (Swedish University of Agricultural Sciences).

POUR LA TRADUCTION VERS LA VERSION ANGLAISE

Martyn Back



This project has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under grant agreement no.821016 This document reflects only the author's view and the Commission is not responsible for any use that may be made of the information it contains.

Ce guide s'inscrit dans le cadre du projet européen Horizon 2020 REGREEN sur les solutions fondées sur la nature en milieu urbain [1]. On appelle « solutions fondées sur la nature » les actions de préservation, de gestion et de reconquête des écosystèmes qui visent à favoriser à la fois l'atténuation (captage et stockage du carbone) et l'adaptation (protection contre les tempêtes, les inondations, les glissements de terrain, les incendies) au changement climatique. Ces solutions ont prouvé leur efficacité et peuvent compléter ou se substituer aux infrastructures classiques dites « grises » utilisées dans l'aménagement du territoire. L'atout des solutions fondées sur la nature est leur multifonctionnalité, là où les solutions grises ne résolvent qu'un seul problème à la fois. Outre les bénéfices pour la biodiversité et le climat, elles ont l'avantage de contribuer à améliorer le cadre de vie et la santé de la population, le tout à moindre coût pour les collectivités. Les solutions fondées sur la nature s'appliquent à tous les milieux naturels, agricoles, forestiers, aquatiques et urbains, et à toutes les échelles, pour garantir la résilience des territoires face aux changements globaux. La renaturation est un moyen de les déployer dans des secteurs artificialisés et imperméabilisés.

ÉDITO

Région la plus peuplée et urbanisée de France, l'Île-de-France recèle un riche patrimoine naturel souvent mal connu. Elle est caractérisée par une diversité d'habitats avec des terres agricoles fertiles, des massifs forestiers remarquables, des zones humides et de nombreux cours d'eau, mais aussi une biodiversité urbaine insoupçonnée. Toutefois, l'Île-de-France a connu au cours du dernier siècle de profondes transformations liées à son dynamisme économique et démographique qui ont impacté les milieux naturels. Les espèces qui y vivent, ordinaires comme remarquables, ont été fortement affectées par ces changements, avec un déclin marqué de nombreuses populations et la disparition de certaines espèces.

Le Conseil régional d'Île-de-France a mis en place plusieurs dispositifs en lien avec les enjeux de biodiversité dont l'appel à projets Plan vert, visant à augmenter la surface en espaces verts et à améliorer leur accessibilité aux Franciliens ; l'appel à manifestation d'intérêt autour des friches urbaines et le dispositif « 100 îlots de fraîcheur », dans le but de limiter l'étalement urbain, encourager son renouvellement et mettre en place des stratégies locales de gestion des épisodes caniculaires. Ces initiatives s'inscrivent dans la mise en œuvre de la Stratégie régionale de la biodiversité 2020-2030.

Pour aller plus loin, l'actuel schéma directeur de la région Île-de-France (SDRIF) entre actuellement en révision avec la triple ambition d'aboutir à une région ZAN (zéro artificialisation nette), ZEN (zéro émission nette) et circulaire (zéro déchet). Parce que la renaturation d'espaces minéralisés est un des vecteurs pour ramener une nature souvent réduite dans nos cités, la présidente de Région a souhaité me confier, avec l'appui de l'Agence régionale de la biodiversité en Île-de-France, la préfiguration d'un nouvel outil pour accélérer la remise en état des espaces dégradés, rendre nos villes plus accueillantes pour la biodiversité et articuler les politiques publiques visant la protection des espaces de nature sur l'ensemble du territoire francilien.

Renaturer, c'est bien sûr replanter, recréer des habitats, accueillir des espèces... mais c'est aussi renforcer les trames vertes et bleues, rétablir des écosystèmes et restaurer des fonctions écologiques. Si la restauration écologique a fait ses preuves en milieux naturels, de nombreuses questions se posent concernant la renaturation des milieux urbains : comment localiser sur un territoire des secteurs à fort potentiel de renaturation ? Comment élaborer des stratégies pour répondre aux urgences écologiques et climatiques ? Quels sont les savoirs et méthodes à mobiliser pour réussir un projet de renaturation ?



Autant d'interrogations auxquelles l'Agence régionale de la biodiversité en Île-de-France tente de répondre à travers cet ouvrage qui se veut un guide inspirant et technique pour accompagner le déploiement de stratégies et de projets concrets de renaturation dans nos territoires.

Sophie DESCHIENS,
Présidente de l'Agence régionale de la biodiversité en Île-de-France
Conseillère régionale déléguée spéciale à la région circulaire et amie des animaux

PRÉFACE

Renaturer la ville, oui ! Mais pourquoi, comment, où et quand ? Ces questions, tous les acteurs de la fabrique de la ville se la posent, de l'individu citoyen au décideur politique. Les réponses existent, la plupart du temps, qu'elles soient basées sur la science ou sur l'expérience concrète, mais elles sont rarement rassemblées quelque part, rarement reliées les unes aux autres.

Pourtant, c'est aujourd'hui un lieu commun d'affirmer que seules une vision et une action systémiques, multi-objectifs et multi-échelles permettront de rétablir les grands équilibres naturels qui conditionnent la vie des humains, voire leur survie. Passer à l'action dans cet état d'esprit, voilà le défi qui est à relever, dans l'urgence. Ce document y aidera puissamment en mêlant habilement connaissances scientifiques, méthodologie de mise en œuvre et retours d'expérience.

Le lecteur praticien y découvrira en effet un digest de ce qu'il faut savoir de la crise écologique en cours en contexte urbain, notamment sur la régression de la biodiversité, le dérèglement climatique et la dégradation des sols. A travers le concept d'ingénierie écologique, il y percevra les grands principes à même de garantir l'atteinte de l'objectif de zéro artificialisation nette d'un point de vue qualitatif. Il y aura aussi accès à une méthode simple, qui lui permettra de déployer, au fil des ans et dans une diversité de quartiers, un plan cohérent de renaturation. Il pourra enfin y trouver des idées pour adapter au mieux un projet aux conditions locales et le partager avec ses concitoyens.



Renaturer la ville n'est pas une simple mise au vert. C'est s'engager dans la construction d'une relation nouvelle avec le monde qui nous entoure, radicalement différente de celle qui a prévalu jusqu'à présent. Ce document nous montre, avec beaucoup de clarté, un chemin possible.

**Luc Abbadie, Professeur d'écologie à Sorbonne Université
Directeur de l'Institut de la Transition Environnementale
de Sorbonne Université**

INTRODUCTION

En dix ans, la superficie de l'espace urbain en France métropolitaine a progressé de 19 % selon l'INSEE. Les villes occupent désormais 22 % du territoire et abritent 47,9 millions de personnes, soit 77,5 % de la population. La France est le pays européen qui artificialise le plus ses sols, à un rythme quatre fois supérieur à celui de l'augmentation de la population (Fosse *et al.*, 2019). Ce phénomène est aujourd'hui au premier plan des causes de l'accélération du changement climatique et de l'érosion de la biodiversité.

L'introduction de l'objectif national « zéro artificialisation nette » (ZAN) marque un tournant dans la volonté de freiner l'étalement urbain, en privilégiant le renouvellement et la densification des villes. Cette densification pourrait néanmoins rendre les villes encore moins résilientes face aux aléas climatiques et accentuer le déclin de la biodiversité. La mise en œuvre du ZAN engage par ailleurs un objectif de renaturation, autrement dit de « restituer à la nature » l'équivalent des superficies consommées par l'urbanisation. Cependant, le coût estimé et la complexité que constitue une opération de renaturation supposent avant tout d'éviter toute artificialisation supplémentaire.

Dans ce contexte, ralentir l'urbanisation et renaturer les milieux urbains sont deux stratégies complémentaires et incontournables. Elles se posent avec d'autant plus d'acuité que la biodiversité décline fortement au sein des villes, que les effets du changement climatique (ruissellement, inondations, îlots de chaleur urbains) s'amplifient et que la santé et le bien-être se dégradent dans les métropoles. L'Île-de-France, et en particulier le territoire du Grand Paris, est particulièrement confrontée aux conséquences de la minéralité et de la densité urbaine.

Or, nos villes regorgent d'espaces inutilement asphaltés ou bétonnés sur lesquels la nature pourrait reprendre ses droits. Ce gisement, actuellement mal quantifié, pourrait être mobilisé pour agrandir les espaces de nature, les relier entre eux, rouvrir des rivières urbaines, restaurer des zones humides et créer de nouveaux espaces de nature pour la population et les espèces. Pour relever ce défi, les collectivités et leurs partenaires publics et privés ont besoin de localiser les secteurs à renaturer en priorité et de préconisations pour les accompagner techniquement. Ce guide revient sur les différentes approches de la renaturation et propose une méthode pour identifier les zones urbaines à fort potentiel de renaturation pour la biodiversité, l'adaptation au changement climatique et la santé des populations. Enfin, au travers de multiples retours d'expérience, il suggère des recommandations pour mettre en œuvre son projet dans les meilleures conditions.



LA RENATURATION : DE QUOI PARLE-T-ON ?

Le terme de renaturation englobe de multiples approches et visions dont les termes sont en perpétuelle évolution au sein de la communauté scientifique (Grandin et Barra, 2020). Ce mot « valise », dont il serait vain de donner une définition unique et consensuelle, renvoie à l'idée générale d'un « retour à l'état naturel ou semi-naturel des écosystèmes qui ont été dégradés, endommagés ou détruits par les activités humaines » (Aronson, 2004). Historiquement associé à la remise en état des espaces naturels dégradés, ce concept gagne du terrain en milieu urbain depuis l'introduction du zéro artificialisation nette (ZAN). Il reste sujet à différentes interprétations en fonction des acteurs, qu'ils ou elles soient écologues, aménageurs, urbanistes ou paysagistes. Aussi, il paraît essentiel de revenir sur l'origine de cette notion et sur les différentes approches qu'elle recouvre.

LES DIFFÉRENTES APPROCHES ET SIGNIFICATIONS DE LA RENATURATION

LA RÉGÉNÉRATION SPONTANÉE

Historiquement, on associe la renaturation aux processus par lesquels la nature reprend ses droits dans un milieu artificialisé ou ayant subi des perturbations anthropiques. Le simple arrêt des perturbations humaines permet au milieu initial de se reconstituer de manière passive ou spontanée. Ce processus a été décrit comme conduisant à un état de féralité (Génot et Schnitzler, 2012), autrement dit à des écosystèmes revenus à l'état sauvage après abandon de l'exploitation par l'être humain. La féralité s'approche de l'idée de réensauvagement (ou *rewilding* en anglais), qui correspond à la recolonisation d'un milieu par des espèces sauvages (aidée ou non par une intervention humaine), à la suite de l'abandon ou de l'arrêt des activités anthropiques.

Ce type de renaturation, laissant la nature s'exprimer librement, s'appuie sur les éléments déjà présents sur le site ou à proximité (Grubb et Hopkins, 1986 ; Powers *et al*, 2009) et n'induit donc aucun coût financier ou environnemental. En outre, les écosystèmes renaturés fonctionnent comme des laboratoires à ciel ouvert,

LE RÉENSAUVAGEMENT : UN CONCEPT QUI GAGNE DU TERRAIN

En France, l'idée d'un réensauvagement est notamment défendue et mise en œuvre par l'Association pour la protection des animaux sauvages (ASPAS) dans la Réserve de Vie Sauvage de 490 hectares au sein du Parc naturel du Vercors [2], ou encore récemment par l'association Francis Hallé pour la forêt primaire, impliquée dans un projet de réensauvagement de 70 000 hectares dans le massif des Vosges [3].

Fondée en 2021, la Coordination Libre Evolution, qui réunit 4 associations de protection de la nature, plaide pour l'atteinte de 10 % d'espaces protégés en libre évolution en France métropolitaine d'ici 2030 [4]. Spécialistes du réensauvagement des territoires, les naturalistes Gilbert Cochet et Béatrice Kremer-Cochet ont publié *L'Europe réensauvagée. Vers un nouveau monde* (Actes Sud, 2020), un essai qui démontre, expériences à l'appui, l'intérêt de ces espaces sauvages pour restaurer la biodiversité. Dans un article portant sur les limites écologiques à l'échelle de la planète (*planetary boundaries*), des chercheurs préconisent de restaurer 23,9 millions de km², soit 18,1% de la biosphère, pour préserver l'intégrité de la biodiversité et les fonctionnalités qui lui sont associées (DeClerck *et al*, 2021).

Enfin, selon Edward O. Wilson, scientifique mondialement reconnu pour ses travaux sur la biodiversité, il faudrait laisser la moitié de la planète à l'état sauvage pour enrayer l'extinction de masse du vivant. En France, les espaces faisant l'objet d'une « protection forte », soit l'ensemble des surfaces classées en aires protégées réglementaires (réserves naturelles, cœurs de parcs nationaux, réserves biologiques, arrêtés de protection) ne représentaient que 1,8% du territoire national en 2019 [5]. Ce chiffre tombe à 0,59% pour l'Île-de-France [6].

s'adaptant avec le temps aux changements d'usage et climatiques. Ce type de renaturation est particulièrement indiqué lorsque le projet peut s'ancrer dans le temps long, et que la connectivité écologique est suffisante pour que les espèces animales et végétales soient en mesure de recoloniser le site (Prach *et al.*, 2015; Chazdon et Guariguata, 2016). Dans certains cas, la renaturation passive peut même être utilisée sur des espaces fortement perturbés, tels que des carrières ou mines à ciel ouvert abandonnées, bien que le processus soit plus lent (Prach et Hobbs, 2008). Malheureusement, la renaturation passive n'est pas encore perçue à sa juste valeur et les enjeux qui s'y rattachent sont parfois minimisés. Il n'est pas rare que ces espaces renaturés soient considérés comme dégradés et ciblés lors de projets d'aménagement.

Les friches : refuges de biodiversité

En ville, l'idée d'une colonisation spontanée est encore rare car elle rime souvent avec abandon et délaissement des milieux. Ce type de trajectoire s'observe pourtant déjà dans les friches urbaines, bien que ces dernières soient parfois perçues négativement. Plusieurs scientifiques ont montré que les sites abandonnés à la végétation spontanée ont un réel potentiel pour contribuer à la conservation de la biodiversité en milieu urbain (Bonthoux *et al.*, 2014). En région parisienne, la diversité des plantes, des oiseaux et des papillons dans les friches est plus élevée que dans les autres espaces verts (Baude *et al.*, 2011). Ces espaces permettent par ailleurs d'accueillir des espèces à l'écologie spécifique de ces habitats (buissons, sols herbacés couverts), comme le Bouillon blanc, le Chardon crépu ou la Fauvette grisette. Enfin, ces milieux en libre évolution participent aussi aux continuités écologiques des territoires en permettant le déplacement des espèces dans la matrice urbaine (Muratet *et al.*, 2019).

Cette dynamique de colonisation spontanée a particulièrement été étudiée en Allemagne sur les forêts urbaines spontanées à Berlin (Kowarik, 2005). Certains parcs emblématiques de la ville sont issus de cette approche, à l'image du Natur-Park Schöneberger Südgelände, fruit de la renaturation d'un ancien site ferroviaire laissé à l'abandon. Cet espace de 18 hectares est resté inaccessible pendant près de cinquante ans, avant l'ouverture au public en 2000. Sa conception a préservé les espèces existantes, sans intégrer de nouvelles plantations. L'entretien du parc est minimal et se limite aux cheminements. Dans les années 2010, un inventaire a relevé 366 espèces de fougères et de plantes à fleurs, 49 espèces de champignons, 49 espèces d'oiseaux, 14 espèces d'orthoptères, 57 espèces d'araignées et 95 espèces d'abeilles sauvages, dont plus d'une soixantaine est menacée [10].

LES FRICHES : UNE SIMPLE RÉSERVE FONCIÈRE ?

Récemment, plusieurs dispositifs de recensement ou d'évaluation des friches ont vu le jour, à l'instar de l'outil Cartofriches (Cere-ma) [7] ou du guide Bénéfriches (ADEME) [8]. En Île-de-France, une étude de L'Institut Paris Region a permis de recenser plus de 2 700 friches, soit près de 4 200 ha, sur l'ensemble du territoire. Ces travaux visent à aider les collectivités à imaginer plusieurs usages pour les friches, en particulier leur contribution au renouvellement urbain.

Or, bien que certaines friches constituent un gisement opportun pour la densification, comme celles fortement artificialisées, d'autres sont devenues des espaces de nature à part entière abritant une biodiversité riche. D'autres enfin sont les derniers espoirs de recréer des espaces de nature dans des secteurs fortement urbanisés.

Une meilleure connaissance des friches, notamment au travers d'inventaires écologiques préalables, s'avère donc indispensable en amont de toute intervention ou planification. Encore trop facilement considérées comme des « espaces en attente d'être aménagés », la reconnaissance de leur statut d'espace de nature est à envisager dans le cadre d'une politique ambitieuse de renaturation des territoires. De même, tout projet de requalification des friches, aussi « vert » soit-il (transformation en parcs, jardins, agriculture urbaine, etc.), peut conduire *in fine* à la destruction du patrimoine naturel présent et à une diminution des potentialités écologiques de ces espaces, dont la libre évolution et l'absence de gestion garantissent une richesse biologique importante.



Friche située sur la commune des Mureaux (78)
©École d'Urbanisme de Paris, Atelier diagnostic urbain
(Master 1, 2020-2021) [9]



En 2000, le Natur-Park Schöneberger Südgelände à Berlin devient un parc ouvert au public après une cinquantaine d'années de libre évolution. ©Ville de Berlin

L'ÉCOLOGIE DE LA RESTAURATION ET L'INGÉNIERIE ÉCOLOGIQUE

Dans la plupart des cas, la renaturation implique cependant une intervention humaine, même minimale. On parle alors d'écologie de la restauration. Cette discipline s'est formalisée au début des années 1980 avec la création de la Society for Ecological Restoration aux États-Unis. Ce corpus de scientifiques définit la restauration écologique comme « le processus visant à assister la régénération des écosystèmes qui ont été dégradés, endommagés ou détruits » en vue de « rétablir l'écosystème antérieur par rapport à sa composition spécifique, son fonctionnement écologique, la capacité de l'environnement physique à supporter les organismes vivants et sa connectivité avec le paysage ambiant » (Griffith *et al.*, 2013). Ces dernières années, la restauration écologique s'est particulièrement développée dans les milieux naturels, notamment aquatiques (rivières et zones humides), mais aussi pour rétablir des sites et sols pollués par une activité industrielle passée. Les opérations de restauration écologique peuvent prendre des formes très variées et impliquent un degré d'intervention humaine plus ou moins important. Si certaines interventions nécessitent le recours à

des techniques lourdes (engins, matériel de chantier), d'autres font appel à des techniques inspirées du vivant, regroupées sous le terme d'ingénierie écologique (ou génie écologique), qui se définit au sens large comme « la gestion de milieux et la conception d'aménagements durables, adaptatifs, multifonctionnels, inspirés de, ou basés sur, les mécanismes qui gouvernent les systèmes écologiques (auto-organisation, diversité, structures hétérogènes, résilience) » (Abbadie *et al.*, 2015). Elle trouve son application dans la réhabilitation d'écosystèmes dégradés, la restauration de communautés fonctionnelles, la réintroduction d'espèces, le traitement des pollutions par des organismes vivants, le rétablissement ou le renforcement d'une fonction écologique, la conception de matériaux nouveaux qui minimisent la destruction de l'environnement.

L'ingénierie écologique peut faire appel à des espèces dites « ingénieures de l'écosystème » qui, par leur seule présence et activité, modifient significativement leur environnement (bactéries et champignons, vers de terre, plantes phytoremédiatrices, fourmis moissonneuses, castors, herbivores rustiques, etc.). À l'inverse des travaux de génie civil, l'ingénierie écologique a une faible empreinte écologique et s'inspire du contexte dans lequel elle se place, offrant les plus grandes chances de succès.



La restauration écologique s'est particulièrement développée dans le cadre de la réhabilitation des milieux aquatiques (rivières et zones humides), ici la réouverture de la Bièvre sur la commune de Bièvres (91). ©Hervé Cardinal/SIAVB

LES ACTEURS DU GÉNIE ET INGÉNIERIE ÉCOLOGIQUE

En France, l'ingénierie écologique s'est professionnalisée autour de plusieurs structures. Historiquement, l'association GAIÉ (Groupe d'Application de l'Ingénierie des Écosystèmes), essentiellement constituée de chercheurs et chercheuses en écologie, a contribué à propager les connaissances dans ce domaine et organisé de nombreux colloques interdisciplinaires entre 2011 et 2019 dont les actes sont disponibles à l'adresse suivante : <http://groupeacteursingenierieecologique.e-monsite.com/>

Fondée en 2008, l'Union professionnelle du génie écologique (UPGE) fédère les entreprises qui œuvrent dans le domaine du génie écologique, anime le réseau et contribue à la visibilité de la filière : <http://www.genie-ecologique.fr/>

Fondée en 2014, l'A-IGÉco est l'association fédérative des Acteurs de l'Ingénierie et du Génie Écologiques. Elle promeut le développement d'une ingénierie écologique et d'un génie écologique de

qualité technique et scientifique : <http://a-igeco.fr/>
Établie depuis 1979, l'Association Française Interprofessionnelle des Ecologues (AFIE) est constituée de professionnels travaillant dans le secteur de l'écologie appliquée. L'AFIE s'efforce de faire reconnaître l'importance du métier d'écologue à travers la prise en compte des connaissances scientifiques en écologie dans toutes les sphères actives de la société : <https://afie-asso.fr/>

Enfin, le Centre de ressources « Génie écologique » animé par l'Office français pour la biodiversité, répertorie les acteurs et actrices de la filière, propose des références bibliographiques et des retours d'expérience sur le génie écologique. Un annuaire recensant les entreprises et bureaux d'études qui mettent en œuvre ou suivent des projets de génie écologique est disponible sur <http://www.genieecologique.fr/>

Ces structures fédèrent de nombreux écologues et spécialistes de la renaturation qui peuvent utilement accompagner les collectivités dans leurs projets.

L'ÉTAT DE RÉFÉRENCE EN ÉCOLOGIE DE LA RESTAURATION

L'écologie de la restauration utilise la notion d'état de référence, autrement dit la recherche de l'état d'un site avant sa dégradation. La recherche d'un état initial est particulièrement utilisée dans les projets de restauration d'écosystèmes naturels ou semi-naturels, mais elle est particulièrement difficile voire impossible à retracer en milieu urbain. Aussi, la renaturation en ville renvoie davantage à des opérations de réhabilitation, de réaffectation ou encore de régénération naturelle, sans forcément viser un retour à un état originel dont l'existence même

prête à débat dans la communauté scientifique. Néanmoins, il est toujours intéressant d'effectuer des recherches historiques en amont d'un projet de restauration et d'essayer de retrouver certaines fonctions de l'écosystème visé (et non la récupération de son intégrité biotique), comme c'est le cas pour les opérations de renaturation d'anciennes zones humides, cours d'eau canalisés ou enfouis sous le bitume, de forêts relictuelles, d'anciennes prairies, ou encore de berges dégradées. En ce qui concerne la réaffectation et la régénération naturelle, aucune référence historique n'est requise, la renaturation conduit à un nouvel écosystème comprenant des fonctions et structure différentes.

Néanmoins, les opérations de restauration combinent souvent des travaux de génie civil et d'ingénierie écologique, étant donné qu'elles peuvent s'appuyer sur une éventuelle dépollution, ou encore nécessiter une destruction d'éléments artificiels (bâtiments, infrastructures bétonnées, chenaux et endigue-

ments, barrages, etc.). Un des objectifs de l'ingénierie écologique est également de réduire l'utilisation de ressources et d'intrants non renouvelables au profit de l'utilisation de ressources naturelles renouvelables à faible impact écologique.

LA RENATURATION EN VILLE

AU-DELÀ DU VERDISSEMENT

En milieu urbain, la renaturation est encore trop souvent appréhendée comme une démarche de paysagisme (Pech, 2015), avec comme objectif principal la création d'un décor végétalisé destiné à embellir la ville. Ce verdissement s'est développé sous l'impulsion des courants du « paysage à la française », dont l'héritage a véhiculé une approche maîtrisée et ornementale de la nature principalement centrée sur le végétal, sans prise en compte des autres cortèges d'espèces et de la fonctionnalité écologique.

Quelle différence entre verdissement et renaturation ?

À l'inverse de la renaturation, le verdissement s'élabore généralement sans lien avec le contexte climatique ou géographique. Il mobilise des espèces inadaptées issues de l'horticulture et nécessite de nombreux intrants (terre végétale, engrais, énergie, irrigation) qui rendent les espaces nouvellement végétalisés peu autonomes et dépendants d'une gestion intensive. Les opérations de verdissement contribuent bien souvent à faire table rase en éliminant la végétation préexistante et en décapant les sols pour importer de la « terre végétale » prélevée en milieu agricole. Le verdissement est davantage réfléchi à l'échelle du site, contrairement à la renaturation qui prend en compte de multiples échelles, suivant les principes

de l'écologie du paysage. S'appuyant sur des effets de mode ou des tendances, il contribue bien souvent à uniformiser les espaces verts urbains. Les archétypes de ce procédé sont par exemple le jardin à la française, le gazon, les plantations monospécifiques, les murs végétalisés modulaires, les bacs hors-sols, les prairies fleuries non locales.

Un concept qui ne s'arrête pas à la végétation

Les effets de mode touchent également la faune. En zones urbaines denses, la multiplication des ruches en ville en est un bon exemple. Elle s'apparente à un mode d'élevage et peut entraîner une surdensité de l'Abeille domestique (*Apis mellifera*), au détriment des populations d'insectes pollinisateurs sauvages, par concurrence pour l'accès à la ressource florale (Ropars *et al.*, 2019). « Sauver les abeilles » nécessite avant tout de protéger ou restaurer une diversité d'habitats favorables aux pollinisateurs (prairies urbaines, haies, milieux terricoles, etc.).

D'une manière générale, les dispositifs artificiels ou abris à faune, largement plébiscités, peuvent potentiellement devenir des pièges écologiques, notamment chez certains oiseaux (Schwartz, 2020). De même, les hôtels à insectes peuvent s'avérer sans rapport avec les besoins des espèces ciblées et sans réflexion sur la connectivité. Ce faisant, si ces opéra-



Favoriser les abeilles sauvages en ville, dont 70 % nichent au sol, nécessite de préserver ou réhabiliter leur habitat, plutôt que de chercher des abris de substitution. En haut, une Halicte dans son nid. ©Gilles Lecuir/ARB ÎdF

tions ont une fonction pédagogique indéniable, elles ne constituent pas pour autant des aménagements efficaces du point de vue de la reconquête de la biodiversité.

À l'inverse, la renaturation par l'ingénierie écologique s'appuie sur la connaissance du vivant et prend en compte l'ensemble des niveaux de biodiversité (génétique, spécifique et écologique). Son but premier n'est pas l'embellissement mais la recherche d'un fonctionnement écologique au plus proche de celui des systèmes naturels, en ciblant les cortèges floristiques et faunistiques adaptés, en tenant compte des exigences des espèces, en utilisant le moins de ressources possible et en minimisant les interventions de gestion future.

Le *blandscaping* ou la standardisation de la nature en ville

L'intérêt croissant pour la nature en ville s'accompagne ainsi d'une forme de standardisation des solutions proposées : multiplication des ruchers ou hôtels à insectes (Fortel *et al.*, 2016), systèmes de végétalisation du bâti « prêts à l'emploi », micro-forêts urbaines au marketing attractif. Ce phénomène que des chercheurs et chercheuses ont décrit sous le terme de *blandscaping* (Connop, 2018) correspond à ces aménagements qui utilisent les mêmes méthodes de conception, les mêmes espèces, et sont souvent « copiés-collés » dans différentes régions urbaines du monde. Ces solutions sont généralement développées de manière industrialisée pour répondre au besoin de leur commercialisation, sous forme de produits standardisés ou prêts à l'emploi.

Or, le vivant répond avant tout à des logiques locales. Si la constitution de filières est nécessaire (semences, plants, matériaux), les démarches en faveur de la nature en ville et les projets de renaturation ne peuvent être pensés qu'au cas par cas, en tenant compte des



Certains systèmes de végétalisation, à l'instar de cette toiture végétalisée en caissettes pré-cultivées, sont souvent conçus en kit et « copiés-collés » d'une ville à l'autre. ©Marc Barra/ARB ÎdF

LES FORÊTS « MIYAWAKI » : RENATURATION OU BLANDSCAPING?

En quelques années, les projets de micro-forêts urbaines dites « Miyawaki » se sont multipliés un peu partout en Europe. La méthode consiste à réaliser des plantations denses de diverses essences d'arbres (3 à 7 au m²), sur une surface généralement inférieure à 1 hectare. Elles s'inspirent à l'origine des dynamiques spontanées observées dans les forêts. S'appuyant sur un discours bien rodé qui relève davantage du slogan électoral que de la science, ces nouvelles forêts « pousseraient 10 fois vite », « accueilleraient 20 fois plus de biodiversité » et seraient « 30 fois plus denses » que les forêts naturelles [11]. Elles suscitent un véritable engouement auprès des municipalités ainsi que des citoyens et citoyennes.

Proposées comme une solution miracle pour la biodiversité ou le rafraîchissement urbain, elles font néanmoins l'objet de critiques de la part de la communauté scientifique. Concernant la densité de plantation « 30 fois plus forte », l'une des rares études effectuées en Europe sur le sujet fait état d'une mortalité allant de 61 à 84 % (Schirone *et al*, 2011). Par ailleurs, au-delà des ressources que cette méthode exige (arrosage, arrachage des plants non désirés), la sélection des plants ne se

fait qu'en fonction de leur compétitivité, et non en fonction de leur résilience, notamment face aux épisodes de sécheresse.

Si ce type d'opération peut avoir sa place dans la panoplie des actions liées à la nature en ville, il ne peut être standardisé. L'opération doit s'ancrer dans le contexte local, et peut de ce fait prendre des formes variées : haies champêtres, bosquets, extension d'une forêt relictuelle, ou simplement laisser se développer des boisements urbains sauvages, qui ne nécessitent aucune intervention humaine et ne coûtent rien (Génot, 2021). Il est nécessaire de garder à l'esprit que la biodiversité ne se mesure pas au nombre d'arbres plantés à toute vitesse. Une forêt mature nécessite un sol forestier ancien, se développe sur le temps long (plus de 200 ans) et accueille le maximum de sa biodiversité (lichens, champignons, insectes) aux stades âgés et sénescents (Génot, 2020). Enfin, l'état initial du sol revêt une dimension importante : un sol en mauvais état ou pollué peut contraindre le développement des végétaux. Dans le cas où la renaturation est précédée d'une désimperméabilisation, on ne saurait oublier l'importance de la succession végétale, en particulier de l'implantation des plantes pionnières et leur rôle dans la préparation et la restauration des sols dégradés (voir p. 88).

spécificités locales. Elles peuvent difficilement faire l'objet d'un développement industriel qui conduit inévitablement à l'uniformisation. L'application des principes de l'ingénierie écologique permettrait d'éviter cet écueil en proposant des solutions uniques, dont la conception est centrée sur les exigences des espèces, leur mode de vie, leurs besoins intrinsèques (surface d'habitat, connectivité, complexité des réseaux trophiques) et en utilisant des ressources locales (terres de récupération, semences sauvages prélevées à proximité, espèces déjà présentes sur le site d'origine, etc.). En France, la marque Végétal local®, qui permet de proposer des espèces floristiques sauvages adaptées à différentes régions, a ouvert la voie à des projets inscrits dans cette logique.

Du verdissement à l'ingénierie écologique

De nombreux paysagistes, à l'image de Gilles Clément, à l'origine du concept de « jardin en mouvement » et de « tiers paysage », ont ouvert une nouvelle ère rapprochant le monde du paysage de celui de l'écologie scientifique. Ces derniers s'appuient notamment sur l'écologie du paysage qui permet de prendre en considération l'échelle du paysage dans l'organisation spatiale des écosystèmes, en considérant leur composition et leur configuration comme des éléments clés influençant les processus écologiques (Bourgeois, 2015 ; Burel et Baudry, 1999). L'écologie du

paysage utilise différentes méthodes et modèles pour étudier les formes passées, présentes et futures du paysage, et a notamment contribué aux savoirs et à la mise en œuvre de la connectivité écologique en ville. De plus en plus de projets de restauration écologique sont aujourd'hui raisonnés à l'échelle du paysage et non des habitats seuls, en tenant compte de l'impératif pour les espèces de se déplacer, se nourrir et se reproduire afin de maintenir un brassage génétique essentiel entre les populations. Ces démarches se traduisent par exemple par la restauration des trames vertes et bleues via la reconnexion de milieux isolés dans la matrice paysagère. Dans la pratique, la frontière entre paysagisme et écologie urbaine s'estompe progressivement : le choix des végétaux n'est plus seulement guidé par l'esthétisme mais privilégie les espèces locales et tend à prendre en compte les interactions avec la faune, avec le sol et les conditions environnantes. À l'inverse, les écologues, parfois ancrés dans la théorie, s'appuient de plus en plus sur le savoir-faire et l'expertise du paysagiste¹.

1. Le parcours Master 2 « Approche écologique du paysage », fruit d'un partenariat entre l'Université Paris-Saclay et l'École Du Breuil, vise à former de futurs écologues-paysagistes capables de concevoir et gérer des projets de paysage urbains avec la maîtrise des outils de l'ingénierie écologique et de l'ingénierie urbaine : <https://www.ecoledubreuil.fr/formations/master2-ap-proche-ecologique-du-paysage-niveau-7/>

L'INGÉNIERIE ÉCOLOGIQUE EN MILIEU URBAIN

Ces dernières années, l'ingénierie écologique s'est largement développée en ville, en particulier sous l'appellation de génie végétal qui consiste en un ensemble de techniques fondées sur l'utilisation du végétal et ses fonctions structurelles (stabilité, ancrage) pour lutter contre l'érosion des sols ou l'instabilité des talus, réhabiliter des berges, rouvrir des rivières ou restaurer des zones humides en milieu urbain. Dans ce type d'opération, la végétation n'intervient pas uniquement comme supplément (verdissement), les plantes sont perçues comme des matériaux de construction vivants à part entière, utilisables seuls ou en association avec des matériaux inertes (Schiechtel, 1992).

Au-delà du végétal, l'utilisation du vivant peut prendre des formes variées en ville et servir à de multiples applications pour restaurer les fonctionnalités écologiques ou renaturer entièrement des

milieux dégradés : épuration des eaux par les plantes (phytoépuration), capture des polluants urbains par la végétation (bioaccumulation), gestion des inondations, diminution des îlots de chaleur urbains, etc. Dans tous les cas, la biodiversité est l'élément central de ces opérations : elle est à la fois un moyen et une finalité de la renaturation. Les principes du génie écologique peuvent ainsi s'appliquer à une multitude d'aménagements urbains, qu'il s'agisse de renaturation, de gestion ou de création de nouveaux écosystèmes. De nouvelles techniques combinant ingénierie écologique et génie civil ont également vu le jour, notamment pour la restauration des sols, et utilisent des matériaux issus de déconstruction (technosols). Bien qu'un minimum d'intervention humaine soit requis, ingénierie écologique rime souvent avec renaturation active. Les principes et étapes de la mise en œuvre de l'ingénierie écologique dans le cadre d'un projet de renaturation sont détaillés en partie 3 de cet ouvrage.



Techniques de génie écologique utilisant le végétal pour la restauration de berges. ©Gilles Lecuir/ARB ÎdF

Des approches à combiner

Les différentes approches de la renaturation en milieu naturel ou en milieu urbain ne s'opposent pas et peuvent au contraire se compléter au sein d'un territoire ou d'un même site. Qu'il s'agisse de renaturation passive ou active, ces deux approches convergent vers les processus naturels de rétablissement de l'écosystème, bien qu'elles diffèrent par le degré d'intervention humaine. Dans tous les cas, elles nécessitent une vigilance continue jusqu'à ce que le rétablissement désiré soit atteint.

Quant aux objectifs poursuivis, ils sont variables

d'un projet à l'autre : on peut chercher à rétablir la biodiversité sous toutes ses composantes, des gènes aux espèces, jusqu'aux habitats et paysages. On peut s'intéresser à la fonctionnalité des écosystèmes, à savoir les fonctions qui sont nécessaires pour que les écosystèmes fonctionnent, mais également aux fonctions qui peuvent apporter des bénéfices à l'être humain, aussi appelés services écosystémiques (Millenium ecosystem assessment, 2005). On peut aussi essayer de redonner une part de sauvage à des écosystèmes en s'intéressant à leur naturalité.

DÉSIMPÉRMÉABILISATION N'EST PAS RENATURATION

La renaturation est parfois confondue avec la désimperméabilisation, qui consiste uniquement à redonner une perméabilité à la couche superficielle du sol, souvent grâce au recours à des revêtements poreux et drainants. Elle est un préalable indispensable mais insuffisant à la restauration des fonctions écologiques du sol. L'usage de revêtements perméables s'est particulièrement développé ces dernières années, parfois au détriment de la pleine terre (cours d'écoles, pieds d'arbres). Leur usage doit se limiter à la voirie ou aux zones de stationnement dont l'usage est incompatible avec une végétalisation pérenne.

Les systèmes de gestion alternative des eaux pluviales ont encouragé les villes à désimperméabiliser et végétaliser certains sites de manière partielle, le plus souvent à travers des aménagements paysagers (nœuds végétalisés, jardins inondables). Si plusieurs études confirment l'intérêt de ces dispositifs pour la biodiversité, ils peuvent toutefois être améliorés dans leur conception comme leur entretien pour favoriser le vivant et le retour à la pleine terre (ARB IdF, 2020), via d'éventuelles actions de restructuration des sols (décompactage, création des horizons, amendements, etc.). Les aménagements hors-sols (toitures végétalisées, potagers urbains en bacs, espaces végétalisés sur dalle, murs végétalisés modulaires, etc.), qui peuvent participer à une meilleure gestion des eaux pluviales, ne rentrent pas dans la catégorie des espaces renaturés.



Les revêtements drainants, bitumes perméables, pavés non jointés, dont l'utilité est légitime sur certaines surfaces pour améliorer la gestion des eaux pluviales, ne correspondent pas à de la renaturation. ©Gilles Lecuir/ARB IdF (en haut), ©Commune de Narbonne (en bas)

	DÉSIMPÉRMÉABILISATION	VERDISSEMENT	RENATURATION
Objectifs, finalités	Restaurer le cycle de l'eau en rendant les sols perméables, limiter les problématiques de ruissellement ou d'inondation.	Embellir le milieu urbain par le végétal, orner parfois avec un service écosystémique complémentaire (ex. ombrage).	Restaurer les fonctionnalités écologiques, créer des habitats favorables pour le vivant, développer des solutions fondées sur la nature.
Disciplines et compétences mobilisées	Hydrologie, ingénierie civile.	Paysagisme, horticulture.	Écologie urbaine, écologie du paysage, ingénierie et génie écologique.
Échelles prises en compte	Site, zone de ruissellement ou bassin versant.	Site ou paysage environnant.	Emboîtement des échelles au regard du paysage, du bassin versant et des réseaux écologiques.
Mesures de suivi	Évaluation de la qualité et la dynamique de l'eau.	Pas systématique.	Évaluation de la biodiversité avant/après selon des protocoles standardisés, évaluation des cobénéfices (adaptation au changement climatique, santé), suivi des modes de gestion.
Prise en compte des 3 niveaux de biodiversité	Non comprise dans les objectifs, mais de plus en plus fréquente dans les aménagements de gestion des eaux pluviales.	Pas systématique, souvent centrée sur le végétal.	Prise en compte des flux de gènes, espèces et interactions écologiques.
Exemples d'applications	Systèmes alternatifs de gestion des eaux pluviales, revêtements perméables.	Nœuds paysagères, massifs horticoles, bacs hors-sols plantés, arbres d'alignement.	Mares, prairies, haies, cours d'eau, îlots de sénescence, création d'habitats centrée sur les besoins des espèces.
Adaptation au contexte local	Oui, en rapport avec le cycle de l'eau.	Pas nécessairement (choix d'espèces inadaptées, absence de diagnostic écologique préalable, utilisation d'intrants).	Diagnostic écologique préalable, cohérence dans le choix des espèces, dans la trajectoire écologique souhaitée, étude des sols.
Gestion	Extensive à intensive.	Extensive à intensive.	Extensive à libre évolution.

TABEAU 1. Comparaison entre désimpermeabilisation, verdissement et renaturation.

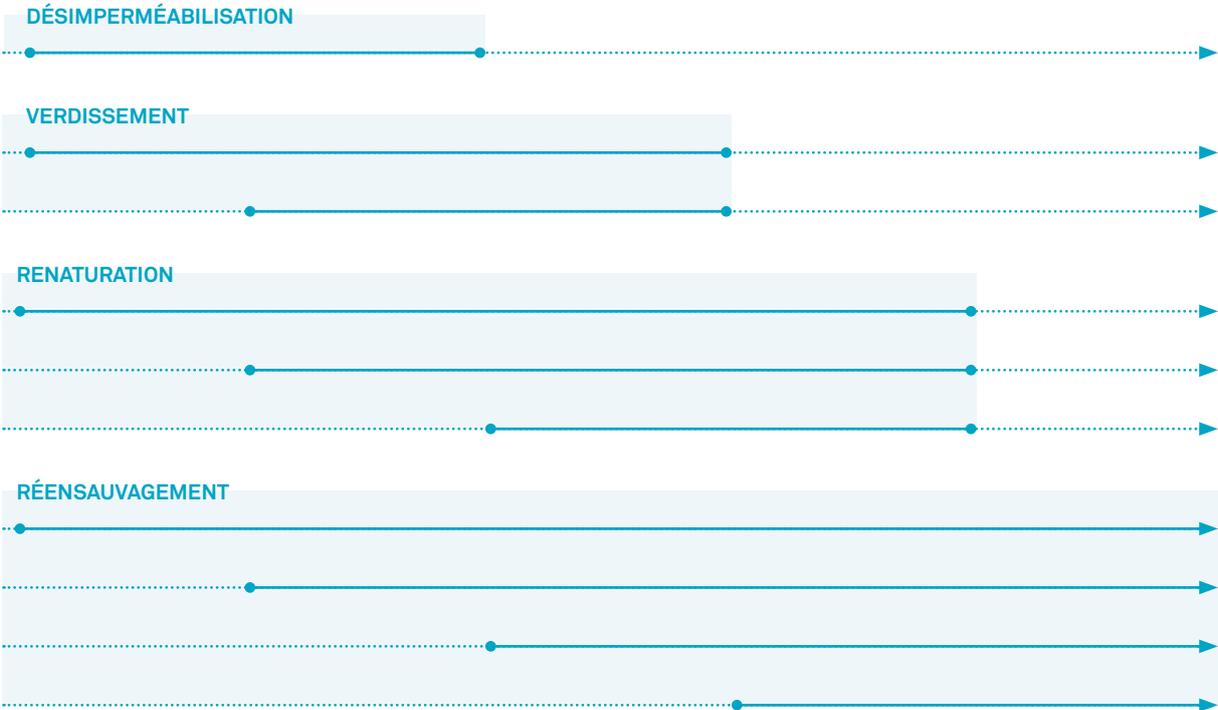
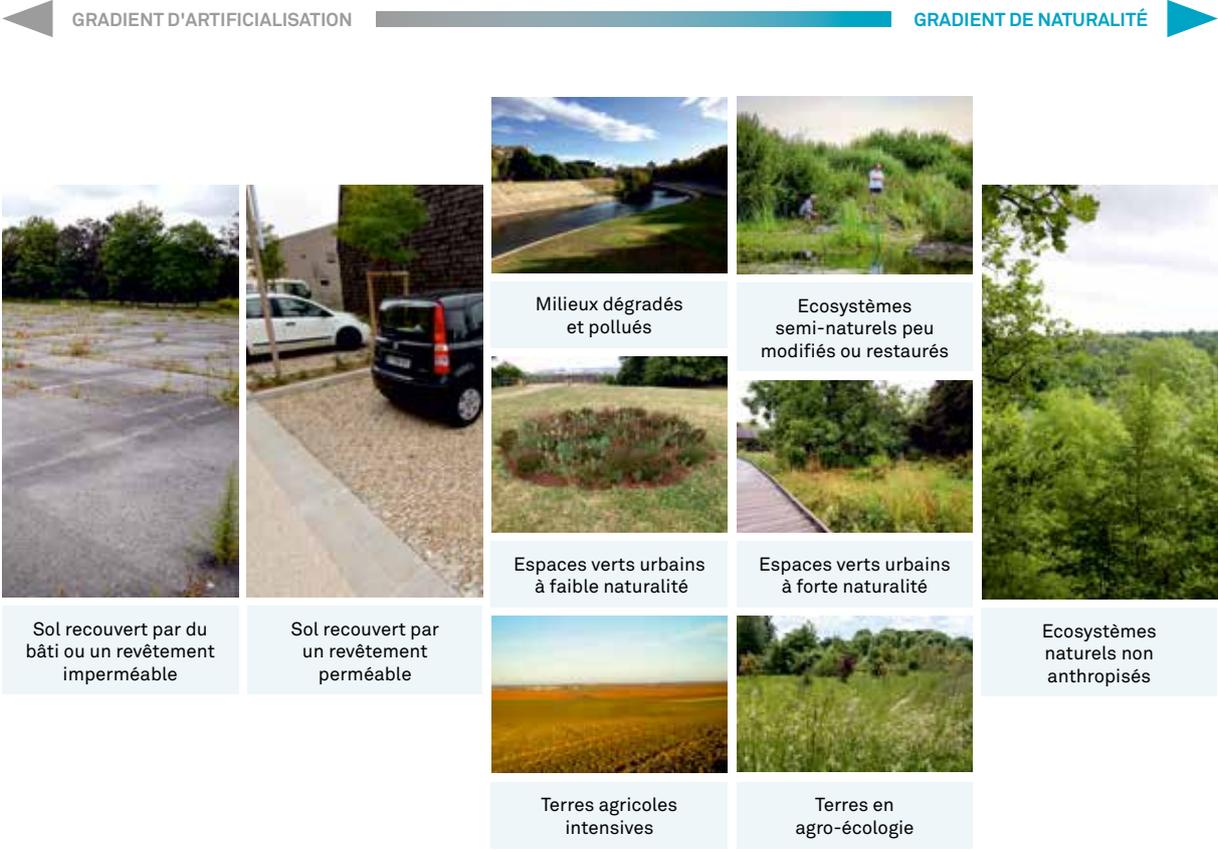


FIGURE 1. Classification des espaces en fonction d'un gradient d'artificialisation - naturalité et de leur trajectoire en fonction des opérations de désimperméabilisation, verdissement, renaturation et réensauvagement.

LES SOLS URBAINS AU CŒUR DE L'ENJEU DE RENATURATION EN VILLE

Alors qu'ils abritent plus du quart de la biodiversité terrestre mondiale (IPBES, 2019), les sols restent largement méconnus et ont longtemps été négligés, considérés comme un simple support physique. Ils sont pourtant une composante à part entière de la biodiversité, l'habitat de nombreux organismes vivants (microfaune, mésofaune, macrofaune et mégafaune), le support de vie des végétaux et le siège de processus écologiques fondamentaux comme les cycles biogéochimiques ou le cycle de l'eau. La renaturation ne peut se faire sans prendre en compte l'état des sols et leur fonctionnement écologique.

Les sols urbains sont fortement remaniés et dégradés (pollution, tassement, déstructuration des horizons) voire imperméabilisés quand ils sont recouverts par certains types de matériaux (routes, parkings, etc.) ou par un bâtiment. L'imperméabilisation des sols entrave l'infiltration de l'eau ainsi que leur fonction de support pour les végétaux. Les sols urbains sont par ailleurs généralement pollués aux traces métalliques ou aux hydrocarbures. En Île-de-France, les taux de cadmium, plomb et cuivre sont 8 fois supérieurs dans

les sols des boisements urbains que dans ceux des boisements ruraux (Foti, 2017). En ville, les sols sont également fragmentés par les infrastructures qui occasionnent des ruptures de continuité et un isolement partiel ou total des réservoirs de biodiversité.

Les opérations de renaturation en milieu urbain doivent s'attacher à restaurer les fonctions du sol plutôt qu'à les remplacer. Aujourd'hui, la plupart des projets de végétalisation en milieu urbain ont recours à de la terre « végétale » issue du décapage de terres agricoles. Ce type de pratiques constitue un problème majeur qui revient à délocaliser les impacts dans d'autres milieux. Pour mettre fin à ce « trafic de terres », le réemploi de sous-produits urbains prélevés in situ est de plus en plus privilégié (terres de chantier, bétons/briques concassés amendés à l'aide de compost de déchets verts ou organiques). Ces démarches d'économie circulaire peuvent se combiner à des techniques de génie écologique. La reconstitution de sols fertiles ou technosols (voir p.91) a fait l'objet de plusieurs programmes de recherche récents et semble une voie d'avenir pour la renaturation en milieu urbain.



FIGURE 2. Profils de sols urbains végétalisés et artificialisés avec une urbanisation croissante du périurbain vers l'hypercentre. ©Christophe Ducommun, Jean-Pierre Rossignol et Laure Vidal-Beaudet (Beaudet et Rossignol, 2018)

LA PLEINE TERRE : UNE NOTION DIFFICILE À DÉFINIR, MAIS ESSENTIELLE POUR LA RENATURATION

Un nombre croissant de collectivités cherchent à mieux prendre en compte les sols dans les documents d'urbanisme et utilisent la notion de « pleine terre », qui ne fait pourtant pas l'objet d'une définition partagée ni d'un consensus scientifique. Une étude de L'Institut Paris Region (Cornet et Cocquière, 2021) a passé en revue 25 plans locaux d'urbanisme (PLU) et souligne l'absence de définition dans 20 % des documents étudiés. Dans les autres cas, les collectivités font appel à différents critères pour définir la pleine terre, comme la « capacité d'infiltration des sols, l'absence de construction en surface et en sous-sol, ou encore la capacité à être support de végétation ». Ces tentatives reflètent la difficulté d'établir une classification binaire compte tenu de la très grande variabilité de sols urbains.

Au regard de cette diversité, il semble plus opportun de parler d'un gradient de pleine terre, en s'appuyant sur plusieurs critères, notamment : le revêtement en surface, la continuité verticale et la profondeur, la continuité horizontale des sols (ou trame brune), la qualité physico-chimique et biologique des sols, et la perméabilité.

Le revêtement en surface

Une première distinction évidente s'opère entre les sols imperméabilisés (ou scellés) et ceux qui sont libres de tout revêtement. Néanmoins, ce critère concerne uniquement la surface du sol et n'est pas suffisant pour qualifier la pleine terre.



© Marc Barra

La continuité verticale et la profondeur

Pour les pédologues (spécialistes de l'écologie des sols), il est tentant d'assimiler la pleine terre à des sols à caractère naturel dont la continuité entre les horizons² et les sous-couches géologiques est assurée. Cette situation est toutefois rare dans les centres-villes denses, où les sous-sols sont occupés par des réseaux, tunnels, métro, égouts, parkings souterrains, etc. Une définition trop exigeante risquerait d'exclure des sols en bon état écologique malgré une rupture avec le sous-sol. Une définition trop permissive risque quant à elle d'inciter les opérateurs à aménager des espaces verts sur dalle.

Néanmoins, dans certains secteurs de centres-villes déjà encombrés par des réseaux souterrains et où la continuité du sol en profondeur n'existe plus, une profondeur minimale de sol pourrait être tolérée (bien qu'il ne s'agisse alors plus de pleine terre au sens strict). Celle-ci suppose toutefois de tenir compte de la profondeur et du volume de sol nécessaires pour le développement de la végétation, et en particulier de la strate arborée. Au préalable, il est nécessaire de bien connaître les différentes stratégies d'enracinement des arbres, qui varient en fonction des espèces : racines pivot, racines latérales ou racines obliques (Atger et Edelin, 1994). Cette approche, que l'on qualifie ici de pleine terre « partielle », doit se limiter strictement aux zones dans lesquelles il n'est aujourd'hui plus possible d'assurer la continuité avec la nappe et le sous-sol. Elle ne doit en aucun cas inciter à aménager des espaces sur dalle.

2. Les pédologues définissent plus de 70 types d'horizons appelés « horizons de référence », décrits et répertoriés dans le Référentiel pédologique (2008). On distingue généralement (i) l'horizon organique (ou O) qui résulte de la transformation des débris végétaux qui s'accumulent à la surface du sol, (ii) l'Horizon A, qui contient à la fois de la matière organique et de la matière minérale. Il est le résultat du travail des organismes vivants dans le sol (vers, insectes). (iii) L'horizon B est enrichi en divers constituants minéraux ou organiques : argile, fer, matière organique, carbonate de calcium. Il résulte de la transformation des minéraux primaires issus de la roche sous-jacente. (iv) L'Horizon C'est un horizon d'altération de la roche mère sous-jacente ; et (v et vi) les horizons R ou M qui représentent la roche mère et qu'on distingue en fonction de leur dureté : R pour les roches dures (granites, grès, calcaires) et M pour les roches meubles (sables, marnes).

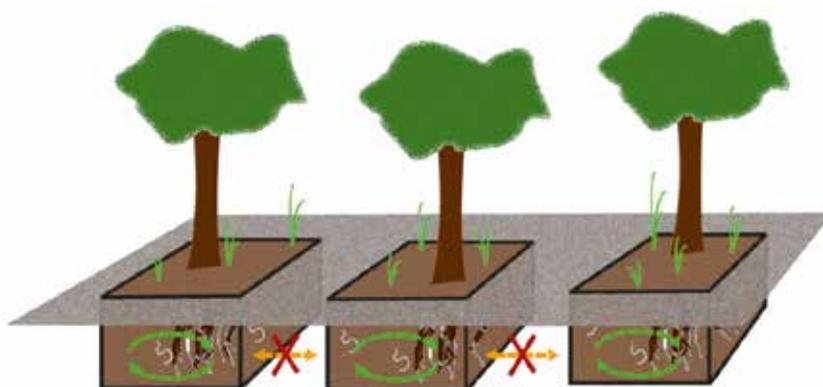


FIGURE 3. Problématique de fragmentation des sols en ville. © Romain Sordello (d'après Chalot, 2016) [14]

La continuité horizontale des sols ou trame brune

La « trame brune » est un concept calqué sur le modèle de la trame verte et bleue, appliqué à la connectivité entre les sols. Les espèces présentes dans le sol ont aussi besoin de se déplacer (Mathieu, 2015) pour accomplir leur cycle de vie, se reproduire, échapper à des changements ponctuels dans leur environnement, ou recoloniser un milieu après un épisode de mortalité [12]. Il peut s'agir des vers de terre, mais aussi des carabes, collemboles, fourmis ou taupes. La notion de trame brune rejoint celle de pleine terre en s'attachant à réduire les éléments fragmentant dans le sol (cuves bétonnées, réseaux de canalisation).

Elles visent ainsi à conserver des « horizons latéraux », qui s'étalent sur une distance indéfinie pouvant aller du mètre au kilomètre.

L'idée de trame brune fait également référence aux besoins d'ancrage des végétaux et d'interaction entre les réseaux racinaires, facilitant les échanges entre eux, avec les filaments mycéliens, ou encore avec les organismes du sol. En ville, certains secteurs dont les sols sont fragmentés ou trop compactés entravent cette continuité, notamment quand les arbres sont plantés dans des fosses individuelles. La mise en place de trames brunes peut notamment passer par le choix de fosses contiguës pour les arbres d'alignement afin qu'ils partagent un volume de sol commun et d'éviter les fosses individualisées dont le volume dépasse rarement 4 à 9 m³, parfois 12 ou 24 m³ (Gouedard, 2014). Le retrait des surfaces désimperméabilisées autour des arbres augmente par ailleurs la capacité d'infiltration des eaux pluviales [13].

La qualité physico-chimique et biologique des sols

Une pleine terre, mais pleine de quoi? Plusieurs milliers d'espèces animales, et plusieurs dizaines à centaines de milliers d'espèces bactériennes et de champignons cohabitent dans seulement quelques mètres carrés de sol, le tout sur une épaisseur très

faible (parfois moins d'un mètre). En ville, plusieurs indicateurs peuvent permettre d'évaluer l'état de la faune du sol et qualifier sa qualité écologique (voir p. 86). Les sols dégradés présentant une qualité écologique faible ou une dégradation de leurs horizons peuvent néanmoins être restaurés. Ces derniers pourraient être qualifiés de pleine terre dégradée.

La perméabilité des sols

Cette dernière dimension concerne la perméabilité des sols aux eaux pluviales, les surfaces de pleine terre devant permettre l'infiltration de l'eau jusqu'à la nappe phréatique (sauf cas particulier de sols argileux, naturellement peu perméables). En fonction des contraintes de tassement dont peuvent être victimes les sols urbains (du fait du piétinement ou du passage d'engins), ce critère pourrait permettre de distinguer les sols de pleine terre ayant conservé une perméabilité satisfaisante, des sols de pleine terre dégradée qui nécessitent des actions de restauration.

Vers la définition d'un gradient de pleine terre

La prise en compte de ces 5 critères permettrait de distinguer plusieurs degrés de pleine terre, à savoir : la pleine terre stricte (ou sols urbains à caractère naturel) ; la pleine terre dégradée (tassée, horizons déstructurés ou polluée) nécessitant des travaux de restauration ; la pleine terre partielle (tolérance d'une profondeur minimale à atteindre dans les secteurs urbains denses héritant d'un sous-sol déjà artificialisé) et l'absence de pleine terre (espaces totalement revêtus par des infrastructures). Cette classification est proposée à titre indicatif. Elle nécessite au préalable une bonne connaissance des sols et la mise en place d'outils cartographiques pour évaluer leur état au regard de ces différentes dimensions. Un tel travail contribuerait à faire évoluer le statut des sols urbains dans les documents d'urbanisme et faciliterait leur protection ou leur renaturation au regard de critères plus objectifs.

	PLEINE TERRE	PLEINE TERRE DÉGRADÉE	PLEINE TERRE PARTIELLE	ABSENCE DE PLEINE TERRE
Continuité verticale (profondeur)	Assurée jusqu'à la roche mère/nappe phréatique	Assurée, bien que les horizons aient pu être remaniés	Profondeur minimale définie en fonction de la profondeur et du volume de sol nécessaires à la strate arborée	Non assurée
Perméabilité	Perméabilité de référence selon le type de sol	Perméabilité faible, fortes contraintes de tassement	Perméabilité possible si surfaces non tassées	Absence de perméabilité des sols
Continuité horizontale (trame brune)	Assurée sur l'ensemble du site	Pas nécessairement assurée	Pas nécessairement assurée	Non assurée
Revêtement	Pas de revêtement	Pas de revêtement	Pas de revêtement	Revêtement imperméable ou perméable
Qualité physico-chimique et biologique théorique	Bonne (à confirmer par des analyses)	Faible à bonne (à confirmer par des analyses)	Faible à bonne (à confirmer par des analyses)	Nulle
Type d'action en lien avec la planification	À maintenir en l'état et à protéger	À restaurer et à protéger	À définir uniquement dans les secteurs où le sous-sol est déjà encombré	Surface à privilégier pour la renaturation

TABLEAU 2. Récapitulatif des différents degrés de pleine terre.

RENATURER LES SOLS IMPERMÉABILISÉS, UNE NÉCESSITÉ

La littérature scientifique et technique sur la renaturation de surfaces imperméabilisées est encore très parcellaire. Entre 2016 et 2019, le programme européen SOS4LIFE [15] a recensé les initiatives européennes en matière de protection des sols et de désartificialisation [16] et émis des préconisations concernant l'évaluation et le suivi des sols [17]. Plusieurs initiatives ont été mises en œuvre en Europe, notamment dans le cadre de mesures compensatoires (Adobati *et al.*, 2020). Selon les collectivités, il peut s'agir d'actions de désimpermeabilisation couplées ou non à une renaturation.

Belgique, Italie, Allemagne, Danemark, France : les projets de désimpermeabilisation / renaturation se multiplient

De telles approches ont été déployées en Région wallonne en Belgique (2005), avec l'application du concept de zéro perte nette des terres fixé par l'Union européenne en 2016. En 2021, le Gouvernement de Wallonie a lancé un appel à projets de création de nouveaux parcs en milieu urbain. Dix-sept villes ont été désignées et se partageront un budget de 12,1 millions d'euros pour créer 45 hectares de nouveaux espaces verts après une désimpermeabilisation des sols [18]. En région Flandres, le gouvernement a financé en 2019 une vingtaine de « Jardins expérimentaux de descelle-

ment », dans le cadre d'un appel à projets. Le soutien financier, à hauteur de 5 millions d'euros, portait sur le retrait du béton, de l'asphalte ou de certains bâtiments, suivi d'une conception paysagère de l'espace ainsi libéré [19].

L'Allemagne a aussi une expérience significative en la matière (Pileri, 2007) avec la conduite de plusieurs projets de déscellement au niveau régional (Land du Bade-Wurtemberg) et local (Stuttgart et Berlin). À titre d'exemple, après la crue de l'Elbe dans les années 2000, la ville de Dresde a défini un objectif d'aménagement dans lequel les terrains bâtis destinés à l'habitat et à la circulation routière ne doivent pas représenter plus de 40 % de l'espace urbain total. Pour atteindre cet objectif, le conseil municipal a créé un « compte de compensation pour les sols » (Soil compensation account). La réalisation de nouveaux projets sur des terrains non bâtis exige en contrepartie de mettre en œuvre des mesures de désimpermeabilisation de sols sur des zones inutilisées ou abandonnées. Cette politique publique a permis de faire émerger une variété d'interventions comprenant la démolition de bâtiments, la réouverture de rivières, la réhabilitation de friches polluées, la démolition de plateformes en milieu agricole ou encore le retrait du bitume des voies cyclables et piétonnes dans les coulées vertes et espaces verts. Depuis 2010, en moyenne 4 hectares sont désimpermeabilisés chaque année.

Dans le cadre de la réhabilitation de friches industrielles, de nombreuses expériences de renaturation d'espaces imperméabilisés ont été menées (Atkinson *et al.*, 2014). La Région Émilie-Romagne (Italie) a introduit le concept de « bâtiments incongrus » en 2002,



Les villes regorgent d'espaces inutilement asphaltés ou bétonnés sur lesquels la nature pourrait reprendre ses droits. ©Marc Barra/ARB ÎdF

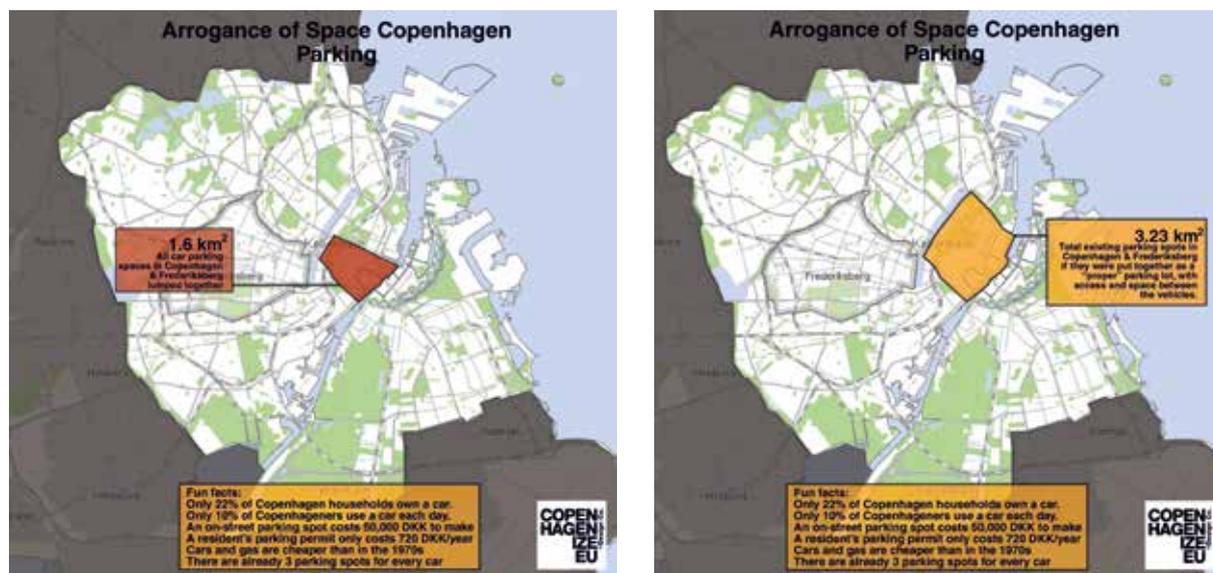


FIGURE 4. Représentation des surfaces occupées par les places de parking à Copenhague (Danemark)
©Copenhagenize.com - Mikael Colville-Andersen

donnant aux municipalités la possibilité de supprimer ces « détracteurs environnementaux » d'un point de vue écologique et paysager (Stanghellini, 2010). Après l'Émilie-Romagne, d'autres régions italiennes ont pris des mesures similaires, bien qu'avec des objectifs différents. La Région Ligurie, par exemple, a donné la possibilité de démolir des bâtiments pour réduire les risques d'inondation.

À Berlin, une stratégie d'identification de sites à désimperméabiliser a été mise en place par le gouvernement local dans le cadre de l'objectif fédéral de lutte contre l'artificialisation des sols. Cette stratégie intitulée « Potential for the Removal of Impervious Soil Coverage 2020 » se rapproche de l'objectif zéro artificialisation nette décliné en France et prévoit de compenser toute artificialisation nouvelle par une renaturation d'espaces imperméabilisés. Elle s'appuie sur un atlas de la qualité des sols élaboré comme outil d'aide à la décision pour les aménageurs [20]. Une enquête menée auprès du personnel municipal a permis de créer une base de données recensant les zones potentiellement désimperméabilisables. L'étude est allée plus loin en qualifiant chaque site en fonction de la faisabilité et du niveau de priorité des opérations de renaturation. En 2020, sur les 179 sites identifiés, 31 ont déjà été entièrement désimperméabilisés et 14 le sont partiellement.

Au Danemark, une association de cyclistes a réalisé une estimation des surfaces de parkings et de stationnement dans la ville de Copenhague (Figure 4.). Mises bout à bout, les places de stationnement occuperaient une surface de 1,6 km². Si elles étaient regroupées dans un seul et même parking (incluant les accès et voies de circulation), cette surface s'élèverait à 3,23 km². Ces travaux mettent en lumière l'importance du gisement d'espaces imperméabilisés dans les villes et le besoin d'outils pour les caractériser.

En France, plusieurs travaux se sont intéressés récemment au potentiel de désimperméabilisation et/ou de renaturation, avec des angles d'approche complémentaires. En 2019, le Cerema a accompagné la Communauté d'agglomération du Grand Narbonne sur la construction d'une méthode de calcul des surfaces à désimperméabiliser [21]. En Île-de-France, la DRIEAT a missionné le Cerema Ile-de-France en 2021 pour développer une méthodologie d'identification du potentiel de renaturation de l'unité urbaine parisienne contribuant à établir une stratégie opérationnelle de résilience et d'adaptation au changement climatique [22]. L'ADEME pilote également le projet de recherche « DésiVille », en vue d'élaborer un outil d'aide à la désimperméabilisation des sols artificialisés et un catalogue de solutions applicables en ville [23].

À côté de ces programmes, de nombreuses initiatives émergent au coup par coup dans les collectivités, dans le cadre d'appels à projets ou de démarches locales portées par les communes (permis de végétaliser, budgets participatifs, renaturations ponctuelles). Les actions prennent des formes variées, tantôt centrées uniquement sur la désimperméabilisation au titre de la gestion des eaux pluviales, tantôt couplant la désimperméabilisation à une renaturation. À Rennes, un travail en cours par l'AUDIAR vise à produire une cartographie des espaces à désimperméabiliser, en lien avec le mouvement DEPAVE initié aux États-Unis et au Canada (voir p. 105). À Strasbourg, dans le cadre du programme « Strasbourg ça pousse », une enveloppe conséquente est strictement réservée à des projets de déminéralisation de l'espace public (voir p.106). Récemment, le département de Loire-Atlantique a mis en place une aide à la désimperméabilisation et à la renaturation des milieux urbains, qui exclut les aménagements hors-sols [24].

RENATURATION ET OBJECTIF « ZÉRO ARTIFICIALISATION NETTE »

En France, environ 27 000 hectares d'espaces ont été consommés annuellement par l'urbanisation entre 2009 et 2019, à un rythme près de 4 fois plus rapide que la croissance démographique (Bocquet, 2021 ; Fosse *et al.*, 2019). En réponse à ce phénomène, le gouvernement français a décidé de mettre en place un objectif de « zéro artificialisation nette » des sols ou ZAN (Plan biodiversité du 4 juillet 2018). Ce principe, repris dans la Loi n°2021-1104 portant sur la lutte contre le dérèglement climatique et renforcement de la résilience face à ses effets (août 2021), autrement appelée loi « climat et résilience », fixe l'obligation de définir un objectif de réduction de la consommation d'espaces à l'horizon 2031 et une trajectoire permettant d'atteindre l'objectif ZAN à l'horizon 2050. Cet objectif doit être traduit dans les documents de planification au niveau régional (SRADDET, SDRIF, PADDUC et SAR), avant d'être ensuite décliné aux niveaux intercommunal et communal (SCoT, PLU/i). La mise en œuvre du ZAN requiert une stratégie complexe qui vise d'une part à réduire l'étalement urbain en encourageant le renouvellement et la densification et, d'autre part, à restituer les surfaces consommées par l'urbanisation à l'aide de stratégies de renaturation.

Le ZAN en Île-de-France

Ce constat d'un étalement urbain ne se pose pas tel quel en Île-de-France qui voit sa population croître plus rapidement que ses espaces urbanisés. Néanmoins, après avoir divisé sa consommation d'espace par 4 sur les deux dernières décennies, la dernière période d'observation (2017 - 2021) traduit plutôt une augmentation de la tendance (+31 % par rapport à la période 2012 - 2017). Si l'Île-de-France n'est responsable « que » de 5 % de la consommation d'espace du pays, alors qu'elle accueille 20 % de la population, c'est aussi la région la plus urbanisée. Considérée comme performante en termes de sobriété foncière, l'Île-de-France est libre de fixer son facteur de réduction de consommation d'espaces pour la prochaine décennie, sur la base d'une moyenne de 880 ha/an hectares par an³. Approuvé il y a bientôt dix ans, le schéma directeur de la région Île-de-France (SDRIF 2013) entre actuellement en révision pour intégrer de nouveaux objectifs face à l'ampleur de la crise environnementale. L'objectif ZAN constitue une opportunité de construire un nouveau modèle de sobriété foncière sur le renouvellement urbain, protégeant les espaces naturels existants et encourageant la renaturation [25].

3. Moyenne de consommation d'espace repérée par le MOS entre 2012 et 2021.

Une approche ambitieuse qu'il est nécessaire de nuancer

La mise en œuvre de l'objectif ZAN soulève toutefois de nombreuses questions concernant la renaturation. Bien que l'atteinte d'une artificialisation « nette » des sols soit séduisante, trouver suffisamment de sites à renaturer chaque année peut s'avérer difficile, voire illusoire dans certaines régions. Par ailleurs, le temps de l'aménagement (à très court terme) est souvent incompatible avec celui de la renaturation, qui s'envisage sur le long terme. Cet écueil, déjà mis en évidence dans le cadre de la séquence ERC (Eviter, Réduire, Compenser), plaide en faveur de politiques d'aménagement plus sobres en évitant de sans cesse rechercher des sites pour accueillir des mesures compensatoires qui, par ailleurs, n'atteignent pas les objectifs escomptés en matière d'absence de « perte nette » de biodiversité (Weissgerber *et al.*, 2019). De plus, la renaturation reste un défi technique et financier important. À ce titre, il est prioritaire d'éviter toute nouvelle artificialisation des sols en composant uniquement avec l'existant (Levrel *et al.*, 2021), en parallèle d'une protection forte des espaces naturels. Par ailleurs, le ZAN s'inscrit dans une approche compatible de la planification qui ne saurait être suffisante pour enrayer le déclin de la biodiversité dans les territoires (Barra et Clergeau, 2020). D'autres politiques publiques de reconquête de la biodiversité et de renaturation volontaristes doivent s'additionner à cet objectif. Dans une région très urbanisée comme l'Île-de-France et alors que le ZAN paraît atteignable par le renouvellement urbain, l'écueil d'une sur-densification pourrait s'avérer contre-productif. L'enjeu est bien de désartificialiser la ville et d'augmenter au maximum l'offre en espaces de nature, pas de la maintenir à un niveau déjà très bas⁴.

Les différentes facettes de l'artificialisation

La loi « climat et résilience », définit les espaces artificialisés comme ceux dont les usages « affectent durablement tout ou partie de ses fonctions écologiques des sols, en particulier ses fonctions biologiques, hydriques et climatiques ainsi que son potentiel agronomique ». Cette définition, proche des définitions scientifiques, peut toutefois donner lieu à différentes interprétations, notamment au regard de la grande variabilité des espaces de nature urbains (sols plus ou moins dégradés, avec une végétalisation de qualité ou non, etc.).

4. En Île-de-France, selon les données du Plan vert, 919 communes sont considérées comme carencées en espaces verts (2017).

Mais cette définition n'a vocation à s'appliquer qu'aux projets d'aménagement et de construction. Les documents de planification (schémas d'aménagement régionaux, SCoT, PLU) se voient appliquer une autre définition spécifique pour déterminer leurs objectifs de réduction de l'artificialisation des sols. Dans cette deuxième définition, le législateur considère comme « artificialisée une surface dont les sols sont soit imperméabilisés en raison du bâti ou d'un revêtement, soit stabilisés et compactés, soit constitués de matériaux composites » et comme « non artificialisée une surface soit naturelle, nue ou couverte d'eau, soit végétalisée, constituant un habitat naturel ou utilisée à usage de cultures ».

En avril 2022, deux des trois décrets relatifs à la mise en œuvre de l'objectif ZAN sont parus, l'un renvoyant à l'inscription du ZAN dans les Srdet et le second définissant la nomenclature de l'artificialisation des sols. Ce dernier propose une grille fixant le caractère artificialisé ou non artificialisé des différentes surfaces. Les surfaces bâties ainsi que les surfaces partiellement ou totalement perméables dont les sols sont constitués de matériaux composites (couverture hétérogène et artificielle avec un mélange de matériaux non minéraux) sont considérées comme artificialisées. Les carrières et les espaces agricoles sont considérés comme non artificialisés. Notons que les surfaces à usage résidentiel, de production secondaire ou tertiaire, ou à usage d'infrastructures – notamment de transport ou de logistique – sont considérées comme artificialisées si les sols sont couverts par une végétation herbacée. Elles sont considérées comme non artificialisées si les sols sont boisés. Si cette nomenclature vise à encourager la

densification des tissus urbains existants, elle pourrait contribuer à artificialiser des surfaces enherbées essentielles à la biodiversité (prairies urbaines, parcs et jardins). Il est important de rappeler que tous les espaces de pleine terre, végétalisés ou non, sont précieux en ville. Ils doivent être protégés dans les documents d'urbanisme, qu'ils soient comptabilisés comme artificialisés ou non, par ce décret.

Cela inclut :

- les espaces végétalisés à faible naturalité (gazons, jardins horticoles), qui pourront être améliorés en qualité par des actions simples de gestion écologique (ou de non-gestion),
- les espaces végétalisés à forte naturalité comme certains parcs et jardins, friches, zones humides, boisements relictuels ou prairies, qui devront être conservés en l'état et protégés.

Dans la logique du ZAN, les opérations de renaturation devront donc cibler les espaces bâtis ou imperméabilisés pour permettre un bénéfice écologique réel. Enfin, la végétalisation du bâti ou la création d'espaces hors-sol, bien qu'intéressante à plusieurs égards, ne remplacera jamais les espaces de pleine terre et n'est pas assimilable à de la renaturation.

Dans les documents d'urbanisme, les espaces à renaturer pourraient être matérialisés dans le zonage réglementaire au sein des PLU/i ou via des orientations d'aménagement et de programmation (OAP) portant sur des secteurs à renaturer qui viendraient compléter les OAP relatives à la nature en ville (OAP trame verte et bleue, OAP Paysage et biodiversité, etc.) ou en identifiant des « zones préférentielles pour la renaturation » dans les SCoT.



FIGURE 5. Dans le cadre de la mise en œuvre du ZAN, les collectivités devront mieux protéger les espaces de pleine terre existants, peu importe leur naturalité, et cibler les espaces imperméabilisés pour les opérations de renaturation.



#2

IDENTIFIER LES SECTEURS À FORT POTENTIEL DE RENATURATION

MÉTHODOLOGIE GÉNÉRALE

La méthode développée dans ce guide se focalise sur les espaces imperméabilisés dont la renaturation viendra améliorer le bilan écologique d'un territoire. Il peut s'agir de parkings surdimensionnés, de cours d'écoles ou d'immeubles, de berges bétonnées, de résidus d'espace public inutilement asphaltés et non utilisés, de sites industriels ou de zones d'activités économiques et commerciales, etc. En amont, les collectivités ont besoin d'identifier ce potentiel.

La méthode développée dans ce guide se base sur 3 enjeux principaux afin de localiser ces zones urbaines :

- Un enjeu de reconquête de la biodiversité, qui cible les zones déficientes du point de vue de la biodiversité via l'étude de la taille des espaces végétalisés ; du pourcentage de couvert végétalisé ; de la présence d'habitats rares.
- Un enjeu d'adaptation au changement climatique, qui cible les zones exposées aux risques climatiques que sont : les inondations par crues ; le ruissellement ; le phénomène d'îlot de chaleur urbain (ICU).
- Un enjeu d'amélioration de la santé et du cadre de vie, qui cible les zones vulnérables par leur carence en espaces verts ; la pollution de l'air ; et les problèmes sanitaires liés aux ICU.

Afin de réaliser ce diagnostic, le territoire francilien a été découpé en mailles de 125 m x 125 m (mailles compatibles avec les données et études de L'Institut Paris Region). Pour chaque enjeu (biodiversité, changement climatique, santé), des critères ont été

sélectionnés sur l'avis d'experts et selon la disponibilité des données à l'échelle de la région francilienne (détaillés plus loin).

L'état des mailles face à chaque critère est analysé et traduit sous forme de score. Par exemple, une maille exposée fortement, moyennement ou faiblement à la pollution de l'air verra son score varier en conséquence. Ainsi, un score est attribué à chaque critère, puis un score global à chaque enjeu. L'attribution des scores globaux correspond au cumul des scores individuels des critères (aucune pondération n'est opérée entre les différents critères). Les seuils permettant d'attribuer les scores ont été fixés à partir d'études et synthèses bibliographiques ainsi que sur des entretiens avec des experts. L'ensemble est résumé dans les pages 34, 52 et 66.

Une fois les différents critères analysés et le score global attribué, les mailles pour lesquelles l'enjeu est le plus fort sont identifiées. Ces dernières sont choisies en fonction de leur score (un score bas reflétant un enjeu fort) mais aussi en fonction de leur nombre (un nombre trop élevé de mailles risque de faire ressortir tout un territoire et d'empêcher toute forme de priorisation). Cette première étape permet d'identifier des secteurs à fort potentiel de renaturation sur un territoire mais ne permet pas de localiser des sites imperméabilisés pouvant être renaturés. Pour ce faire, les sites potentiellement désimperméabilisables/renaturables (cours d'école, parkings, friches, places publiques, etc.) ont été listés à partir de la classification de l'occupation des sols proposée par le mode d'occupation du sol (MOS) de L'Institut Paris Region (voir p. 29).



FIGURE 6. Représentation schématique de la méthode d'analyse spatiale utilisée.

TYPOLOGIE DES ESPACES IMPERMÉABILISÉS POTENTIELLEMENT RENATURABLES

Une typologie des espaces imperméabilisés à localiser

La typologie proposée ci-après recense, à partir du mode d'occupation du sol (MOS) de L'Institut Paris Region, des surfaces imperméabilisées facilement renaturables (sans que cela nécessite la destruction des bâtiments présents). La liste est le reflet des bases de données disponibles et ne saurait

être exhaustive. À titre d'exemple, les petits espaces comme les pieds de murs, les intervalles entre deux fosses d'arbres, etc. ne peuvent pas être localisés avec cette méthode. Cependant, elle cible à la fois de petits et grands espaces (de quelques m² à plusieurs hectares), permettant de travailler à la fois à l'échelle d'une région, d'une intercommunalité, ou d'une commune.

TABLEAU 3. Typologie des espaces imperméabilisés potentiellement renaturables à partir du MOS

TYPOLOGIE PRÉCISION NIVEAU 1	TYPOLOGIE PRÉCISION NIVEAU 2	TYPOLOGIE PRÉCISION NIVEAU 3		
ESPACES OUVERTS ARTIFICIALISÉS	Places publiques	Places publiques (trottoir, allée bitumée, parvis)		
	Espaces verts urbains	Parcs ou jardins (parkings associés, routes, allée bitumée)		
	Espaces ouverts dédiés au sport	Terrains de sport en plein air (parkings associés, terrains inutilisés, contour des terrains utilisés)		
		Équipements sportifs de grande taille : terrains de golf, hippodromes (parkings associés, dalles de béton)		
	Cimetières	Cimetières (dalles de béton, allées bitumées, parkings associés)		
	Terrains vacants	Friches (dalles de béton, bâti désaffecté)		
Zones abandonnées : gares, aéroports, usines (dalles de béton, bâti désaffecté)				

HABITATIONS	Habitat collectif	Immeubles/résidences (cours intérieures, dalles de béton, parkings inutilisés, trottoirs)	
	Habitat autre	Prisons (cours, contour des terrains de sport, parkings)	
VOIRIES	Structures associées	Ronds-points	
		Culs-de-sac	
		Terre-pleins centraux	
	Routes	Voiries inutilisées ou sous-utilisées	
	Délaissés routiers	Bas-côtés, enrobés	
	Trottoirs	Trottoirs > 1,40 m	
Trottoirs avec alignement d'arbres			

TRANSPORTS	Emprises routières	Voies de plus de 25 m de large (autoroutes urbaines, délaissés routiers)	
	Parkings	Parkings de surface (allées de circulation, zone de séparation des places, places de parking)	
	Gares	Gares (parkings associés, places)	
		Bordures de voies	
Voies ferrées	Voies ferrées inutilisées		
ÉQUIPEMENTS	Établissement d'enseignement	Enseignement de premier degré (cours de récréation, contour des terrains de sport)	
		Enseignement secondaire (cours de récréation, contour des terrains de sport)	
		Enseignement supérieur (dalles de béton, contour des terrains de sport)	
Établissement de santé	Hôpitaux, cliniques (parkings associés, dalles de béton)		
Équipements accueillant du public		Mairies (places, parkings associés)	
		Centres de congrès et d'exposition (dalles de béton, parkings associés)	
		Équipements culturels et de loisirs : musées, châteaux etc. (parkings associés)	

ACTIVITÉS	Économiques et industrielles	Grandes emprises industrielles (zones vétustes, parkings, trottoirs)	
		Zones d'activités économiques (zones vétustes, parkings, trottoirs)	
COURS D'EAU	Rivières	Rivières enterrées	
		Berges	
COURS D'EAU	Canaux (cours d'eau artificiels)	Allées bitumées	
		Berges	
		Lit artificiel du cours d'eau	
COURS D'EAU	Canaux (cours d'eau artificiels)	Allées bitumées	
		Berges	

Places publiques ©Camille Gosselin/ L'Institut Paris Region. Espaces verts urbains ©Vincent Gollain/ L'Institut Paris Region. Espaces ouverts dédiés au sport ©Pierre-Yves Brunaud/L'Institut Paris Region. Habitat collectif et autre, emprises routières ©Barnabé Duplan-lval / L'Institut Paris Region. Gares ©Frédéric Larose/ L'Institut Paris Region. Voies ferrées ©Paul Lecroart / Institut Paris Region. Établissement d'enseignement ©Jean-Claude Pattacini/ Urba Images/L'Institut Paris Region. Établissement de santé ©Anca Duguet/ L'Institut Paris Region. Équipements accueillant du public ©Corinne Legenne/ L'Institut Paris Region. Commerces ©Pierre-Yves Brunaud/L'Institut Paris Region. Rivières ©Elisabeth Bordes-Pages/ L'Institut Paris Region. Canaux (cours d'eau artificiels) ©Vincent Gollain/ L'Institut Paris Region. Cimetières, terrains vacants, structures associées, routes, délaissés routiers, trottoirs, parkings, économiques et industrielles ©ARB idF.

RENATURER POUR RECONQUÉRIR LA BIODIVERSITÉ

En Île-de-France, alors que les milieux urbains représentent moins du quart (23 %) de la surface régionale, leur densité est bien supérieure à celle des autres régions (1 022 hab/km²). Depuis les années 2000, le déclin de la biodiversité est particulièrement marqué dans les zones urbaines franciliennes. L'abondance des papillons a diminué d'un tiers tandis que celle des oiseaux a chuté de 20 % (Muratet *et al*, 2016). Au-delà du déclin des espèces, la ville est également le théâtre d'un processus d'homogénéisation, favorisant les espèces généralistes (Pigeon ramier, Pie bavarde) au détriment des espèces spécialistes (Hirondelle de fenêtre, Martinet noir) : entre 2004 et 2017, l'abondance

de ces oiseaux spécialistes du bâti a chuté de 41 % (Muratet *et al*, 2016).

Afin d'identifier les secteurs urbains à renaturer au titre de la reconquête de la biodiversité, il convient de localiser dans un premier temps les zones les plus « carencées » en biodiversité, dont la renaturation permettrait un gain écologique fort. La méthodologie s'appuie sur plusieurs critères issus de la littérature scientifique et s'inspire notamment de la synthèse Making Nature's City (Spotswood *et al*, 2019). En accord avec les données disponibles, 3 critères ont été retenus : la surface des espaces végétalisés, le couvert végétalisé et la présence d'habitats rares.

RÉSEAUX ÉCOLOGIQUES ET CONNECTIVITÉ

La connectivité écologique fait partie des facteurs clefs pour maintenir et préserver la biodiversité en milieu urbain (Shanahan *et al*, 2011). Elle permet aux espèces de se déplacer (essentiel à leur survie et reproduction), augmente le brassage génétique entre populations et garantit l'adaptation et la résilience des écosystèmes. Ce concept écologique a été traduit dans le droit de l'environnement et l'aménagement du territoire par les fameuses trames vertes et bleues. Les trames d'importances régionales sont identifiées dans le SRCE (Schéma Régional de Cohérence Écologique) qui a pour objectifs la protection et la restauration des continuités écologiques. Les éléments de connaissance qu'il apporte présentent un intérêt à l'échelle régionale mais ne peuvent pas être interprétés à une échelle plus fine sans étude, ni déclinaison locale. En effet, l'absence de continuité d'importance régionale sur un territoire

ne signifie pas qu'il n'y en ait pas à l'échelle locale. L'échelle de travail utilisée dans la présente méthodologie ne permet donc pas d'utiliser les données du SRCE. Faute de données plus précises, les collectivités pourront affiner la méthode en y intégrant leurs propres données concernant les continuités écologiques de leur territoire. A titre d'exemple, l'association Environnement 92 a réalisé une cartographie de la végétation dans le milieu urbain à partir de photographies aériennes à haute résolution dans le département des Hauts-de-Seine. Afin de matérialiser les continuités écologiques, la théorie des graphes a été utilisée en tant qu'outil d'évaluation de la biodiversité urbaine dans la zone étudiée. La connectivité des réseaux écologiques a été étudiée à partir de 4 espèces (Hérisson d'Europe, Murin de Bechstein, Mésange charbonnière et Myrtil). Ce travail offre une vision plus précise des secteurs urbains à renaturer au titre de l'amélioration de la connectivité des réseaux écologiques.

LES CRITÈRES POUR LOCALISER LES ZONES PRIORITAIRES

Surface continue d'espaces végétalisés

La taille des espaces végétalisés est l'un des principaux facteurs structurant la biodiversité présente en ville. Plus un habitat¹, un patch², ou un réservoir est grand, plus il est susceptible d'abriter une diversité d'espèces importante (Strohbach *et al.*, 2013). Une étude portant sur 75 métropoles a montré que pour

agir comme support d'une biodiversité adaptée au milieu urbain, la taille minimale de l'habitat s'élève à 4,4 hectares. En ce qui concerne des espèces plus sensibles qui fuient habituellement la ville, dites urbanophobes, cette surface s'élève à 53,3 hectares (Beninde, 2015). Sur la base de ces informations, il a donc été choisi de distinguer dans les zones urbaines :

- les micro-patches, espaces végétalisés de taille inférieure à 4,4 ha ;
- les patches, espaces végétalisés de taille comprise entre 4,4 ha et 53,3 ha ;
- les réservoirs d'intérêt régional, espaces végétalisés de taille supérieure à 53,3 ha.

Pour ce critère, la présence d'un micro-patch dans une maille lui attribue un score de 1, celle d'un patch un score de 2, et celle d'un réservoir d'intérêt régional un score de 3. En l'absence d'espaces végétalisés, le score est de 0. Dans le cas de figure où deux espaces végétalisés de surfaces différentes sont présents dans une même maille, seul le plus favorable est pris en compte.

1. En écologie, un habitat correspond à un ensemble d'éléments et de ressources naturelles qui vont constituer un milieu de vie permettant à la population d'une espèce d'y vivre et de s'y reproduire. Un même habitat peut subvenir aux besoins de plusieurs populations d'espèces différentes. Une diversité d'habitats emboîtés et connectés forme un écosystème.
2. En écologie, la notion de patch renvoie à l'existence d'un espace relativement homogène qui diffère de ce qui l'entoure. À titre d'exemple, les parcs urbains et autres parcelles enherbées au sein de la matrice urbaine minérale peuvent être considérés comme des patches.

CRITÈRES	SEUILS	SCORE	SOURCE
Surface des espaces végétalisés	Absence	0	<i>Vega et Küffer, 2021 ; Spotswood et al, 2019 ; Beninde et al, 2015</i>
	Surface \leq 4,4 ha	1	
	4,4 ha < surface < 53,3 ha	2	
	Surface \geq 53,3 ha	3	
Couvert végétal (%)	Couvert végétal < 25 %	0	<i>Threlfall et al, 2017 ; Szulczewska et al, 2014</i>
	25 % \leq couvert végétal < 45 %	1	
	Couvert végétal \geq 45 %	2	
Habitats rares	Aucun	0	<i>Spotswood et al, 2019 ; Stagoll et al, 2012 ; Le Roux et al, 2015</i>
	Arbres remarquables	1	
	Mares	1	
	Autres zones humides	2	

TABLEAU 4. Synthèse des critères, seuils et ressources bibliographiques utilisés pour identifier les secteurs urbains carencés en biodiversité.

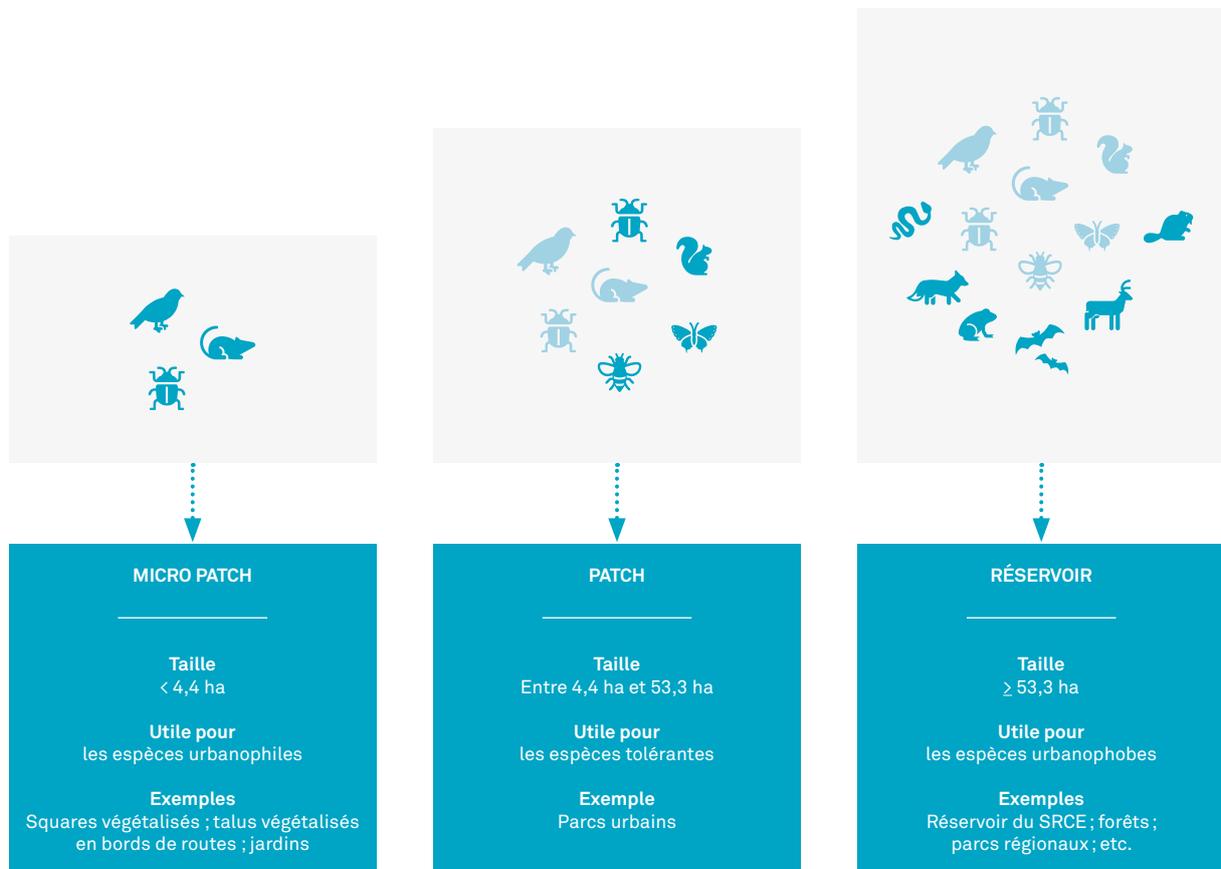


FIGURE 7. Illustration du lien entre la taille de l'habitat et la richesse spécifique.

POUR ALLER PLUS LOIN

Bien qu'ils ne soient pas pris en compte dans l'analyse, les jardins privés participent au maillage vert du territoire (Riboulot-Chetrit, 2015) et peuvent servir de refuges et points de relais à de nombreuses espèces, d'autant plus s'ils sont gé-

rés écologiquement, (Goddard *et al*, 2010). Ajouter ces données, ainsi qu'un indice de la qualité écologique des espaces verts urbains (diversité en espèces, strates végétales, mode de gestion), permettrait d'affiner le diagnostic écologique d'un territoire.

Couvert végétalisé dans la matrice urbaine³

Plusieurs études ont mis en évidence l'importance du couvert végétalisé et son effet positif sur le nombre d'espèces présentes en ville (Aronson *et al*, 2014). Si les milieux urbains sont constitués d'espaces bâtis et minéralisés, ils incluent aussi de multiples d'espaces

végétalisés (arbres d'alignement, haies, jardins, friches, berges, cimetières) pouvant servir d'habitats à de nombreuses espèces. Ces espaces peuvent être appréhendés à travers l'analyse d'images satellitaires qui rendent compte de la surface du couvert occupé par de la végétation. Il est généralement admis que plus le couvert végétal d'une zone est développé, plus cette dernière présentera de bonnes capacités d'accueil pour la biodiversité (Threlfall *et al*, 2017).

La difficulté réside cependant dans la définition d'un seuil à partir duquel le couvert végétalisé permet d'offrir des capacités d'accueil optimales pour la biodiversité. Dans une étude effectuée en Pologne (Szulczewska *et al*, 2014), des chercheurs montrent qu'un minimum de 45 % de zones

3. La matrice urbaine est ici considérée comme l'ensemble des éléments formant le paysage urbain (bâti, routes, etc.), et au sein de laquelle on peut trouver des patches végétalisés propices à la biodiversité. En écologie du paysage, on parle également de matrice écopaysagère qui désigne l'élément dominant du paysage, qui se caractérise par une certaine uniformité dans l'occupation du sol (matrice forestière, bocagère, prairiale, etc.), et dans laquelle on pourra distinguer des patches d'habitat.

POUR ALLER PLUS LOIN

Le pourcentage de couvert végétalisé n'est qu'un critère quantitatif qui présente des limites. Une analyse plus fine des différentes strates de végétation (herbacée, arbustive et arborée) reflèterait davantage la qualité écologique de ces milieux. Ces strates n'offrent pas les mêmes types d'habitat et n'accueillent donc pas les mêmes espèces (Brunbjerg *et al*, 2018). À titre d'exemple, le couvert arboré est positivement corrélé à la présence d'oiseaux, mais négativement corrélé à la présence de pollinisateurs comme certains hyménoptères. Il est généralement admis que la présence des trois

types de strates composées d'espèces locales, permet de maximiser la biodiversité (Threlfall *et al*, 2016 ; Beninde *et al*, 2015). Enfin, le type et la diversité d'espèces végétales peuvent également influencer la qualité écologique du milieu. En effet, on trouve davantage d'oiseaux et de papillons ainsi qu'une plus grande diversité d'espèces dans les zones composées d'espèces végétales locales (Burghardt *et al*, 2009 ; Kurylo *et al*, 2020). Aussi, une étude permettant de quantifier les différentes strates et la proportion d'espèces locales peut se révéler intéressante dans le cadre de ce type d'analyse.

couvertes par la végétation (indice RBVA⁴) est nécessaire pour assurer une stabilité environnementale à l'échelle du quartier. En tenant compte de cette hypothèse, 3 seuils ont été retenus dans cette étude : un score de 0 pour les mailles dont le couvert végétalisé est inférieur à 25 % ; un score de 1 pour un couvert supérieur ou égal à 25 % et inférieur à 45 % et un score de 2 pour celles qui présentent un couvert supérieur ou égal à 45 %.

Habitats rares pour le milieu urbain

Certains habitats, capables d'abriter une grande diversité biologique ou des espèces spécialisées, sont rarement rencontrés en ville. À titre d'exemple, les zones humides ou les vieux arbres constituent des niches écologiques favorables à de nombreuses espèces (Stagoll *et al*, 2012 ; Hill *et al*, 2017). Les zones humides (mares, étangs, cours d'eau, marais) jouent un rôle prépondérant du point de vue de leurs fonctions écologiques mais aussi en leur qualité d'habitat (amphibiens, odonates, avifaune) (Convention de Ramsar sur les zones humides, 2018 ; IPBES, 2019). En zone urbaine, ces habitats permettent également d'offrir un refuge à des espèces plus spécialisées voire rares (Oertli et Parris, 2019 ; Alikhani *et al*, 2021). De leur côté, les grands et vieux arbres remplissent un rôle essentiel pour la conservation de la biodiversité en milieu urbain (Stagoll *et al*, 2012) : ils accueillent davantage d'espèces que les arbres de taille réduite et offrent des habitats plus diversifiés du fait de leur âge (cavités, bois mort). Ils sont parfois les seuls habitats d'espèces très spécialisées comme les insectes

et champignons saproxyliques. Face au déclin des vieux arbres en ville, une étude australienne préconise de préserver en priorité les spécimens âgés existants et de les protéger 40 % plus longtemps que la durée de vie actuellement tolérée (Le Roux *et al*, 2014). En milieu urbain, l'espérance de vie d'un arbre est généralement de quarante à soixante ans (Peyrat, 2014). L'absence de ces habitats « rares » sur un territoire peut être le reflet d'une « carence en biodiversité » qu'il conviendrait de renforcer dans une politique de renaturation. La méthode analyse la présence/absence de 3 types d'habitat que sont : les arbres remarquables⁵, les mares et les autres zones humides (marais intérieurs, tourbières, plans d'eau, prairies humides et forêts marécageuses, berges naturelles / semi-naturelles). Un score de 1 est attribué aux mailles sur lesquelles se trouvent un ou plusieurs arbres remarquables (indépendamment du nombre d'arbres remarquables dans la maille) ; un score de 1 pour les mailles sur lesquelles se trouve une ou plusieurs mares ; un score de 2 pour les mailles sur lesquelles se trouve une autre zone humide. Les différents scores sont cumulables.

Les villes peuvent abriter d'autres habitats à fort intérêt écologique, que l'on pourrait qualifier de « rares », à l'image des mares, zones humides ou vieux arbres. C'est le cas des pelouses sèches, des landes, des prairies, des milieux pionniers, etc. Si des données spatiales existent aux échelles infrarégionales, issues par exemple d'inventaires de la biodiversité communale, elles peuvent être ajoutées à la méthode et venir affiner l'analyse.

4. L'étude s'appuie sur l'indice appelé RBVA ou Ratio of Biologically Vital Areas, correspondant au pourcentage d'espaces couverts par la végétation à l'échelle d'un quartier. Différents niveaux de RBVA ont été comparés, sur la base d'inventaires d'espèces et de calcul de paramètres climatiques.

5. Les arbres remarquables sont des arbres identifiés pour leurs caractéristiques « exceptionnelles » (esthétique, âge, dimension). Bien que les vieux arbres ne soient pas toujours labellisés « arbres remarquables », la majorité de ceux qui le sont présentent un potentiel pour la biodiversité. Les données utilisées proviennent des arbres labellisés en Île-de-France. Des données à l'échelle communale apporteraient davantage de précision dans le cadre de cette étude.

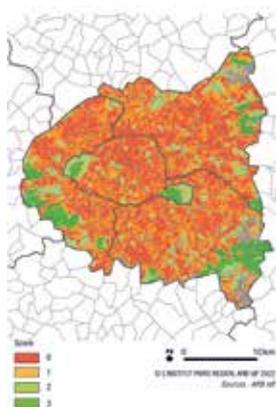


©Gilles Lecuir

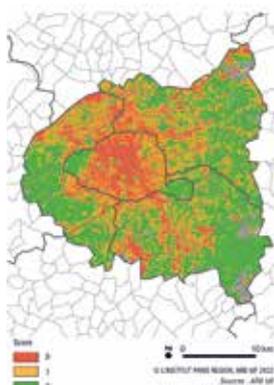
OÙ RENATURER POUR RECONQUÉRIR LA BIODIVERSITÉ ?

Conformément à la méthode détaillée en p. 27, les mailles présentant un score bas ont été définies comme zones de renaturation prioritaires. Le choix s'est porté sur les mailles présentant un score de 0 ou 1. L'analyse cartographique révèle que les zones

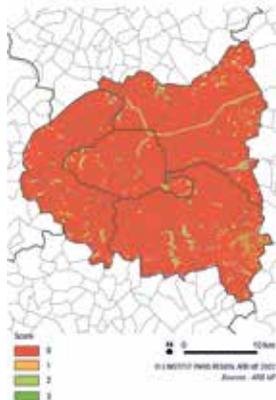
urbaines les moins favorables à la biodiversité se situent au niveau de la ville de Paris. En ce qui concerne les départements de la petite couronne, les zones les moins favorables se situent en général aux alentours proches de Paris et correspondent donc à des lieux ayant subi une pression d'urbanisation et une densification forte, qui se sont faites au détriment de la biodiversité.



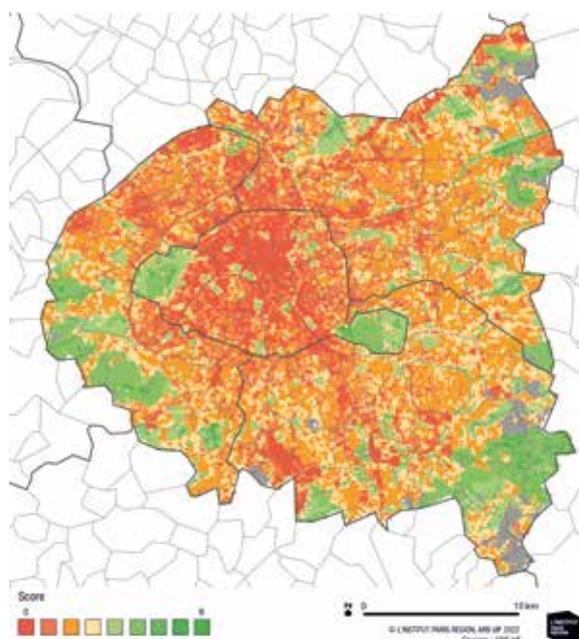
Étude de la surface des espaces végétalisés



Étude du couvert végétal



Étude de la présence d'habitats rares



Cartographie globale de l'enjeu « Reconquête de la biodiversité »

FIGURE 8. Résultats cartographiques de l'étude des critères biodiversité et la cartographie globale de la carence en biodiversité, correspondant à la somme des scores des critères (à droite). Les résultats montrés ici ne concernent que Paris et les départements de la petite couronne.

EXEMPLE D'APPLICATION SUR LA COMMUNE D'AULNAY-SOUS-BOIS

L'analyse (Figure 9.) révèle un total de 264 mailles fortement « carencées » du point de vue de la biodiversité (score de 0 ou 1). Concernant le reste du territoire, 144 mailles laissent supposer une bonne qualité globale vis-à-vis de la biodiversité

(score de 6, 7 ou 8). Celles-ci correspondent au parc du Sausset et au parc Robert-Ballanger (nord-est de la commune) ainsi qu'aux berges du canal de l'Ourcq (sud-est de la commune). Enfin, 747 mailles présentent un score de 4 ou 5, qui n'est pas interprétable comme reflétant une « bonne » qualité, mais qui ne reflète pas non plus un enjeu fort.

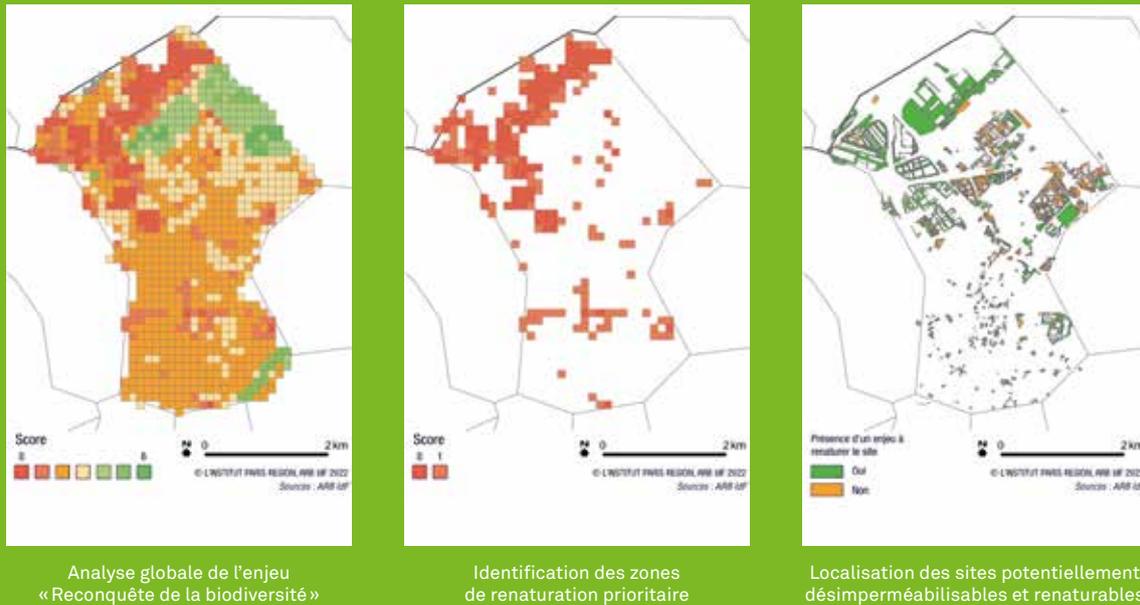
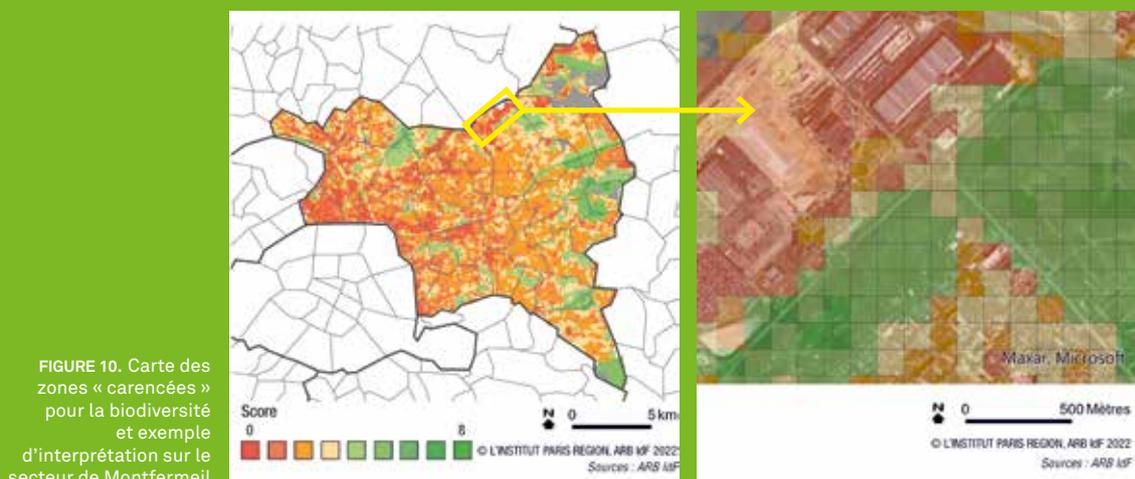


FIGURE 9. Identification des sites désimpermeabilisables dans les secteurs à fort enjeu de renaturation pour la biodiversité sur la commune d'Aulnay-sous-Bois (93).

EXEMPLE D'INTERPRÉTATION SUR LE SECTEUR NORD

Les besoins de renaturation se situent principalement au nord-ouest de la commune, qui correspond à une zone industrielle fortement imperméabilisée. Du point de vue de la biodiversité,

cette zone présente un potentiel particulièrement intéressant car elle se situe dans la continuité du parc du Sausset (au nord-est de la commune), particulièrement remarquable pour sa biodiversité, classé Natura 2000 et identifié comme réservoir de biodiversité dans le SRCE.



RETOURS D'EXPÉRIENCE ET PRÉCONISATIONS

Toute action de renaturation, quelle que soit sa localisation, peut contribuer à améliorer l'état de la biodiversité. Pour autant, ces bénéfices peuvent s'avérer plus ou moins importants selon la localisation du projet. Il est donc nécessaire de contextualiser les actions de renaturation et de ne pas les généraliser à la restauration d'un seul et même type d'habitat. Ce qui peut être bénéfique à un endroit peut se révéler être inefficace et inapproprié ailleurs. Au regard des critères sélectionnés pour cet enjeu, plusieurs types de recommandations peuvent être formulés et encouragés, notamment :

- étendre ou agrandir un réservoir, un patch, ou un espace d'intérêt écologique dont la taille serait jugée insuffisante ;
- rétablir des connexions entre les patches d'habitat et les réservoirs de biodiversité existants ;
- (re)créer un habitat ou une niche écologique pour des espèces fragiles en milieu urbain ou une communauté d'espèces cibles ;
- faciliter la libre évolution ou la reprise d'une dynamique de friches.

Renaturer pour créer ou étendre des habitats existants

Dans cette logique, favoriser l'extension des espaces végétalisés existants peut s'avérer efficace pour étendre le domaine de la nature en ville, en relation avec les seuils présentés en p. 34. Les surfaces à désimperméabiliser seront moindres et le nouvel espace renaturé bénéficiera directement aux espèces initialement présentes dans le parc ou l'espace végétalisé agrandi. Étant donné la proximité avec un espace de

nature existant, les chances de recolonisation seront plus importantes et s'avéreront plus adaptées à une renaturation dite passive. L'extension d'un espace de nature existant peut également viser la conservation de groupes d'espèces spécifiques en s'appuyant sur la connaissance de leur écologie et leur domaine vital (voir annexe 2).

RETOUR D'EXPÉRIENCE 1

RÉHABILITATION DE L'ANCIEN SITE INDUSTRIEL KODAK (ÎLE-DE-FRANCE)

En bref : réhabilitation d'une friche industrielle en un espace de haute qualité écologique.

Après la fin des opérations de démolition et de dépollution du site industriel Kodak à Sevran (93), le terrain de 13 hectares avait été laissé volontairement à l'abandon, permettant à une diversité d'espèces de reconquérir les lieux. En 2015, face aux résultats des inventaires naturalistes, la ville décide de conserver la friche Kodak en l'état : les milieux qui la composent, sa taille et sa localisation, constituent à la fois un refuge pour la biodiversité urbaine ainsi qu'une opportunité de renforcer le maillage écologique d'un territoire fortement urbanisé. En 2017, CDC Biodiversité et la ville de Sevran adoptent un plan de gestion à long terme du site dans le cadre du programme Nature 2050 [26]. Ce document affiche comme objectifs le maintien des habitats existants et la volonté de privilégier à certains endroits une évolution spontanée. Il prévoit entre autres : la restauration écologique de plusieurs zones humides, la reconquête spontanée et l'entretien de milieux herbacés, le maintien de trois hectares boisés en libre évolution et un suivi scientifique pour évaluer l'impact et la pertinence des choix de gestion.



L'ancien site industriel Kodak a été démolit et remplacé par un parc accueillant des habitats d'une grande hétérogénéité ©CDC Biodiversité



À RETENIR

- La richesse biologique des friches est en moyenne supérieure à celle des parcs et jardins entretenus, justement parce que la biodiversité s'y exprime librement.
- Les friches peuvent fonctionner en réseau et agir comme plateformes d'échanges de graines et d'espèces. Les sites d'une taille supérieure à 2 500 m² pourraient favoriser l'échange d'espèces entre friches, réduire le risque d'extinction de populations de plantes et fournir des semences pour coloniser d'autres sites. (Muratet *et al*, 2007).

RETOUR D'EXPÉRIENCE 2

LA RENATURATION DE FRICHES INDUSTRIELLES (HAUTS-DE-FRANCE)

En bref : démarches expérimentales de renaturation de friches en faveur de la biodiversité, de l'alimentation ou de la transition énergétique.

Dans la région Hauts-de-France, l'établissement public foncier (EPF) mène depuis plusieurs années un travail de renaturation des espaces délaissés par les activités industrielles. Sous l'impulsion de son écologue Guillaume Lemoine, de nombreux projets ont vu le jour avec pour objectif la création d'espaces de nature (temporaires ou non), guidés par une approche naturaliste ciblant en particulier la flore et les cortèges d'insectes.

Le site de Lens-Van Pelt (3,5 hectares) était une friche occupée par d'anciennes usines qui ont été démolies par l'EPF en vue d'un projet de densification urbaine. Plus de dix ans après les travaux de déconstruction, le contexte économique et immobilier a changé et les collectivités ont demandé à l'EPF de réorienter le projet vers la création d'un cœur de nature permettant de faire écho au Plan forestier régional prévoyant « 1 million d'arbres pour les Hauts-de-France ». Les travaux de renaturation ont permis la plantation d'une forêt urbaine avec des végétaux labellisés Végétal local®, la création d'ambiances forestières variées, la restauration de pelouses sèches et de friches xérophiles. Des abris pour les chiroptères et des milieux sablonneux pour les hyménoptères ont été réalisés à partir des matériaux initialement présents sur place. Un parcours d'interprétation va être installé pour permettre aux personnes habitant à proximité de découvrir les écosystèmes nouvellement créés. Une fois le projet terminé, la commune de Lens va procéder à une modification de son PLU pour classer le site en zone naturelle et le protéger de tout projet d'urbanisation. Des inventaires faune-flore sont régulièrement réalisés par l'EPF pour suivre l'évolution et le succès de la renaturation.

Sur le site d'Houplines Hâcot-Colombier (2,5 hectares), 12 hectares de foncier sont en attente d'un nouveau quartier qui sera construit en lieu et place d'un chapelet d'espaces industriels en friche. Pen-

dant cette période d'attente, le site fait l'objet d'une renaturation temporaire et accueille un projet d'agriculture urbaine transitoire (potagers, aromatiques). Une concertation avec les différentes parties prenantes a été mise en place en amont du projet pour définir la trajectoire de ce « tiers lieu urbain », incluant spécialistes de l'inclusion sociale et thérapeutique, producteurs de compost et jardiniers. Les étapes de la renaturation consistent à mettre en œuvre des travaux de déconstruction, à traiter les pollutions existantes, mais aussi de maintenir l'espace boisé existant. Afin d'améliorer la qualité agronomique des sols, l'EPF a entrepris des semis d'engrais verts (fabacées, phacélies) et de prairies fleuries. Il a également engagé une culture de chanvre textile pour produire de la biomasse et alimenter en paillage les espaces verts de la commune, un usage « économique » d'attente permettant de tester les itinéraires techniques de culture du chanvre en espace urbain. La suite du programme réalisé par l'EPF pourrait être la mise en place de compléments de cultures et d'un maillage bocager pour la production de biomasse, ou encore la création d'une pépinière d'arbres régionaux pour fournir le territoire régional.

Sur le site de Roubaix-GTI Sodifac (2,2 hectares), les délais de révision du PLUi et de consultation d'opérateurs rendent le terrain vacant pendant quelques années. Des mélanges de céréales et de légumineuses (luzerne, vesce) ont été implantés pour tester l'intérêt de ces espaces transitoires à fournir de la biomasse pour le méthaniseur de la métropole et réduire la dépendance aux énergies fossiles sans faire concurrence aux cultures alimentaires. Un partenariat technique avec l'école d'agriculture de Lille (JUNIA-ISA) a permis de déterminer les mélanges à tester, d'évaluer la qualité agronomique des sols et de suivre les éventuelles contaminations de productions. À ce stade, l'EPF a réalisé des travaux de déconstruction et de dépollution du site, a effectué des semis de prairies fleuries pour la biodiversité et a mis en place les cultures de divers mélanges. Un projet similaire est en cours sur le site de Lille-Hellemmes-Québecor (1,5 à 2 hectares), qui a impliqué par ailleurs la déconstruction d'une ancienne usine (recyclage des bétons et des ferrailles). La plupart des arbres présents sur la friche ont été préservés tandis qu'une pépinière a été créée sur le site pour conserver les arbres et arbustes déplantés.



Prairie fleurie temporaire sur le site d'Houplines. ©EPF Hauts-de-France

À RETENIR

- Des sites en attente d'urbanisation peuvent faire l'objet d'une renaturation temporaire permettant de tester des méthodes de restauration écologique ou d'expérimenter la mise en place de filières locales (pépinières, parcelles cultivées, biomasse, etc.).
- La concertation avec les habitants et les différentes parties prenantes permet de faire émerger des projets de territoire répondant à des besoins locaux.
- La démarche de l'EPF Hauts-de-France se distingue par sa compréhension des enjeux naturalistes et sa capacité à faire de la biodiversité un atout, là où d'autres aménageurs la considèrent comme un risque (présence d'espèces protégées, usages temporaires non désirés).



Améliorer la trame verte et bleue et résorber des discontinuités écologiques

La renaturation en ville peut également contribuer à renforcer la connectivité écologique et participer au rétablissement de trames vertes, bleues, brunes ou noires. Des sites judicieusement choisis peuvent permettre de résorber une discontinuité entre deux habitats adjacents, d'élargir un corridor existant ou de créer un habitat supplémentaire servant de « pas japonais ». L'hétérogénéité des habitats recréés et les modes gestion seront aussi déterminants pour garantir la fonctionnalité des différentes trames. La méthodologie proposée offre une première approche des secteurs dans lesquels la renaturation permettrait d'améliorer la connectivité écologique mais des études complémentaires devront être réalisées à l'échelle locale afin de répondre aux exigences des espèces cibles et des trames concernées.

RETOUR D'EXPÉRIENCE 3

RENATURATION DE FRICHES DANS LA COMMUNAUTÉ D'AGGLOMÉRATION MAUBEUGE-VAL DE SAMBRE (HAUTS-DE-FRANCE)

En bref : renaturation de friches industrielles dans le cadre du renforcement de la trame verte et bleue.

Dans un contexte de désindustrialisation massive, la communauté d'agglomération Maubeuge-Val de Sambre s'est engagée avec de nombreux partenaires associatifs et institutionnels pour la renaturation de friches industrielles. La plupart du temps, il s'agit d'anciens espaces bâtis qui ont été dépollués, désimperméabilisés, restaurés et rendus à la nature de manière spontanée. Cette démarche est d'autant plus intéressante que la collectivité a préalablement

identifié et cartographié ces sites afin d'élaborer une stratégie de renaturation qui permette de renforcer les continuités écologiques de son territoire. À titre d'exemple, l'ancien site HK Porter sur lequel était implanté une aciérie pour la fabrication de wagons et de locomotives est aujourd'hui inscrit comme corridor écologique dans le schéma de la trame verte et bleue du Val de Sambre. Ce site, composé en grande partie d'une zone humide et d'un bois en libre évolution, présente aussi plusieurs secteurs de pelouses pion-

nières sur lesquelles se sont développés de larges tapis d'une plante patrimoniale, la Pyrole à feuilles rondes (*Pyrola rotundifolia*). Sur une ancienne centrale thermique (site de Pantegnies) des travaux de désimperméabilisation et de restauration ont permis de recréer un marais et de rouvrir des prairies humides. Ce site est aujourd'hui inscrit comme réservoir de biodiversité dans le schéma de la TVB du Val de Sambre et classé réserve naturelle régionale.



Requalification de l'ancien site industriel HK Porter en friche depuis vingt-cinq ans en corridor écologique, renommé « Les Portes des Marpiniaux ». ©CAUE Nord

À RETENIR

- Une fois renaturés, les collectivités peuvent envisager de classer ces espaces en zone N dans les documents d'urbanisme afin de protéger les sites.
- L'ADEME a publié en 2014 un guide à l'attention des collectivités, des aménageurs et des promoteurs sur la prise en compte de la biodiversité et la reconversion des friches urbaines polluées. En 2018, l'association Humanité & Biodiversité a également publié un recueil sur la renaturation des friches urbaines et périurbaines. La renaturation d'anciennes friches peut s'effectuer en conservant l'esprit du site industriel, souvent cher à la population.

RETOUR D'EXPÉRIENCE 4

DÉCONSTRUCTION DE BÂTIMENTS, UNE OPTION POUR LA RENATURATION ? (ÉTATS-UNIS)

En bref : étude à Cleveland du potentiel de démolition de bâtiments sur des terrains vacants pour accueillir la biodiversité urbaine.

Aux États-Unis, la ville de Cleveland (Ohio) a subi une crise industrielle et démographique sans précédent entraînant la fermeture de nombreuses usines. Entre 2006 et 2010, le département du logement de la ville a ainsi démoli 5 152 bâtiments (usines et maisons individuelles), entraînant une augmentation importante du nombre de terrains vacants. Aujourd'hui, la ville compte près de 1 400 hectares de friches, dont une grande partie appartient à la municipalité. Cette situation inédite s'est transformée en opportunité pour réimaginer la ville et étudier le rôle de ces espaces pour la biodiversité urbaine. Dans une étude prospective, plusieurs scénarios ont été proposés pour redonner des usages aux sites libérés des constructions, comme l'agriculture urbaine, la gestion de l'eau par des espaces naturels (solutions fondées sur la nature), la création d'espaces verts pour la population ou encore le développement des énergies renouvelables [27].

Entre 2013 et 2019, le rôle de ces terrains vacants en tant qu'habitats potentiels pour les insectes pollinisateurs a été étudié (Gardiner *et al.*, 2013 ; Turo et Gardiner, 2019). Quarante parcelles ont fait l'objet d'inventaires. Malgré leur petite taille, tous les lots abritaient des populations d'abeilles sauvages importantes et diversifiées. Au total, 107 espèces ont été inventoriées, pour la plupart indigènes, représentant environ 20% du total des espèces d'abeilles présentes dans l'Ohio. Ces recherches montrent que des sols nouvellement libérés du recouvrement de bâtiments peuvent devenir en quelques années des sites d'accueil pour la biodiversité. Les observations ont confirmé l'importance de la végétation pionnière et spontanée pour les abeilles sauvages, ainsi que celle des espèces plantées intentionnellement pour les pollinisateurs. À l'échelle du paysage, l'ensemble de ces terrains vacants et leur fonctionnement en réseau est un facteur important pour le maintien des communautés d'abeilles. Alors que la déconstruction de bâtiments est encore peu fréquente en ville et difficile à mettre en œuvre, le cas de Cleveland offre un exemple inédit de dé-densification de la ville et de reconstitution d'un réseau de milieux prairiaux gérés de manière extensive participant activement à la trame verte urbaine.



Démolition de bâtiments à Cleveland. ©Turo and Gardiner, 2020 [28]

À RETENIR

- Dans certains contextes de déprise urbaine, la déconstruction de bâtiments et d'infrastructures peut permettre de renaturer une multitude de zones imperméabilisées et de reconstituer des réseaux écologiques.
- La restauration de continuités écologiques en milieu urbain peut consister à reconnecter des patchs d'habitats isolés, à élargir des patchs ou des corridors écologiques existants ou à créer des « pas japonais »* entre les habitats au sein de la matrice urbaine.
- Le protocole Florilèges-prairies permet d'améliorer les connaissances de l'effet des pratiques de gestion sur la qualité écologique des prairies, mais également de la dynamique de l'évolution de ces milieux grâce à un suivi standardisé de la flore des prairies urbaines [29]. Plusieurs outils sont fournis aux gestionnaires : un livret d'accompagnement au protocole, des fiches de terrain complétées d'un guide d'identification des plantes (La Clé des prairies. Flore des prairies urbaines de la moitié nord de la France).

* Un « pas japonais » est un corridor écologique discontinu, formé d'une ponctuation d'espaces-relais ou de refuges (mares permanentes, bosquets présents sur les parcelles cultivées, etc.)

RETOUR D'EXPÉRIENCE 5

**RESTAURATION D'UN COURS D'EAU URBAIN
ET CRÉATION D'UN RÉSEAU DE MARES
(GRAND EST)**

En bref : restauration d'un cours d'eau et création d'un corridor permettant le déplacement du Crapaud vert (*Bufo viridis*).

Dans les années 2000, l'Eurométropole de Strasbourg entreprend de résorber une discontinuité écologique identifiée dans son schéma TVB. L'objectif du projet est triple : renaturer le cours d'eau Ostwaldergraben en mauvais état écologique, créer un corridor pour permettre le déplacement du Crapaud vert (*Bufo viridis*) entre les deux zones humides situées en amont et

aval du site, et créer de nouveaux sites de reproduction de l'espèce. En 2012 et 2015, plusieurs travaux ont été réalisés. Les sols pollués au chrome ont en grande partie été évacués, et les vases polluées retirées du milieu naturel. Le lit majeur du cours d'eau a été rétréci et reméandré pour redynamiser son écoulement, et les merlons de terres longeant l'Ostwaldergraben ont été retirés pour le reconnecter physiquement au lit mineur. Pour pallier la discontinuité écologique identifiée sous le pont de la route d'Ostwald, des banquettes sont aménagées afin de permettre un passage à sec de la faune. Un réseau de mares a par ailleurs été créé le long du cours d'eau, et vient ainsi renforcer le corridor écologique. Plusieurs inventaires naturalistes ont depuis montré l'efficacité de ces aménagements, les Crapauds verts ayant colonisé le site et s'y étant reproduits dès l'année des travaux.



Recolonisation spontanée de la flore dans le lit et sur les abords de l'Ostwaldergraben renaturé. ©Rémy Gentner

À RETENIR

- La notion de connectivité étant difficile à appréhender et variable d'une espèce à l'autre, il est possible de s'appuyer sur des valeurs moyennes issues d'études scientifiques et applicables à plusieurs groupes d'espèces. À titre d'exemple, plusieurs études indiquent qu'un espace vert distant de plus de 300 m d'un autre est considéré comme déconnecté pour les papillons (Shwartz *et al*, 2013), les plantes (Muratet *et al*, 2008) et les oiseaux (Hostetler et Holling, 2004).
- En milieu naturel, plus les corridors sont larges et continus, plus ils sont efficaces et favorables à de nombreuses espèces (Ford *et al*, 2020). Ce principe peut être également appliqué en milieu urbain, en privilégiant de larges corridors, par exemple le long des cours d'eau ou des infrastructures linéaires. Le dimensionnement varie cependant en fonction des espèces ciblées et nécessite une étude préalable.
- La multiplication de petits espaces de nature connectés entre eux peut s'avérer efficace. Une étude suisse montre que des espaces inférieurs à 20 m² peuvent servir d'habitats à plusieurs espèces. Le maillage de ces espaces doit être maintenu avec des distances inférieures à 50 - 200 m, d'autant plus s'ils sont situés en zones denses où les grands espaces verts sont rares (Vega et Küffer, 2021).

RETOUR D'EXPÉRIENCE 6

LA RENATURATION DES BERGES VIA LE GÉNIE VÉGÉTAL (ÎLE-DE-FRANCE)

En bref : renaturation et gestion des berges de Seine par une association d'insertion sociale et professionnelle.

Le cœur de la région Île-de-France présente des kilomètres de berges artificielles (enrochements, digues en béton, palplanches), notamment le long de la Seine. Le déclin des berges naturelles a notamment entraîné la perte d'habitats pour la faune. Depuis 1995, l'association Espaces [30] travaille à la renaturation des berges de la Seine afin de restaurer les corridors écologiques et les fonctions de ces écosystèmes (régulation de la qualité physico-chimique et hydromorphologique du cours d'eau). L'association utilise des techniques de génie écologique comme les fascines de saules ou les bancs d'hélophytes pour

limiter l'érosion des berges et restaurer les habitats. Dans certains secteurs, de nouveaux milieux ont été implantés, tels que des roselières ou des radeaux végétalisés. Au total, au niveau de l'île Saint-Germain à Issy-les-Moulineaux, 575 m de berges et 300 m de remblais ont été restaurés grâce à ces techniques. Ces actions permettent d'augmenter les surfaces phyto-épuratrices et donc d'améliorer la qualité de l'eau. Elles peuvent aussi contribuer à augmenter la diversité d'espèces de la Seine, qui comptait 4 espèces de poissons dans les années 1970 contre une trentaine actuellement. Des oiseaux comme le Martin-pêcheur d'Europe, qui niche au ras de l'eau dans les berges meubles, sont présents dans ce secteur pourtant fortement urbanisé. Ces travaux s'inscrivent depuis 2014 dans le cadre du contrat Eau, trame verte et bleue, climat Plaines et coteaux de la Seine centrale urbaine, dont l'association est par ailleurs chargée de l'animation [31].



Fascinage de saules réalisé par l'Association Espaces sur l'île Saint-Germain à Issy-les-Moulineaux (92) pour stabiliser et revégétaliser les berges.
©Association Espaces

À RETENIR

- Grâce à son réseau racinaire, la végétation protège les berges de l'érosion. Par ailleurs, la végétation protège les berges du battillage provoqué par les vents ou les passages de bateaux.
- Plusieurs techniques de génie végétal existent. Le fascinage (branches vivantes de saules) suivi de semis de végétaux adaptés est souvent utilisé.
- La renaturation des berges urbaines participe au ralentissement de l'écoulement de l'eau (et donc réduit les risques d'inondations en aval), à son épuration, au piégeage des sédiments et à la régulation de la température de l'eau.
- Dans le cadre de l'élaboration du SRCE d'Île-de-France, de nombreuses ruptures de continuités écologiques ont été identifiées sur les cours d'eau. La désartificialisation des obstacles (barrages, retenues, écluses et seuils) représente un enjeu majeur de renaturation.

RETOUR D'EXPÉRIENCE 7**RENATURER POUR RECONSTITUER
DES TRAMES BRUNES (NORMANDIE)**

En bref : déminéralisation et végétalisation d'alignement d'arbres permettant d'améliorer la gestion des eaux pluviales et de reconstituer une trame brune.

Afin d'améliorer la gestion des eaux pluviales et de réduire le phénomène d'îlot de chaleur urbain, de nombreuses municipalités se sont engagées à déminéraliser certaines portions de l'espace public et à rouvrir les sols le long des voiries. La ville de Caen a lancé en 2020 un programme ambitieux de déminéra-

lisation et de végétalisation des alignements d'arbres présents sur ses trottoirs et sa voirie et prévoit de retirer à terme 4 hectares de revêtement d'ici 2023. Une première vague de travaux a déjà permis de retirer près de 5 000 m² sous plusieurs alignements d'arbres. L'objectif visé est de rétablir un continuum au niveau des sols (trame brune) afin de faciliter le développement des arbres et les échanges dans le sol via leurs racines, mais aussi avec le réseau fongique. La déminéralisation est également l'occasion de végétaliser les pieds d'arbres et améliorer la connectivité pour les plantes et les insectes le long des alignements. À ce jour, environ 2 hectares ont été restitués à la nature aux pieds des arbres d'alignement.



À Caen, la rue Eugène-Boudin (peintre normand) a repris de belles couleurs en 2021 à la suite du retrait du revêtement de voirie. ©Ville de Caen

RETOUR D'EXPÉRIENCE 7BIS

RENATURER POUR RECONSTITUER DES TRAMES BRUNES (SUISSE)

En bref : reconfiguration des fosses de plantations d'arbres d'alignement.

Au-delà du retrait du revêtement de surface, il peut s'avérer pertinent de restaurer la trame brune en profondeur en supprimant ou en reconfigurant les fosses d'arbres individuelles pour recréer des fosses contiguës. Dans le cadre du projet NOS-ARBRES (2016-2018), le canton de Genève a produit une synthèse de bonnes pratiques de plantations pour les nouveaux arbres et encourage la mise en place de fosses contiguës dotées d'un volume suffisant pour permettre aux grands arbres d'atteindre leur potentiel d'épanouissement (idéalement de 15 à 100 m³ de fosse par grand arbre), à la place des fosses individuelles. Ces mesures ont entraîné une croissance des arbres bien plus rapide et saine. Les techniciens du canton de Genève recommandent de planter des massifs avec des structures complexes (c'est-à-dire planter de grands et petits arbres simultanément),

des assemblages d'espèces variées, avec des arbres qui se touchent, dans des fosses contiguës [32].

Renaturer pour diversifier les habitats dans la matrice urbaine

Dans certains cas, la renaturation peut permettre de créer de nouveaux habitats propices au vivant en ciblant des cortèges spécifiques ou en orientant la renaturation vers une trajectoire particulière (prairie urbaine, boisement, pelouse naturelle, milieu sablonneux, etc.). Dans tous les cas, la diversification des habitats permet de multiplier les conditions de vie propices à l'installation d'une multitude d'espèces aux exigences écologiques différentes. Cette réflexion doit se faire à l'échelle de la commune, mais peut aussi concerner l'échelle du site en prévoyant une diversité d'habitats. Par exemple, la diversification des strates de végétation (herbacée, arbustive et arborée) offre une diversité de conditions d'accueil pour les espèces (Brunbjerg *et al*, 2018). Dans d'autres cas, il est possible de mettre en œuvre une approche centrée sur une ou des communautés d'espèces afin de favoriser certains groupes ou un milieu particulier.

Une expérimentation à Genève montre que la croissance des arbres est bien plus rapide et saine en l'absence de fosses individuelles. ©L. Chabbey, M. Schaller, P. Boivin, HEPIA, Genève



À RETENIR

- La mise en place de trames brunes assurant la continuité des sols permet d'augmenter le volume de terre exploitable par les racines des arbres et de faciliter l'infiltration des eaux pluviales. Elles permettent aux arbres de se connecter au niveau des racines et d'échanger des nutriments et informations.
- Les espèces présentes dans le sol, telles que les champignons, les unicellulaires, les vers ou encore les petits arthropodes, ont aussi besoin de se déplacer (Mathieu, 2015) pour accomplir leur cycle de vie, se reproduire, échapper à des changements ponctuels dans leur environnement, ou recoloniser un milieu après un épisode de mortalité, etc. (Chalot, 2016).
- La déminéralisation et la végétalisation des pieds d'arbres permettraient une meilleure colonisation par les plantes sauvages (Morel, 2010), en faisant office de « pas japonais » (Pellegrini *et al*, 2010).

RETOUR D'EXPÉRIENCE 8

**RENATURATION D'UN CIMETIÈRE À
VERSAILLES POUR AMÉLIORER L'ACCUEIL
DES ESPÈCES SAUVAGES (ÎLE-DE-FRANCE)**

En bref : renaturation de diverses portions imperméabilisées d'un cimetière (trottoirs, espaces entre les sépultures), semis d'espèces locales, et mise en place d'un suivi écologique via des protocoles de sciences participatives.

En France, les cimetières sont des espaces très minéraux laissant peu de place à la flore spontanée, souvent mal perçue par les usagers et usagères. Les alignements de pierres de marbre et de caveaux en béton, séparés par des allées de schistes ou de graviers occupent l'essentiel de l'espace, au détriment de la végétation. L'utilisation d'herbicides a longtemps été la solution la plus pratique pour le désherbage de ces espaces. Avec la montée des inquiétudes vis-à-vis des biocides et l'interdiction de l'usage des pesticides à partir de 2019, issue de la loi du 6 février 2014 visant

à mieux encadrer l'utilisation des produits phytosanitaires sur le territoire national, aussi appelée loi Labbé, les communes sont de plus en plus enclines à réduire voire supprimer l'utilisation des pesticides et à renaturer les cimetières. C'est le cas de la ville de Versailles qui a cessé en 2009 tout traitement chimique dans les 4 cimetières dont la surface totale atteint 18,5 hectares.

Sur le cimetière des Gonards, la ville a entrepris la renaturation de plusieurs portions minéralisées, avec pour objectif de rendre ce lieu plus accueillant pour la faune et la flore spontanées. Certains trottoirs ont été désimperméabilisés, tout comme des cheminements et des espaces entre les sépultures. Un travail a été mené pour laisser des espaces en prairie, semer des espèces diversifiées et locales, et assurer un suivi de la flore et la faune via les protocoles de sciences participatives Propage, Florilèges-prairies urbaines et Mission Hérisson (voir p. 103). Ces opérations ont également permis d'améliorer l'acceptation de la gestion écologique par une communication active envers la population. Les cimetières versaillais ont reçu le label EcoJardin en 2012, gage de leur bonne gestion écologique.



Premier cimetière labellisé EcoJardin en 2012, le cimetière des Gonards est devenu aujourd'hui une composante de la trame verte urbaine.
©Marie Wagner

À RETENIR

- La gestion des espaces renaturés s'avère tout aussi essentielle pour restaurer et accroître la biodiversité. Il s'agit de mettre en place une gestion écologique voire une non-gestion. Ce choix dépendra des lieux considérés et devra être accompagné d'une mise en scène du changement et d'une communication adaptée et appuyée, au risque de s'exposer à un rejet de la part des riverains ou usagers.
- Mettre en place un suivi scientifique permet d'évaluer son projet de renaturation et l'impact de son plan de gestion sur les espèces. Il est possible et recommandé de mettre en place des protocoles simplifiés mais néanmoins standardisés, comme certains des protocoles de sciences participatives proposés par le Muséum national d'Histoire naturelle via son programme « Vigie-Nature » (voir p. 103).

RETOUR D'EXPÉRIENCE 9

LA RENATURATION D'HABITATS TERRICOLES POUR LES ABEILLES SAUVAGES À LILLE (HAUTS-DE-FRANCE)

En bref : création d'un réseau de sites de nidification contribuant à la conservation des abeilles sauvages.

En 2010, la ville de Lille a pris conscience de la grande diversité des pollinisateurs sauvages à la suite d'un inventaire des abeilles sauvages sur le Parc de la Citadelle réalisé en 2010. Depuis, près de 120 taxons d'abeilles ont été identifiés sur l'ensemble de la commune. Ce groupe d'insectes comprend des espèces dépendantes d'une flore spécifique mais aussi de sols bien particuliers indispensables à leur reproduction. Il s'agit de sols faiblement couverts par la végétation, souvent pauvres en nutriments et capables de se réchauffer rapidement (sol mésotrophe voire oligotrophe, limoneux, argileux, sableux). En plus du développement de prairies diversifiées riches en fabacées et de l'augmentation des surfaces de plantes

hôtes pour des espèces cibles d'abeilles, la ville a créé un réseau de sites de nidification pour les espèces liées aux sols sableux, limono-sableux et argileux. Ce réseau a été conçu à partir des dernières populations identifiées et de la trame verte existante. Au total, la restauration de ces habitats a été déployée sur 8 sites, avec des volumes de sols allant de 4 à 20 m³ selon les réalisations, et a conduit à retrouver les espèces végétales nécessaires au développement de l'ensemble du cycle des espèces terricoles, comme l'Odontite rouge (*Odontites rubra*), la Vipérine commune (*Echium vulgare*), la Salicaire commune (*Lythrum salicaria*), la Lysimaque commune (*Lysimachia vulgaris*), des saules, des résédas, etc.

Le suivi effectué a permis de confirmer le succès de ces aménagements pour les hyménoptères, dont des abeilles comme les andrènes (par exemple l'Andrène vague (*Andrena vaga*) ou la Colette du lierre (*Colettes hederæ*), ainsi que des guêpes fouisseuses qui profitent des mêmes habitats pour nicher. Un entretien minime est prévu pour arracher l'excédent de graminées, favorisées dans une région où la pluie est fortement chargée en azote.



Yohan Tison, écologue de la ville de Lille, devant un talus restauré en faveur des hyménoptères terricoles. ©Denis Lagache, Association Les Blongios

À RETENIR

- Cette action s'appuie sur de fortes connaissances naturalistes et s'intéresse aux besoins écologiques des abeilles sauvages dont la majorité des espèces (70%) nichent au sol.
- Afin de limiter les concurrences entre abeilles domestiques et sauvages à Lille, aucune ruche nouvelle n'a été installée dans les secteurs identifiés pour le renforcement des populations d'abeilles sauvages.
- L'ensemble des nouvelles plantations, que ce soit pour le fleurissement urbain ou pour les nouveaux aménagements privilégie le choix de végétaux d'origine locale, y compris en termes de production, aux qualités d'accueil et d'offre nectarifère et pollinifère reconnues.

RETOUR D'EXPÉRIENCE 10

LEE « BEETLE BUMP » À LONDRES
(ROYAUME-UNI)

En bref : opération de renaturation visant à recréer l'habitat d'une espèce dont le dernier habitat avait été détruit.

Au Royaume-Uni, la restauration d'un habitat pour le carabe Bombardier escopette (*Brachinus sclopeta*) est un exemple remarquable de renaturation centrée sur une espèce. Associé à des friches industrielles dans la zone des Docklands de Londres, le dernier site connu du Bombardier escopette a dû être démoli pour un nouvel aménagement. Dans le cadre de mesures compensatoires accompagnées par Buglife (the Invertebrate Conservation Trust) et l'University of East London, les réflexions ont conduit à la création de la Beetle Bump, une opération de renaturation

imitant les caractéristiques d'une friche urbaine et reproduisant l'habitat du bombardier. Des mélanges d'agrégats recyclés à faible teneur en nutriments ont été apportés, ainsi que des semis de fleurs sauvages typiques des friches industrielles de la région (Connop S. et al, 2018).

Les carabes bombardiers sauvés du site de construction ont été transférés sur le Beetle Bump. Les inventaires réalisés après les opérations ont montré la qualité de l'habitat pour le bombardier ainsi que pour d'autres cortèges d'espèces. Dans le cadre de sa thèse, la chercheuse britannique Caroline Nash (2017) propose des méthodes de restauration similaires inspirées des habitats retrouvés au sein des friches. Cette démarche d'éco-mimétisme centrée sur les communautés d'espèces et leurs habitats cherche à faire évoluer les pratiques actuelles de paysage (Nash, 2017).

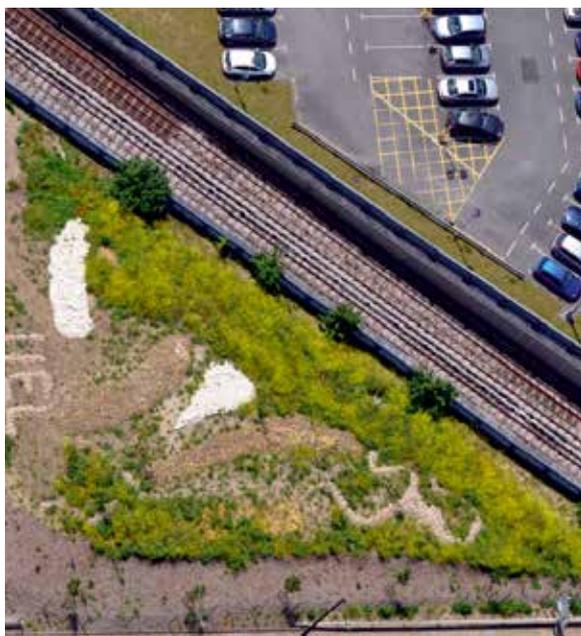


Photo aérienne de la création de l'habitat du Bombardier escopette à l'Université de Londres-Est sur le Docklands Campus.
©Stuart Connop – Sustainability Research Institute



Le carabe Bombardier escopette (*Brachinus sclopeta*).
©Stuart Connop – Sustainability Research Institute

À RETENIR

- Il est possible de restaurer des habitats favorables à une espèce ou une communauté d'espèces cibles. Dans ce cas, il est fortement conseillé de se faire aider par des associations naturalistes, écologues ou naturalistes indépendants.
- La renaturation n'a de sens que si les milieux restaurés sont pérennisés dans le temps. À cet effet, les collectivités disposent de plusieurs outils pouvant aller de l'acquisition foncière à la protection réglementaire via leurs documents d'urbanisme (voir partie 107).

RENATURER AVEC UN OBJECTIF D'ADAPTATION AU CHANGEMENT CLIMATIQUE

Les conséquences du changement climatique sont déjà visibles en Île-de-France, matérialisées par l'élévation des températures moyennes (réchauffement moyen d'environ 2 °C depuis 1950), des vagues de chaleur en augmentation, des vagues de froid et de gel en régression, des sécheresses estivales et des épisodes pluvieux plus intenses (Vautard *et al.*, 2021). Les phénomènes extrêmes (canicules, inondations) sont aussi amenés à augmenter à l'avenir en fréquence, en intensité et en durée. L'imperméabilisation et la minéralité des villes accentuent les effets du changement climatique, qu'il s'agisse du ruissellement ou des températures urbaines dont l'écart avec les zones rurales en période de canicule peut atteindre +10 °C. S'il existe différentes stratégies pour s'adapter aux effets du changement climatique, celles qui misent sur l'utilisation de la nature, couramment appelées « solutions d'adaptation fondées sur la nature » sont à privilégier au regard de leurs cobénéfices sur la biodiversité et la santé humaine. Les opérations de renaturation d'espaces urbains imperméabilisés peuvent répondre à ces besoins par la reconquête d'espaces naturels dédiés à la lutte contre le ruissellement et le risque d'inondation ou au rafraîchissement face aux îlots de chaleur.

Afin de localiser les secteurs les plus vulnérables au changement climatique et maximiser l'efficacité des actions de renaturation au regard de cet objectif, l'ex-

position du territoire à l'effet d'îlot de chaleur urbain (ICU), au ruissellement et au risque d'inondation par débordement a été analysée.

LES CRITÈRES POUR LOCALISER LES ZONES PRIORITAIRES

Exposition à l'effet d'îlot de chaleur urbain

En ville, les surfaces minérales et les bâtiments absorbent et restituent le rayonnement solaire, entraînant un réchauffement de l'air urbain. Ces caractéristiques font partie des nombreux facteurs intervenant dans le phénomène d'îlot de chaleur urbain (ICU), occasionnant des températures plus élevées dans les zones denses urbaines que dans les zones rurales. Pour une grande agglomération comme Paris, l'écart observé (températures nocturnes) ces dernières années entre les zones les plus denses au centre et les bois de Boulogne et Vincennes est de l'ordre de 4 °C sous des conditions estivales standards (été 2000) mais peut être beaucoup plus élevé en période de canicule : 8 °C en 2015 et 10 °C en 2003 [33]. Ce phénomène a de nombreux effets délétères sur la santé et le bien-être, la consommation d'énergie (climatisation) et sur la biodiversité (stress hydrique, augmentation de la mortalité des espèces).

CRITÈRES	SEUILS	SCORE	SOURCE
Effet d'ICU	Fort	0	Cordeau, 2017
	Moyen	1	
	Faible	2	
	Rafraîchissant	3	
Exposition au ruissellement	Forte	0	L'Institut Paris Region
	Moyenne	1	
	Faible	2	
Exposition au risque d'inondation	Forte	0	L'Institut Paris Region
	Moyenne	1	
	Faible	2	

TABLEAU 5. Synthèse des critères, seuils et ressources bibliographiques utilisés pour identifier les secteurs urbains les plus vulnérables au changement climatique

L'exposition des territoires aux ICU a été analysée depuis l'indicateur «Aléa jour» produit dans le cadre du projet «Adapter l'Île-de-France à la chaleur urbaine» (Cordeau, 2017). L'effet d'ICU représente ici un aléa⁶, qui traduit la probabilité d'aggravation locale des vagues de chaleur. L'indicateur «Aléa jour» est calculé à partir des paramètres générant les ICU : imperméabilisation des sols, nombre de surfaces bâties, ventilation des quartiers, propriétés thermiques des matériaux, ombrage lié aux arbres.

Selon ces paramètres, une zone présentera un potentiel d'aggravation de l'aléa (augmentant alors l'effet de la vague de chaleur) ou bien un potentiel de diminution (par exemple dans le cas des îlots de fraîcheur). Dans le cadre de l'analyse conduite ici, un score de 0 est attribué à une maille présentant un potentiel d'aggravation fort, un score de 1 pour un potentiel d'aggravation moyen, un score de 2 pour un potentiel d'aggravation faible et un score de 3 pour un potentiel de rafraîchissement.

Exposition au ruissellement

Le ruissellement en milieu urbain est amené à être de plus en plus récurrent avec l'augmentation des pluies intenses, amplifiée du fait de l'artificialisation croissante des sols. En plus de participer au risque

d'inondation, le ruissellement contribue également à dégrader la qualité des cours d'eau. Lors d'évènements pluvieux intenses, de nombreux réseaux sont saturés, et les eaux de ruissellement se mélangent avec les eaux usées. Au niveau des déversoirs d'orage, la surcharge du système de collecte des eaux vers la station d'épuration peut engendrer des déversements d'eaux polluées dans les milieux naturels et ce même lors de pluies courantes [34].

L'exposition au ruissellement a été étudiée en prenant pour base l'indice de ruissellement établi par L'Institut Paris Region. Ce dernier croise différents jeux de données comme l'occupation du sol (regroupés en 3 catégories : espaces fortement imperméabilisés; espaces moyennement imperméabilisés; espaces faiblement imperméabilisés) ainsi que le risque d'amplification du ruissellement du fait de la topographie du territoire (étudié en distinguant 3 catégories de pentes : forte, moyenne et faible)⁷.

Les valeurs associées à chacune de ces catégories sont résumées dans le tableau page suivante. Les valeurs cumulées sont reclassées pour obtenir un score compris entre 0 et 2 (valeur de droite) reflétant l'exposition au risque de ruissellement en fonction de la pente et du degré d'imperméabilisation des sols. Un score est enfin attribué aux mailles en fonction du risque majoritaire : une exposition forte au ruissellement vaut un score de 0, une exposition moyenne un score de 1, et une exposition faible un score de 2.

6. Un aléa est un phénomène résultant de facteurs ou de processus échappant au contrôle humain, et dont le déroulement n'est pas entièrement prévisible. Il peut se transformer en risque s'il est croisé avec la présence d'enjeux (humains, économiques, environnementaux).

7. Pour plus de détails, voir annexe 3



En ville, le ruissellement est amplifié par l'imperméabilisation des sols. ©Nicolas Hannetel / Agence de l'Eau Seine-Normandie

IMPER- MÉABILISATION \ PENTE	PENTE		
	FORTE (= 0)	MOYENNE (= 1)	FAIBLE (= 2)
FORTE (= 0)	0 → 0	1 → 0	2 → 1
MOYENNE (= 1)	1 → 0	2 → 1	3 → 2
FAIBLE (= 2)	2 → 1	3 → 2	4 → 2

TABLEAU 6. Représentation croisée permettant d'étudier l'exposition au risque de ruissellement en fonction de la pente et du degré d'imperméabilisation des sols

Exposition au risque d'inondation

Les crues sont des phénomènes naturels qui peuvent se traduire par des inondations. Les inondations constituent un risque majeur sur le territoire national, qui concerne près de 17 millions de personnes [35]. Elles sont responsables, en France métropolitaine, de l'essentiel des dommages dus aux catastrophes naturelles [36]. Or, l'augmentation des précipitations extrêmes associées au changement climatique risque d'amplifier ce phénomène, y compris en Île-de-France (Coppola *et al.*, 2021 ; France, 2020).

Les crues et inondations ne dépendent pas seulement de la pluviométrie mais aussi de l'adaptation des bassins versants, de la gestion des cours d'eau, de l'utilisation des terres et de l'imperméabilisation des sols. Afin de pouvoir étudier les impacts cumulés de l'artificialisation du territoire et de l'intensité potentielle des inondations, différents jeux de données ont

été croisés. L'occupation du sol a été regroupée en 3 catégories : espaces non bâtis ; espaces bâtis ouverts (parcs, cimetières, etc.) ; espaces bâtis denses (habitations, zones d'activités, etc.). Le risque d'inondation est quant à lui étudié en distinguant trois catégories d'aléas : aléa faible ; aléa fort ; aléa très fort (plus de détails en annexe 4).

Les valeurs associées à chacune de ces catégories sont résumées dans le tableau ci-dessous, puis reclassées pour avoir un score compris entre 0 et 2 (valeurs en gras). Ceci permet d'obtenir une information reflétant l'exposition au risque d'inondation en fonction de l'occupation au sol et de l'intensité potentielle des inondations. Un score est ensuite attribué aux mailles en fonction du risque majoritaire dans la maille : une exposition forte aux inondations attribue un score de 0, une exposition moyenne un score de 1, et une exposition faible un score de 2.

TYPE D'ESPACE \ ALÉA	ALÉA		
	FAIBLE/MOYEN (= 2)	FORT (= 1)	TRÈS FORT (= 0)
NON BÂTI (= 3)	5 → 2	4 → 2	3 → 2
BÂTI OUVERT (= 1)	3 → 2	2 → 1	1 → 0
BÂTI DENSE (= 0)	2 → 1	1 → 0	0 → 0

TABLEAU 7. Représentation croisée permettant d'étudier l'exposition au risque d'inondation en fonction de l'occupation du sol et de l'intensité potentielle des inondations.

OÙ RENATURER POUR ADAPTER SON TERRITOIRE AU CHANGEMENT CLIMATIQUE ?

Conformément à la méthode détaillée en p.27, les mailles présentant un score faible (0 à 3) ont été définies comme zones de renaturation prioritaire. Appliquée au périmètre de la petite couronne, l'analyse

montre que les zones urbaines les plus exposées aux effets du changement climatique se situent au niveau de la ville de Paris, mais aussi plus largement le long de la Seine et de la Marne, où l'urbanisation engendre une forte exposition au risque d'inondation. En ce qui concerne les départements de la petite couronne, l'exposition diminue logiquement à mesure que l'on s'éloigne de la zone urbaine dense.

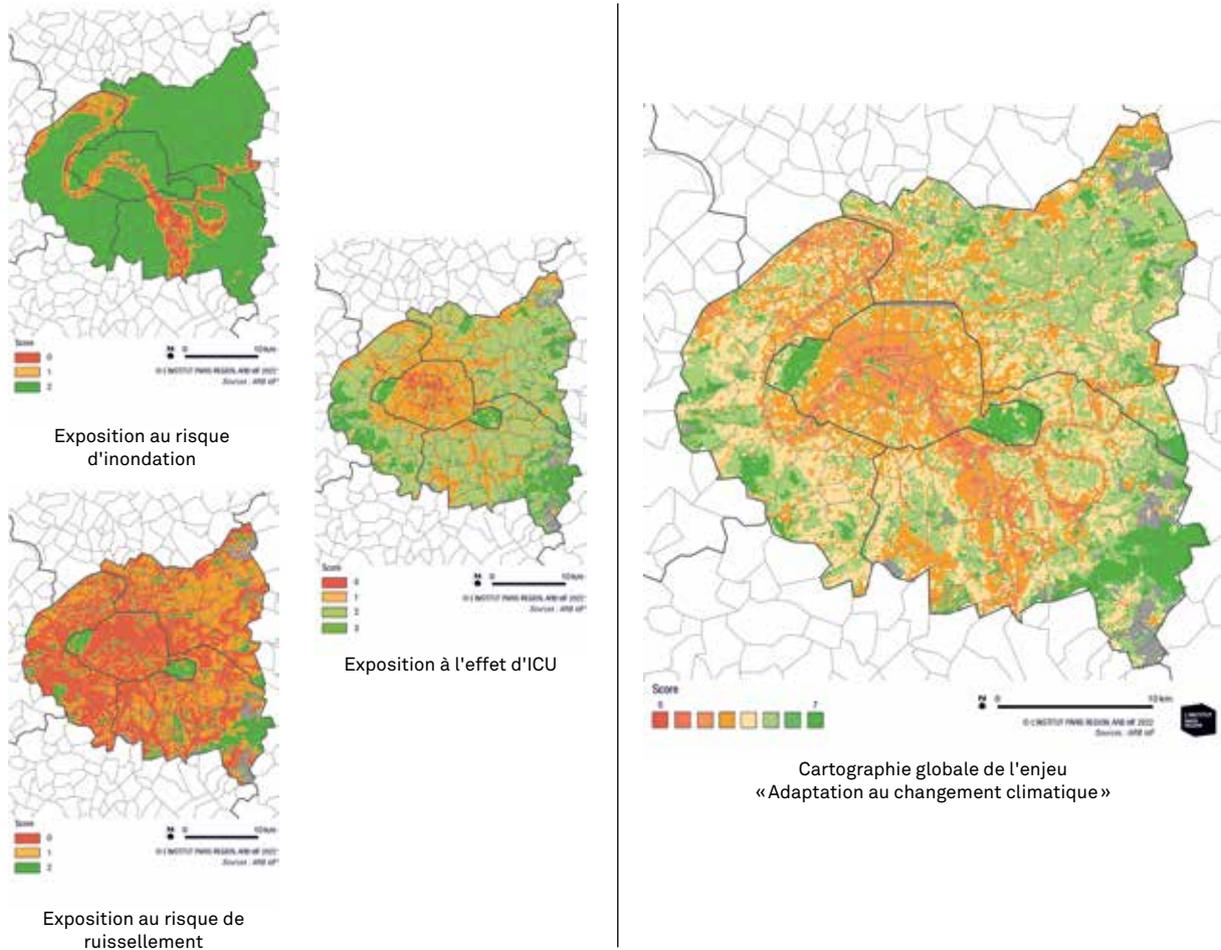


FIGURE 11. Résultats cartographiques de l'étude des critères choisis (à gauche) et cartographie globale de l'exposition aux effets du changement climatique, correspondant à la somme des scores des critères (à droite). Les résultats montrés ici ne concernent que Paris et les départements de la petite couronne.

EXEMPLE D'APPLICATION SUR LA COMMUNE D'AULNAY-SOUS-BOIS

Les résultats de l'analyse (Figure 12.) révèlent un total de 280 mailles très exposées aux effets du changement climatique (score de 2 ou 3). Les besoins de renaturation se situent au nord-ouest de la commune, qui correspond à

une zone industrielle fortement imperméabilisée, exposée au ruissellement et à l'effet d'ICU. Concernant le reste du territoire, 748 mailles ont une exposition faible (score de 4 ou 5). Enfin, 127 mailles ont une exposition très faible (score de 6 ou 7) et ne sont pas prioritaires pour des projets de renaturation visant à l'adaptation au changement climatique.

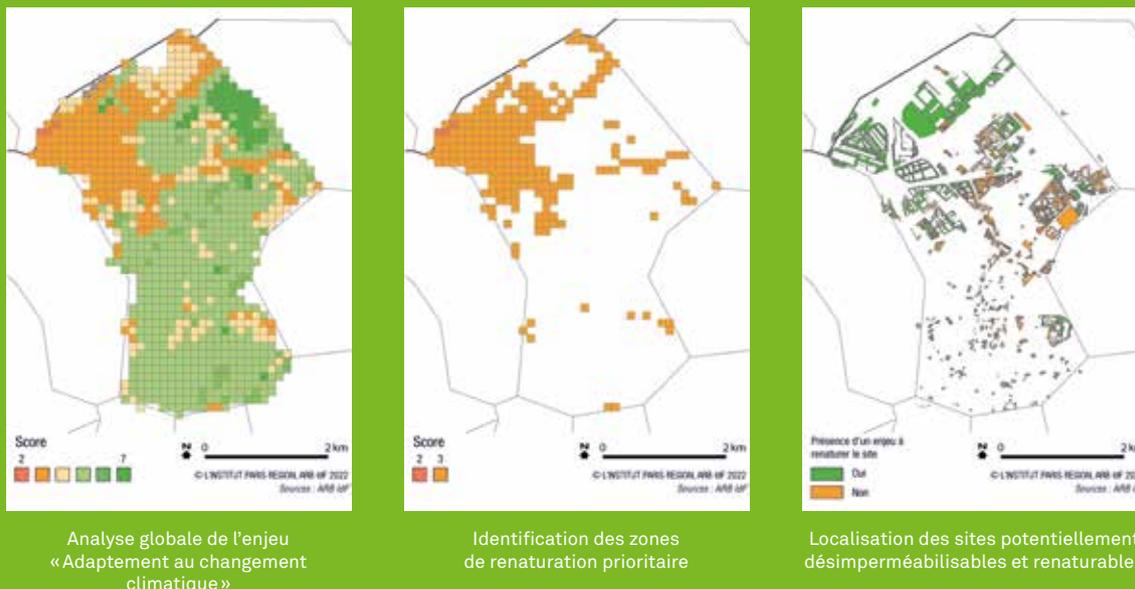


FIGURE 12. Identification des sites désimpermeabilisables dans les secteurs exposés au changement climatique sur la commune d'Aulnay-sous-Bois (Seine-Saint-Denis).

EXEMPLE D'INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS SUR LE SECTEUR D'IVRY-SUR-SEINE

Dans le secteur d'Ivry-sur-Seine (Val-de-Marne), l'analyse cartographique (Figure 13.) révèle une zone urbaine fortement imperméabilisée, par ailleurs construite sur une zone inondable, et donc fortement exposée aux

risques d'inondation et de ruissellement. Le degré d'imperméabilisation occasionne également un effet d'ICU important. La renaturation de ce secteur permettrait non seulement de limiter les risques d'inondation, mais également de limiter l'impact des vagues de chaleur (avec une efficacité dépendant de la taille de l'opération de renaturation).

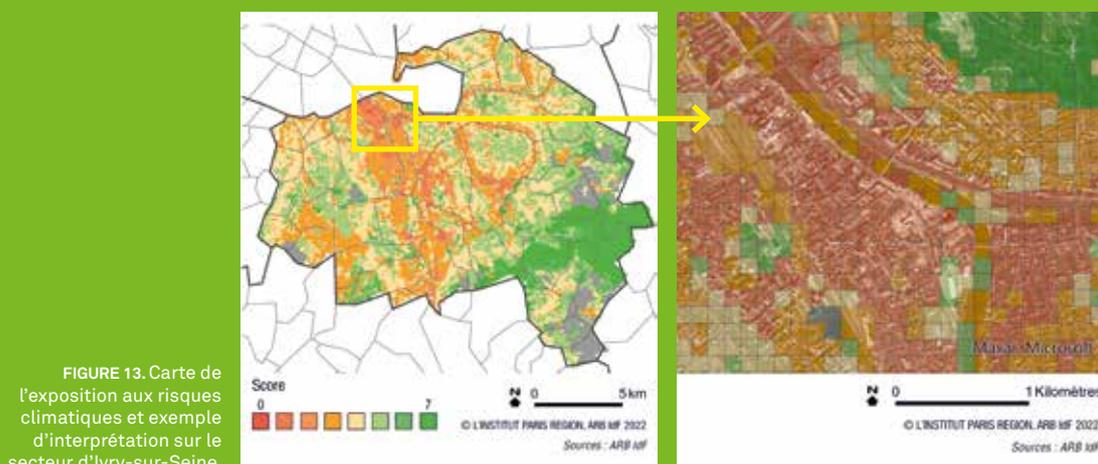


FIGURE 13. Carte de l'exposition aux risques climatiques et exemple d'interprétation sur le secteur d'Ivry-sur-Seine.

RETOURS D'EXPÉRIENCE ET PRÉCONISATIONS

Dans un contexte d'adaptation au changement climatique, la renaturation peut viser plusieurs trajectoires, en fonction du secteur concerné et afin de répondre à une ou plusieurs vulnérabilités identifiées. Plusieurs types de recommandations peuvent être formulés, notamment :

- réouvrir les rivières urbaines et les reméandrer, renaturer les berges ;
- rétablir des zones d'expansion des crues et autres zones « tampon » pour pallier d'éventuels débordements (prairies humides, réseaux de mares, étangs, forêts alluviales) ;
- multiplier les ouvrages de gestion alternative des eaux pluviales sur des espaces auparavant imperméabilisés (jardins et parcs inondables, réseaux de mares, étangs, jardins de pluie, noues végétalisées, etc.) ;
- densifier le couvert arboré et végétaliser les rues minérales sur les places publiques fréquentées et sur la voirie.

Renaturer pour créer des zones d'expansion de crues et gérer le risque d'inondation

En France, la plupart des cours d'eau ont fait l'objet de nombreuses interventions humaines (rectification, endiguement, canalisation, enterrement) qui ont altéré leur fonctionnalité, entraînant une augmentation des risques d'inondation lors d'événements pluvieux extrêmes. En parallèle, la plupart des zones humides et marais assurant des fonctions de stockage à proximité ou dans les villes ont été drainés ou imperméabilisés. Les rivières sont souvent privées de leurs annexes (prairies et boisements inondables, zones

d'expansion de crues) qui assuraient une fonction de débordement en cas de fortes pluies. À titre indicatif, en petite couronne parisienne, les abords du lit majeur des cours d'eau sont quasiment tous urbanisés, contre 30 % en grande couronne.

Renaturer les cours d'eau existants, les reméandrer, les réouvrir dans certains cas, participe à un meilleur écoulement de l'eau et augmente la capacité de stockage lors des crues. Les écosystèmes associés aux rivières comme les ripisylves (ou forêts riveraines) jouent également un rôle de maintien des berges et de ralentissement du flux d'eau. Face à la recrudescence des risques d'inondation, de plus en plus de collectivités envisagent la restauration de zones humides inondables le long des grands cours d'eau et la réouverture de rivières urbaines.

RETOUR D'EXPÉRIENCE 11

LA ZONE D'EXPANSION DES CRUES DU SITE DU VIGNOIS À GONESSE (ÎLE-DE-FRANCE)

En bref : création d'une zone d'expansion des crues favorable à la biodiversité.

Le site du Vignois à Gonesse (Val-d'Oise) est l'un des exemples les plus aboutis de solution fondée sur la nature explicitement conçue pour gérer le risque d'inondation d'un lotissement et apporter des bénéfices pour la biodiversité. L'opération, réalisée par le SIAH (Syndicat mixte d'aménagement hydraulique) en 2019, a consisté en la création d'une zone humide de 12 hectares, d'une capacité de stockage de 55 000 m³ afin de protéger les citoyens et citoyennes des inondations causées par les débordements du Crout et le refoulement des eaux de ruissellement.



Zones humides permanentes et temporaires présentes sur le site du Vignois devenu une zone d'expansion de crues. © SIAH Crout et Petit Rosne

La co-construction du projet entre hydrauliciens, écologues et paysagistes a permis de concevoir différents régimes hydrauliques de la rivière et des habitats hétérogènes tels que prairies, roselières, saulaies et bosquets. Plusieurs zones humides et étangs sont reliés entre eux. Le site n'est pas éclairé la nuit afin de maintenir un « couloir d'obscurité » pour les oiseaux et les chauves-souris. Concernant la végétation, des espèces ont été plantées, mais les arbres existants ont été protégés et la végétation spontanée est acceptée. Bien que l'objectif principal reste la gestion des crues, cette zone humide offre également une diversité d'habitats pour la biodiversité et un espace récréatif privilégié pour les riverains.

Depuis 2020, un suivi de la biodiversité (basé sur des protocoles standardisés issus pour certains de programmes de sciences participatives) est réalisé sur plusieurs taxons (papillons de jour et de nuit, libellules, orthoptères, pollinisateurs, reptiles, amphibiens, plantes, oiseaux, mammifères). Après trois ans de mise en œuvre, les premiers résultats confirment que la restauration des zones humides a un impact significatif aussi bien sur la biodiversité que sur l'adaptation au changement climatique. Bien qu'à l'origine, le site du Vignois était une friche agricole, des opérations similaires sur des sites imperméabilisés peuvent être envisagées, avec un bénéfice encore plus important.

À RETENIR

- Il est important d'associer les personnes habitant à proximité en amont de la conception du projet. En effet, l'acceptation de la présence de l'eau en ville ou d'une gestion écologique n'est pas évidente. Certaines idées reçues liées à l'insalubrité ou à la présence de moustiques doivent être déconstruites avant le projet.
- La création de milieux humides peut être pensée à plusieurs échelles, de manière à connecter les différentes zones humides restaurées entre elles pour faciliter le déplacement des espèces et renforcer la trame bleue sur un grand territoire.
- Sur des sites de grande surface, il est recommandé de multiplier les habitats hétérogènes (prairies, roselières, bosquets) offrant une hétérogénéité de niches écologiques pour différents groupes taxonomiques.
- Des suivis naturalistes sont à prévoir pour évaluer l'impact du projet sur la biodiversité et améliorer les connaissances en matière de renaturation en milieu urbain.

RETOUR D'EXPÉRIENCE 12

RENATURATION ET REQUALIFICATION PAYSAGÈRE DU SITE INDUSTRIEL DES PRÉS DE VAUX À BESANÇON (BOURGOGNE-FRANCHE-COMTÉ)

En bref : requalification d'une friche industrielle, à l'origine d'un îlot de chaleur et d'un risque d'inondation, en un parc de 5 hectares qui permettra de lutter activement contre ces deux risques tout en offrant un espace récréatif pour la population.

Le site des Prés de Vaux était une friche industrielle abandonnée depuis trente ans, dans les boucles de la rivière du Doubs et à proximité immédiate du centre-ville de Besançon. Le site est situé en zone inondable ainsi que fortement pollué par son passé industriel (anciennes soieries Chardonnet). Les sols y sont totalement imperméables du fait des bâtiments et revêtements qui le composent. Cette zone minérale constitue non seulement un îlot de chaleur important à côté du centre-ville, mais elle augmente aussi les risques d'inondation en cas de débordement du Doubs, car elle est située dans son lit majeur, entravant le libre écoulement des eaux en période de crue. La ville de Besançon a donc acquis une partie du foncier pour la démolition et la reconversion du site en un

grand parc urbain post-industriel de 5 hectares. Les objectifs ont été de désimpermeabiliser et dépolluer les sols et recréer ainsi les conditions de développement d'une flore spontanée pionnière et colonisatrice en organisant les espaces et en mettant en scène le végétal grâce au travail de paysagistes (Agence MAP). La zone d'expansion de crues a été rétablie en amont du centre-ville ; un parcours culturel mettant en scène la mémoire du site pour répondre aux demandes des citoyens a été créé, une partie des bâtiments témoins du passé industriel est en cours de reconversion en locaux pour des associations sportives.

À la suite du diagnostic faune/flore, le chantier de démolition a pu commencer. La ripisylve et les espaces désimpermeabilisés ont été végétalisés en privilégiant « le laisser faire ». Les plantations et semis réalisés sont venus uniquement accélérer la recolonisation naturelle du parc. Les graines semées ont été préalablement récoltées par le personnel de la ville dans les espaces naturels alentours (berges, collines, etc.). Des mélanges spécifiques ont été conçus en fonction des différents milieux à réhabiliter. Ce travail permet ainsi de favoriser l'apparition d'une flore pionnière sur des sols pauvres, donnant à voir les différentes phases de transformation de la friche. Une attention particulière sera apportée pour



Friche des Prés de Vaux à Besançon située dans une des boucles du Doubs. © Gwendoline Grandin/ARB ÎdF

éviter l'apparition de plantes exotiques envahissantes pendant et après le chantier. Certains bâtiments ont été conservés pour accueillir des activités de loisirs. Des « jardins empreintes » ont été mis en place pour soigner les transitions paysagères entre les zones restaurées et celles conservées pour l'histoire du site. Le principe de ces jardins est de favoriser une recolonisation naturelle sur d'anciennes dalles béton de bâtiments et d'anciennes voiries. Le parc accueille dorénavant un parcours culturel mettant en scène la

mémoire du site et un parcours scientifique et pédagogique décrivant les pollutions du site.

Au total, plus de 2,5 hectares ont été désimperméabilisés, dont 1,8 hectares destinés à la création de milieux naturels. La création de nouveaux habitats (pelouses sèches ou plus classiques, espaces arbustifs denses, noues ou espaces de récupération des eaux végétalisés, etc.) et la mise en place d'une gestion écologique ont permis de recréer des zones refuges pour la biodiversité.

À RETENIR

- La réutilisation des remblais sur le site permet d'éviter l'émission de CO₂ liée au transport de terre et la délocalisation des impacts sur un autre site, que ce soit pour le stockage des terres exportées ou le décapage de terre végétale.
- Les opérations de restauration peuvent combiner les deux types de renaturation : passive et active. Pour le réensemencement, l'utilisation d'espèces locales est à favoriser. Il est possible de constituer ses propres mélanges à partir de graines récoltées dans les espaces naturels alentours du projet, tout en prenant garde de ne pas « piller » ces espaces, au risque de limiter leur propre capacité de régénération ultérieure.
- Maintenir des sols pauvres peut être une option à envisager afin de favoriser la présence de plantes pionnières ou spécifiques de ces sols. De nombreuses espèces végétales considérées comme remarquables ou en mauvais état de conservation ne poussent que sur ce type de milieu.



RETOUR D'EXPÉRIENCE 13

LA ZONE D'EXPANSION DES CRUES DE LA COMMUNAUTÉ D'AGGLOMÉRATION D'AGGLOPOLYS (CENTRE VAL-DE-LOIRE)

En bref : déconstruction progressive d'un quartier de 60 hectares dans le but de retrouver la fonction de zone d'expansion des crues permettant de gérer le risque d'inondation et de protéger le quartier endigué et habité de Vienne, mais aussi de retrouver des espaces naturels et agricoles fonctionnels.

Conformément à son Plan de prévention des risques d'inondation, la communauté d'agglomération de Blois, Agglopolys, recrée depuis bientôt dix-sept ans une zone d'expansion des crues de la Loire sur un secteur nommé La Bouillie. Situé à Blois en rive sud de la Loire, le quartier de 60 hectares est petit à petit désurbanisé. Une zone d'aménagement différée a notamment été mise en place permettant à Agglopolys

d'acquérir prioritairement les bâtiments et maisons en vente, avant de procéder à leur démolition dans le but de restaurer les sites.

Depuis 2004, 132 bâtiments ont été acquis et 128 démolis sur les 143 recensés. Les différentes études conduites (histoire, paysages, écologie, hydrologie, agriculture) ont permis de préciser la vocation future de La Bouillie. Au-delà de la gestion des crues, le projet souhaite redonner place à des espaces naturels fonctionnels (fruticées, prairies, bocages, zones humides) et agricoles (pâturage, vergers publics ou associatifs, jardins partagés). Le nouvel espace devra également être un lieu de promenades donnant à la population la possibilité de recréer un lien avec la Loire, le Cosson et la forêt de Russy. Loin d'être figé, ce programme constitue une base de réflexion amenée à être débattue et enrichie par l'ensemble des acteurs du territoire. Des ateliers participatifs et consultations publiques ont été engagés en 2021 afin d'améliorer la participation et l'appropriation citoyenne.



Le quartier de La Bouillie à désurbaniser pour restaurer une zone d'expansion des crues. © Agglopolys

À RETENIR

- Pour gérer le risque d'inondation, il est possible de mener une politique d'acquisition foncière progressive afin de réaliser des opérations de dé-densification qui permettront, à terme, de réhabiliter une zone d'expansion de crues.
- Si la taille du site le permet, il est envisageable et recommandé de diversifier les espaces restaurés en prévoyant des zones réservées à la biodiversité (prairies, forêt, zones humides) et d'autres pour l'exploitation agricole et la population (vergers associatifs, jardins partagés).

RETOUR D'EXPÉRIENCE 14

**LA RÉOUVERTURE DU PETIT ROSNE
À SARCELLES (ÎLE-DE-FRANCE)**

En bref : réouverture d'un cours d'eau canalisé et enterré, en vue de gérer les inondations dues au ruissellement, tout en offrant de nouveaux habitats pour la biodiversité et un espace de loisirs pour la population.

En 1992, le centre historique de la ville de Sarcelles fut noyé sous 1,50 m d'eau pendant plusieurs semaines à la suite d'intenses pluies d'orage. Le Petit Rosne, coincé dans sa gangue de béton, ne pouvait que déborder au moindre gonflement important de ses eaux. C'est ainsi qu'après plusieurs années d'études, le syndicat mixte d'aménagement hydraulique (SIAH) du Croult et du Petit Rosne, en collaboration avec la ville de Sarcelles, a engagé la réouverture d'un tronçon de cette rivière oubliée. Les travaux ont été effectués en 2014 avec la volonté de maîtriser le risque d'inondation tout en faisant revenir la nature en ville. Sur un tronçon de 165 m, un nouveau lit a été creusé et les berges ont été renforcées et végétalisées par des techniques de génie écologique sur une partie du projet. Malgré le faible espace disponible et la forte urbanisation du lieu, le Petit Rosne a retrouvé un de ses tracés initiaux et s'est vu doté de nombreux aménagements offrant une accessibilité du public au site.

La rivière étant initialement enterrée et coulant dans un corset de béton, aucun état des lieux initial en rivière n'a pu être réalisé. Un inventaire faune/flore, en surface, a tout de même été effectué en 2010 avant les premiers travaux. Il a permis de faire ressortir le potentiel d'un boisement humide, à l'endroit du futur méandre. Le boisement existant a donc

été conservé autant pour son aspect paysager que pour son potentiel écologique. Un inventaire faune/flore « post-travaux » a été réalisé en 2017-2018, constituant la première pierre d'un suivi sur le long terme. Il comprend un inventaire des poissons, des chauves-souris, des papillons de nuit, des oiseaux et de la flore. Des mesures de qualité de l'eau ont également été réalisées en amont et en aval. Quelques mois après la fin des travaux, les premières espèces aquatiques (épinoches, épinochettes, macro-invertébrés aquatiques) ont pu être observées.

Par ailleurs, un sondage a été réalisé en mars/avril 2018 auprès des usagers de ce tronçon de rivière réouvert pour évaluer la perception du projet dans toutes ses phases : émergence, travaux, gestion courante. Ce dernier montre que le retour de la nature en ville nécessite une prise de conscience générale, y compris de la part des habitants et des habitantes. Une communication plus poussée dès la conception, en phase travaux et pendant la période d'exploitation, aurait été nécessaire pour une meilleure acceptation de la nécessaire dimension « sauvage » du site (berges enherbées mais non tondues, diversité des espèces végétales). Depuis, le SIAH a fait de la concertation avec la population un élément stratégique de ses opérations. La réouverture de la rivière participe à une dynamique de réappropriation du secteur par la population, qui pourrait se poursuivre par la mise en place de jardins pédagogiques en bordure du cours d'eau. L'Association scientifique et technique pour l'eau et l'environnement (Astee) a réalisé un ouvrage sur la réhabilitation des petites rivières urbaines, présentant de nombreux retours d'expérience et des préconisations pour une mise en œuvre réussie [37].



Un avant/après du projet de réouverture de la rivière réalisée en zone dense à Sarcelles. ©SIAH Croult et Petit Rosne



À RETENIR

- En termes d'ingénierie, la restauration du cours d'eau, entièrement bétonné, nécessite une réelle expertise, à la fois en génie civil, hydraulique et écologique.
- La création d'un profil hydromorphologique diversifié (sinuosité, vitesses d'écoulement, ensoleillement, ombrage) assure des opportunités variées de nidification, d'alimentation et de reproduction aux différentes espèces inféodées aux milieux aquatiques.
- La gestion du site renaturé doit être anticipée en amont, aussi bien sur ses aspects techniques (entretien de la végétation, suivi de la biodiversité) que sociaux (sécurité, gestion des déchets, communication auprès des riverains).
- Les processus de co-construction avec la population permettent de faciliter l'acceptation des projets de renaturation de milieux humides.

Renaturer pour limiter le ruissellement

Sous l'impulsion des Agences de l'eau, le recours aux espaces végétalisés comme alternative à la gestion des eaux pluviales se multiplie dans les collectivités. Ces techniques ont pour avantage de se rapprocher du cycle naturel de l'eau, en s'appuyant sur l'infiltration directe dans les sols, la création de multiples espaces végétalisés et la réhabilitation de milieux humides et cours d'eau. Elles protègent la qualité et la quantité des ressources en eau (diminution des eaux polluées rejetées, recharge naturelle des nappes phréatiques) et réduisent les risques d'inondation et de ruissellement. La multiplication de ces dispositifs (noues végétalisées, mares, jardins de pluies, bassins végétalisés) est un levier pour augmenter le pourcentage de pleine terre en ville et participer à la mise en œuvre d'une trame bleue urbaine.

En Île-de-France, de nombreuses collectivités remplacent progressivement les infrastructures grises (cuves de stockage d'eau en béton, bassins artificiels, digues) par des ouvrages de gestion des eaux pluviales sous forme d'espaces verts inondables. Plusieurs publications ont montré que ces ouvrages ont le potentiel de fournir un habitat pour la biodiversité (Monberg *et al*, 2019). Cependant, certains aménagements relèvent encore uniquement de l'approche paysagère, alors que les écologues ont également

souligné la nécessité d'améliorer la conception (amélioration de la diversité structurelle, irrégularités des berges) et la gestion des ouvrages de gestion des eaux pluviales (réduction de la tonte) pour garantir un impact positif sur la biodiversité (Oertli *et al*, 2019). La conception de ces ouvrages doit tenir compte du déplacement des espèces inféodées à ces milieux et encourager la suppression des barrières infranchissables (grillages, clôtures) empêchant la connectivité avec d'autres zones humides ou espaces verts (Ahn, 2019). Une meilleure communication entre les paysagistes, hydrologues et écologues urbains pourrait aider à ajuster les pratiques de conception et de gestion pour une conservation plus efficace de la biodiversité.

Comme le montre la méthodologie développée dans ce guide, les collectivités disposent d'un gisement important de surfaces minéralisées, qui pourraient être désimperméabilisées et végétalisées en vue de gérer les eaux pluviales et créer des milieux humides dans les secteurs soumis au ruissellement. Un grand nombre de dispositifs peuvent être envisagés, à toutes les échelles. Une meilleure gestion de l'eau passe par la restauration de milieux récepteurs comme les zones humides ainsi que par la présence des arbres qui ont la capacité de stocker de grandes quantités d'eau, bien que cette capacité de stockage varie selon l'espèce et augmente avec la taille et l'âge des arbres.

RETOUR D'EXPÉRIENCE 15

**PASSER DES INFRASTRUCTURES GRISES
À UNE GESTION ALTERNATIVE DES EAUX
PLUVIALES (ÎLE-DE-FRANCE)**

En bref : des espaces verts inondables en Seine-Saint-Denis pour gérer la pluie tout en améliorant le cadre de vie.

La renaturation en milieu urbain peut permettre de remplacer des infrastructures grises par des écosystèmes capables d'assurer la gestion de l'eau de pluie et le ruissellement. Les systèmes de gestion alternative des eaux pluviales tels que les noues végétalisées, les fossés, les bassins, ou encore les parcs inondables sont de plus en plus déployés dans les collectivités (Monberg *et al.*, 2019). Dès le début des années 1990, le département de la Seine-Saint-Denis a privilégié la gestion à la source des eaux pluviales afin de soulager

les réseaux d'assainissement saturés lors d'épisodes pluvieux. Dans plusieurs communes, le département a réalisé des aménagements paysagers multifonctionnels, répondant à la question de la gestion des eaux pluviales tout en améliorant le cadre de vie et en favorisant la biodiversité dans des secteurs souvent carencés en espaces verts.

Réalisée entre 2002 et 2006, la zone d'aménagement concerté (ZAC) du Clos Saint-Vincent à Noisy-le-Grand a été conçue pour gérer les eaux pluviales à ciel ouvert. Ainsi, le Jardin des Artistes, s'étendant sur 2 hectares, est inondable et reçoit les eaux de ruissellement du parc et des toitures des bâtiments voisins. En cas de fortes pluies, le jardin offre 570 m³ de rétention. Des chemins piétons surélevés permettent d'évoluer à travers le jardin lorsqu'il est submergé. Le jardin et les autres équipements environnants permettent ainsi de limiter l'imperméabilisation des sols et le ruissellement des eaux pluviales, tout en réintroduisant visuellement l'eau dans l'espace urbain [38].



Création d'un jardin inondable pour gérer les eaux pluviales à la parcelle au sein du quartier du Clos Saint-Vincent à Noisy-le-Grand.
©Département de Seine-Saint-Denis

À RETENIR

- Pour que ces ouvrages soient efficaces en matière d'absorption d'eau, il est important qu'ils restent végétalisés, et que les sols ne soient pas tassés. La hauteur de la végétation et la multiplication des strates auront pour effet de ralentir la pluie avant qu'elle n'atteigne le sol et ainsi de différer dans le temps les volumes d'eau à absorber.
- Les zones humides temporaires ont autant d'intérêt que celles qui sont permanentes, et accueillent un cortège d'espèces différent. Il est nécessaire de bien communiquer sur les spécificités de cet habitat.
- Une trop forte intensité de gestion appliquée à ces aménagements a souvent un effet négatif sur la biodiversité. Les chercheurs suggèrent de réduire drastiquement les interventions de gestion (fauche notamment) pour permettre à la flore de s'exprimer. La tonte rase des bordures d'étangs est un fléau pour les invertébrés.
- Il est nécessaire d'éviter le piétinement ou le passage de véhicules sur les parties ayant un rôle infiltrant (par exemple au moyen d'une végétation arbustive et dense).

Renaturer pour lutter contre l'effet d'îlot de chaleur urbain (ICU)

Les espaces de nature en ville permettent une meilleure réflexion des rayons solaires, contrairement à la plupart des surfaces bétonnées qui absorbent directement l'énergie lumineuse et la transforment en chaleur. Un grand nombre d'études scientifiques confirment le rôle de la végétation dans la réduction des températures urbaines par les mécanismes d'ombrage et d'évapotranspiration, en particulier durant les mois les plus chauds (Bowler, 2010).

La taille des espaces verts et leur composition sont également des facteurs importants, qui influencent d'une part l'intensité de l'effet rafraîchissant, et d'autre part la distance jusqu'à laquelle cet effet s'étend. Une étude menée à Londres indique que les espaces d'une taille allant de 5 à 15 hectares ont un effet rafraîchissant de 0,6 à 1 °C qui peut s'étendre de 180 à 330 m au-delà du site d'étude (Monteiro *et al*, 2016) - ce qui n'est pas le cas des espaces de taille inférieure à 0,5 hectare dont les effets sur leurs alentours sont négligeables. La synthèse de l'ADEME Aménager avec la nature en ville [39] précise cette relation et indique qu'« à l'intérieur d'un parc, la différence de température par rapport aux zones construites est significative et varie notamment avec sa superficie : 2,5°C dans un parc de 20 hectares à Valence (Espagne) et 1°C dans un parc de 10 hectares, 2°C dans un parc de 50 hectares, 3°C dans un parc de 200 hectares à Berlin (Allemagne) ».

RETOUR D'EXPÉRIENCE 16

LA TIERCE FORÊT À AUBERVILLIERS (ÎLE-DE-FRANCE)

En bref : transformation d'un parking de résidence en un espace récréatif permettant de lutter contre l'effet d'ICU.

La Tierce forêt est le projet de renaturation d'un parking et d'une cour d'immeuble minéralisée à Aubervilliers, réalisée dans l'objectif d'améliorer le cadre de vie et de réduire l'effet d'îlot de chaleur particulièrement important. Le projet est né de l'idée de transformer le parking situé devant la résidence de jeunes travailleurs en un espace à la croisée d'un parc et d'une place pour les résidents et employés de la structure. L'analyse des sols existants a permis d'évaluer leur qualité agronomique, physico-chimique et biologique ainsi que de réfléchir à des techniques de restauration in situ pour éviter des apports de terres végétales. La reconstruction du sol s'est faite à partir des sols du site préalablement décompactés, des matériaux de déconstruction et de compost. Pour restaurer le cycle de l'eau, les surfaces imperméables ont été remplacées par un revêtement perméable, y compris la voie d'accès de secours. Un réservoir d'eau de pluie a été construit à partir des terres argileuses pour éviter toute construction béton dans le sol. De plus, pour éviter d'avoir recours à des matériaux

plastiques, les drains installés sont en terre cuite. Le réservoir constitue une réserve utile pour alimenter les arbres et pour prolonger l'effet de rafraîchissement pendant les périodes de sécheresse.

Concernant la stratégie de plantation, des mesures de l'irradiance solaire ont permis de guider le choix des zones à végétaliser, l'idée étant d'avoir une canopée importante là où les bâtiments environnants apportaient le moins d'ombrage. Les espèces plantées sont locales et ont été sélectionnées afin de résister aux conditions urbaines. Les racines ont également été mycorhizées pour permettre aux plantes de mieux absorber l'eau et les minéraux du sol. Enfin, une station météorologique a été installée pour évaluer l'efficacité du projet. Les premières études montrent une diminution de la température ressentie de 2 °C en moyenne sous la canopée, avec des pics allant jusqu'à -6 °C pendant l'été comparée au stade avant-projet.



Création d'un îlot de fraîcheur en lieu et place d'un parking.
©FIELDWORK Archi



À RETENIR

- La réutilisation des remblais et matériaux de déconstruction du site pour reconstruire des sols permet de réduire l'empreinte écologique de l'opération.
- La réalisation d'études préalables (cartographie de la chaleur, analyse des sols) permet de disposer de tous les éléments nécessaires à une renaturation efficace.
- La mise en place de suivis permet d'évaluer le succès du projet sur la diminution des températures et de l'effet d'ICU, et d'ajuster les aménagements si nécessaire.
- Un chêne peut stocker jusqu'à 200 litres d'eau par jour, dont la majorité ressort par transpiration, sous forme gazeuse. Une étude américaine a montré que la totalité des arbres de la ville de New York contribue à réduire le ruissellement d'environ 2 millions de mètres cubes par an, soit une valeur de 4,6 millions de dollars chaque année (Nowak *et al*, 2018).

RENATURER POUR AMÉLIORER LA SANTÉ ET LE CADRE DE VIE

L'imperméabilisation des sols n'est pas sans conséquences sur la santé et le bien-être des citoyens. Elle est un facteur aggravant, si ce n'est la cause de phénomènes tels que les inondations ou les ICU, qui ont eux-mêmes de multiples impacts négatifs sur la santé. À titre d'exemple, les ICU entraînent une surmortalité pendant les vagues de chaleur en plus d'avoir des effets indirects, comme l'augmentation de la concentration des polluants présents dans l'air. Une revue de la littérature scientifique menée par Plante & Cité a identifié plus de 300 publications montrant les bénéfices des espaces de nature sur la santé physique mais aussi mentale (Meyer-Grandbastien *et al*, 2021). Renaturer les milieux urbains fait donc partie des solutions pour améliorer le cadre de vie et le bien-être. Afin d'identifier les secteurs prioritaires à désimperméabiliser pour répondre à ces enjeux, la vulnérabilité à l'effet d'ICU, la pollution de l'air et la carence en espaces verts ont été étudiés.

LES CRITÈRES POUR LOCALISER LES ZONES PRIORITAIRES

Vulnérabilité des personnes à l'effet d'ICU

Le phénomène d'ICU est la cause d'une forte surmortalité en période caniculaire. Le repos nocturne et la récupération sont altérés et le risque de surmortalité est 2 fois plus élevé chez les personnes exposées à la chaleur, en particulier la nuit et lorsque la canicule persiste une semaine ou plus. Ce risque est aggravé quand d'autres facteurs individuels (pathologies préexistantes, âge, revenus, etc.) ou liés à l'environnement du logement (sous les toits, dans un quartier affecté par l'ICU, accessibilité réduite à un médecin ou urgences hospitalières, etc.) viennent s'additionner. La vulnérabilité des populations face à l'ICU a donc

été analysée depuis l'indicateur «Vulnérabilité»⁸ produit dans le cadre du projet «Adapter l'Île-de-France à la chaleur urbaine» (Cordeau, 2017) de L'Institut Paris Region. Le principe de vulnérabilité demande de considérer plusieurs notions : l'exposition à un aléa (ici l'effet d'ICU) d'un territoire et d'une société, la sensibilité et la fragilité de la population exposée, ainsi que sa capacité à faire face à l'évènement qu'il s'agisse d'anticipation, de réaction ou de résilience. En ce qui concerne l'effet d'ICU, la vulnérabilité de la population est fonction non seulement de son exposition à l'aléa (fort, moyen ou faible), mais aussi de sa sensibilité (par exemple, l'âge) et de sa capacité à faire face (comme la présence d'îlots de fraîcheur). Dans le cadre de l'étude menée ici, une vulnérabilité forte attribuée à la maille un score de 0, une vulnérabilité moyenne un score de 1, une vulnérabilité faible un score de 2.

Pollution de l'air

La pollution de l'air a été analysée à partir des concentrations en particules fines appelées PM2.5, c'est-à-dire les particules dont le diamètre est inférieur à 2,5 microns (μm). Les sources de ces particules sont multiples mais le secteur résidentiel et le transport routier en sont les deux principaux émetteurs sur le territoire francilien [40]. En France, les décès prématurés dus aux particules de diamètre inférieur à 2,5 μm dans l'air extérieur touchent 48 000 personnes chaque année [41]. Les concentrations en PM2.5 ont

8. Cet indicateur est calculé à partir de l'indicateur «aléa» (voir partie 2.4.1.1), d'un indicateur «sensibilité» (présence de maison de retraite, part de la population sensible par l'âge, densité d'occupation des logements, etc.) et d'un indicateur «difficultés à faire face» (carence en espaces verts publics ; proximité aux urgences hospitalières, part des ménages à bas revenus, etc.). Il a été décidé de prendre en compte la vulnérabilité au cours de la nuit, là où l'effet d'ICU est le plus prononcé.

CRITÈRES	SEUILS	SCORE	SOURCE
Vulnérabilité à l'effet d'ICU	Forte	0	<i>Cordeau, 2017 ; Pascal et al, 2021 ; Basagaña et al, 2011 ; Urban green spaces and health, 2016</i>
	Moyenne	1	
	Faible	2	
Pollution de l'air par les particules fines (en $\mu\text{g}/\text{m}^3/\text{an}$)	≥ 15	0	<i>Articles R221-1 à R 221-3 du Code de l'Environnement ; World Health Organization, 2006</i>
	≥ 10 et < 15	1	
	≥ 5 et < 10	2	
	< 5	3	
Carence en espaces verts	Forte	0	<i>Cox et al, 2017 ; Szulczewska et al, 2014</i>
	Moyenne	1	
	Faible	2	

TABLEAU 8. Synthèse des critères, seuils et ressources bibliographiques utilisés pour identifier les secteurs urbains à renaturer pour améliorer la santé et le cadre de vie

été retenues pour approcher la qualité de l'air car elles présentent un risque important pour la santé (Pascal *et al*, 2016), et que l'absorption de ces particules par la végétation est bien documentée (Prigioniero *et al*, 2021 ; Selmi, 2016).

Les données sur les concentrations en PM2.5 sur la période 2014-2018 qui ont été utilisées dans cette étude proviennent de l'association Airparif. Pour l'attribution des scores, les seuils ont été choisis à partir des objectifs fixés par le Grenelle de l'environnement ($15 \mu\text{g}/\text{m}^3/\text{an}$) et des recommandations de l'Organisation mondiale de la santé ($5 \mu\text{g}/\text{m}^3/\text{an}$ avec un seuil intermédiaire de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3/\text{an}$) [42]. Sur la base de ces objectifs, les mailles se voient attribuer un score de 0 pour les zones où la concentration est supérieure ou égale à $15 \mu\text{g}/\text{m}^3/\text{an}$, un score de 1 pour les zones où la concentration est comprise entre 15 et $10 \mu\text{g}/\text{m}^3/\text{an}$ et, un score de 2 pour les zones où la concentration est comprise entre 10 et $5 \mu\text{g}/\text{m}^3/\text{an}$, et un score de 3 pour les zones où la concentration est inférieure à $5 \mu\text{g}/\text{m}^3/\text{an}$.

Carence en espaces verts

Plusieurs études ont démontré les bénéfices de la nature en ville sur la santé. La présence d'espaces de nature en ville permet de diminuer l'anxiété (Hystad *et al*, 2019), les dépressions (Beute *et al*, 2020), d'améliorer l'humeur (Sonntag-Öström *et al*, 2014) et de gagner en attention et en concentration (Kaplan et Kaplan, 1989). Si les preuves des bénéfices de la nature sur la santé ne sont plus à fournir (Meyer-Grandbastien *et al*, 2021 ;

Plante & Cité, 2021 ; [43]), des recherches complémentaires sont nécessaires pour mieux comprendre les liens directs et indirects entre nature et santé.

Plusieurs travaux ont également réussi à mettre en évidence des seuils à partir desquels des effets positifs sur la santé sont constatés. En 2017, une étude américaine montre que les cas de stress et d'anxiété pourraient être réduits de 17 % à 25 % si le couvert végétal dépassait respectivement 20 % et 30 % (Cox *et al*, 2017) dans un rayon de 250 m autour du lieu d'habitation. Une autre étude menée en Pologne recommande un minimum de 45 % d'espace occupé par de la végétation ou des milieux aquatiques (Szulczewska *et al*, 2014) au sein des quartiers, pour assurer un bon niveau de rafraîchissement de l'air, d'infiltration des eaux pluviales et d'évapotranspiration durant les vagues de chaleur.

Pour caractériser la carence en espaces de nature, deux composantes ont été étudiées : (i) la carence en espaces verts publics ouverts à la population et (ii) un indice de végétation (étudié via la couverture végétale) :

- (i) L'étude de la carence en espaces verts publics est faite depuis les données des travaux conduits par L'Institut Paris Région dans le cadre du plan vert régional de 2017 (annexe 5), qui distingue les zones carencées en aménagement, les zones carencées en accessibilité, les zones carencées dans les deux cas, et les zones non carencées.
- (ii) L'indice de végétation est étudié selon les seuils mis en évidence par les travaux de recherche cités ci-dessus.

INDICE DE VÉGÉTATION	
Couvert végétal	Valeur
Couvert < 30%	0
30% ≤ Couvert < 45%	1
Couvert ≥ 45%	2

ESPACES VERTS PUBLICS	
Type de carence	Valeur
Les deux	0
Carence en aménagement	1
Carence en accessibilité	1
Aucune	2

TABLEAU 9. Attribution des scores pour les deux composantes étudiées (indice de végétation et accès aux espaces verts publics)

INDICE DE VÉGÉTATION \ CARENCE EN ESPACES VERTS PUBLICS	LES DEUX (= 0)	CARENCE EN AMÉNAGEMENT (= 1)	CARENCE EN ACCESSIBILITÉ (= 1)	AUCUNE (= 2)
	FAIBLE (= 0)	0 → 0	1 → 0	1 → 0
MOYEN (= 1)	1 → 0	2 → 1	2 → 1	3 → 2
FORT (= 2)	2 → 1	3 → 2	3 → 2	4 → 2

TABLEAU 9. Représentation croisée, permettant de cumuler (i) la carence en espaces verts publics et (ii) l'indice de végétation

Le cumul des deux composantes (carence en espaces verts publics et indice de végétation) permet de différencier les zones peu carencées des zones fortement carencées. Le score final, obtenu par addition, est reclassé pour être compris entre 0 et 2 (valeur à droite dans le tableau croisé). Un score est ensuite attribué aux mailles en fonction de la carence en espaces de nature : une carence forte confère un score de 0, une carence moyenne un score de 1 et une carence faible un score de 2.

OÙ RENATURER EN VUE D'AMÉLIORER LA SANTÉ ET LE CADRE DE VIE ?

Conformément à la méthode détaillée p.27, les mailles présentant un score allant de 0 à 2 ont été définies comme zones de renaturation prioritaires. L'analyse cartographique révèle que les zones urbaines où les risques sanitaires sont les plus forts se situent au niveau de la ville de Paris et sa banlieue proche. Vraisemblablement, les risques étudiés augmentent avec la densité d'une zone : plus une zone est dense, moins elle présente d'espaces verts, plus l'effet d'ICU y est fort et plus les polluants émis par les moyens de transport y sont nombreux. En ce qui concerne la pollution par les PM2.5, il est important de noter qu'aucune zone ne respecte à ce jour la préconisation de 5 µg/m³/an de l'OMS, et seules quelques zones de la grande couronne se situent en dessous du seuil de 10 µg/m³/an. Enfin, il faut rappeler que l'analyse n'a pris en compte que des facteurs sur lesquels des opérations de renaturation pourraient avoir un effet bénéfique (création d'îlots de fraîcheur ; diminution de

la carence en espaces verts ; aide à la diminution de la pollution atmosphérique). Les résultats ne doivent pas être extrapolés à d'autres études concernant le bien-être des populations car ils ne s'y prêtent pas par manque d'information complémentaire (polluants autres que les PM2.5, critères de niveau de vie, etc.).

RETOURS D'EXPÉRIENCE ET PRÉCONISATIONS

Afin d'améliorer la santé et le cadre de vie, il est important de connaître en amont les objectifs visés par le projet de renaturation (améliorer la qualité de l'air, lutter contre les ICU, améliorer le bien-être). Si l'augmentation en quantité des espaces de nature aura un effet bénéfique évident sur le cadre de vie, il ne faut pas pour autant négliger leur qualité écologique. Des bénéfices plus importants concernant la santé mentale ont récemment été attribués aux zones naturelles dont la gestion était moindre (moins de tontes, absence d'élagage) (Clark *et al*, 2014). D'autres études ont mis en évidence l'importance des composantes biologiques dans les espaces récréatifs. À titre d'exemple, le nombre d'interactions visuelles avec les oiseaux serait corrélé à une baisse des niveaux de stress (Cox *et al*, 2017). Dans un objectif d'améliorer la santé sous toutes ses composantes (physique, mentale, sociale), plusieurs recommandations peuvent être formulées, notamment :

- Améliorer l'offre en espaces de nature et réduire la carence des zones concernées.
- Réduire les surfaces minérales, qui emmagasinent la chaleur, au profit de la végétation.
- Déployer une canopée capable d'ombrager l'espace

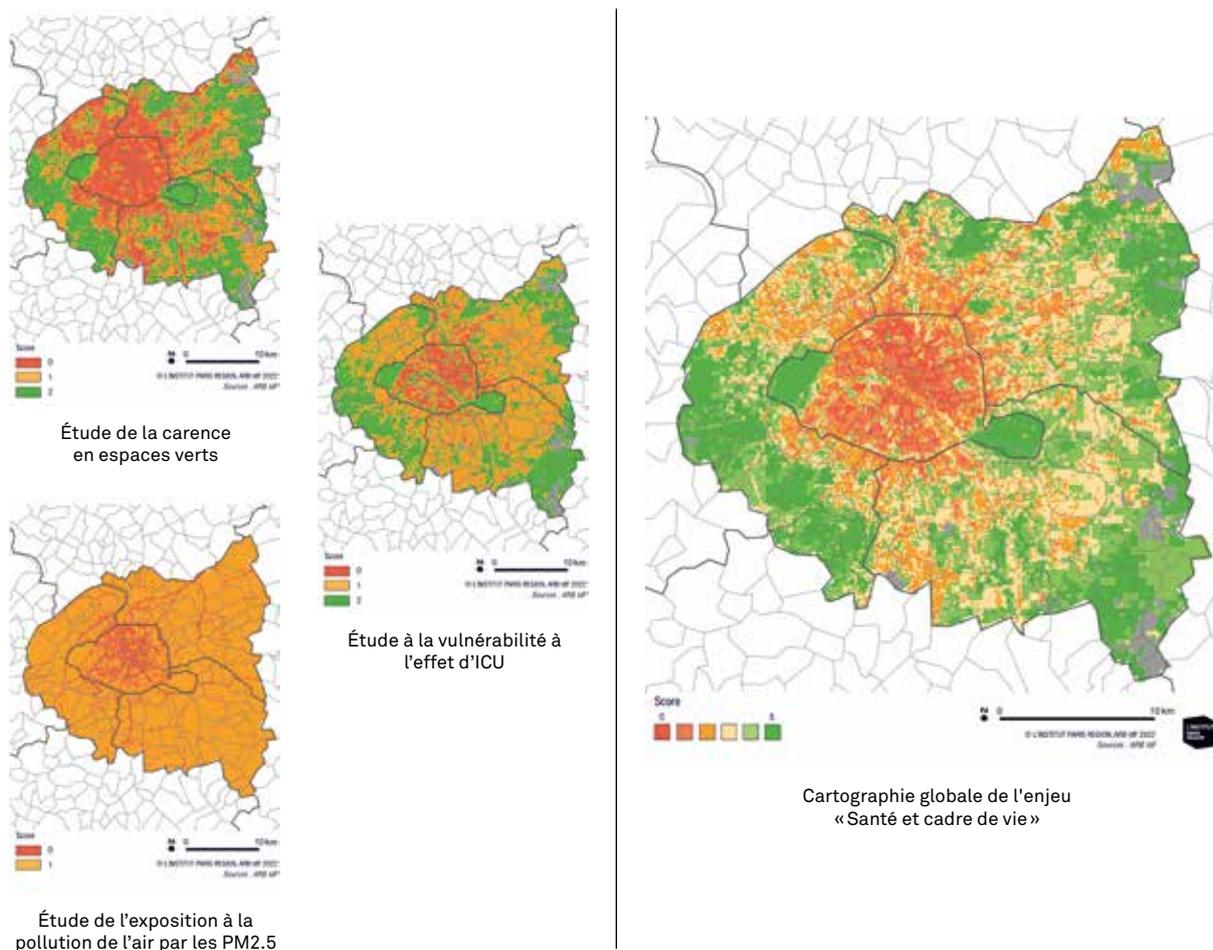


FIGURE 14. Résultats cartographiques de l'étude des critères choisis (à gauche) et la cartographie globale du cadre de vie de la population au regard des critères étudiés ici, correspondant à la somme des scores des critères (à droite). Les résultats montrés ici ne concernent que Paris et les départements de la petite couronne

urbain et favoriser l'évapotranspiration afin de limiter l'effet d'ICU.

- Utiliser des espèces capables de fixer les polluants atmosphériques afin d'améliorer la qualité de l'air.
- Recourir à des démarches participatives permettant aux citoyens de prendre part au changement tout en favorisant les interactions sociales.

Améliorer le confort thermique en ville par la renaturation

Les espaces de nature peuvent participer au confort thermique des villes, notamment lors de vagues de chaleur. Ils réfléchissent le rayonnement solaire, évitant l'accumulation et la restitution de chaleur. En été, selon l'essence, la canopée laisse passer de 10 % à 30 % du rayonnement solaire, offrant ombrage et diminuant les températures ressenties. Les végétaux sont aussi à l'origine du phénomène d'évapotranspi-

ration, qui combine évaporation (l'eau contenue dans les sols et les points d'eau se libèrent en se transformant en gaz) et transpiration (l'eau contenue dans les feuilles se dégage pour maintenir la température du végétal). L'évapotranspiration permet ainsi le rafraîchissement de l'air, grâce au dégagement d'une plus grande quantité de vapeur d'eau. Cependant, pour que la végétation rafraîchisse la ville, il lui faut disposer d'eau en période de canicule. Des sols stockants sont indispensables et un arrosage sobre à partir d'eau pluviale récupérée et stockée peut être parfois nécessaire. Les bénéfices apportés par les espaces de nature sur les ICU et températures sont en revanche très localisés. Il faudra démultiplier les projets de renaturation pour maximiser leurs effets. Enfin, la typologie de la végétation est aussi un facteur à prendre en compte, un boisement urbain pluristratifié étant plus efficace qu'une prairie de fauche pour améliorer le confort thermique.

EXEMPLE D'APPLICATION SUR LA COMMUNE D'AULNAY-SOUS-BOIS

Les résultats (Figure 15.) révèlent un total de 162 mailles exposées à des risques sanitaires ou à un cadre de vie dégradé pour la population (score de 1 ou 2). Celles-ci sont dispersées sur

l'ensemble du territoire communal et proviennent principalement de la carence en espaces verts et/ou de la vulnérabilité de la population face à l'effet d'ICU. Concernant le reste du territoire, les 993 mailles restantes ne laissent pas supposer de risques particulièrement élevés pour les critères étudiés ici (score de 3 à 5).

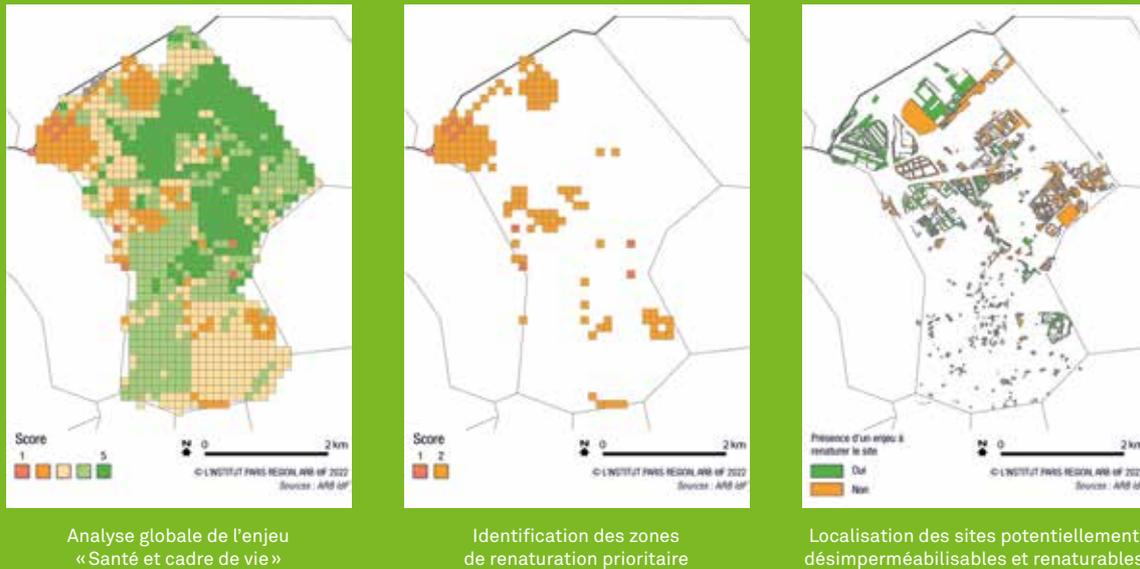


FIGURE 15. Identification des sites désimpermeabilisables dans les secteurs à forts enjeux pour améliorer la santé ou le cadre de vie sur la commune d'Aulnay-sous-Bois (Seine-Saint-Denis).

EXEMPLE D'INTERPRÉTATION SUR LA VILLE DE PARIS

La ville de Paris fait partie des communes très carencées en espaces verts. L'analyse (Figure 16.) met en évidence une zone urbaine très imperméabilisée localisée en centre urbain, et fortement exposée à la pollution de l'air ainsi qu'à l'effet d'ICU. Le degré de densification entraîne par ailleurs une forte carence en espaces verts, à l'ex-

ception des zones situées aux abords immédiats des parcs urbains. La renaturation des zones vulnérables permettrait de résorber la carence en espaces verts et de limiter l'effet d'îlot de chaleur urbain et, dans une moindre mesure, de limiter la pollution atmosphérique (cette dernière ne pouvant être drastiquement diminuée qu'au travers de mesures d'atténuation visant à limiter directement l'émission des polluants).



RETOUR D'EXPÉRIENCE 17

RÉHABILITATION DE LA RUE GARIBALDI À LYON (AUVERGNE-RHÔNE-ALPES)

En bref : transformation d'un grand axe routier du centre-ville en un linéaire végétalisé permettant d'améliorer le confort thermique urbain.

Dans le cadre de son plan climat, la Métropole de Lyon déploie des solutions de végétalisation de l'espace urbain pour atténuer l'effet d'îlot de chaleur urbain. C'est dans cet objectif que la rue Garibaldi, grand axe routier, a été réhabilitée en linéaire de promenade paysagère et ombragée sur plus de 3 km. La première tranche des travaux réalisée entre 2014 et 2016 a permis la conservation de plus de 80 arbres existants, ainsi que l'implantation de 150 nouveaux arbres, d'arbustes et d'herbacées de différentes espèces répondant à des critères écologiques et esthétiques.

Une des particularités du projet réside dans la réutilisation d'anciens passages souterrains pour les voitures transformés en réservoirs de stockage des eaux pluviales. En effet, en période de canicule le mécanisme d'évapotranspiration de la végétation, permettant le refroidissement de l'air, est inhibé, les plantes conservent leur eau. L'utilisation de l'eau stockée pendant les périodes de pluies pour arroser la végétation permet de relancer ce mécanisme et de rafraîchir la ville.

D'après plusieurs campagnes de mesure conduites sur la rue Garibaldi, les arbres ont fait descendre en moyenne les températures de 1,78 °C à 2,33 °C en août 2016 et 2017. Pour les températures ressenties, l'écart entre les zones plantées et non plantées pouvait atteindre 10 °C de différence. Le projet se poursuit avec une nouvelle expérimentation d'irrigation en période de canicule pour dynamiser/renforcer l'évapotranspiration de la végétation.



Expérimentation sur le pouvoir rafraîchissant de la végétation lors de la requalification de la rue Garibaldi à Lyon. ©Laurence Danière

À RETENIR

- La végétation, et plus particulièrement les arbres, offre des espaces ombragés qui tamisent les rayons directs du soleil et améliorent le confort thermique.
- La préservation des arbres existants devrait être le premier objectif de toutes les stratégies souhaitant développer la canopée urbaine.
- Le mécanisme de rafraîchissement par évapotranspiration, complémentaire de celui de l'ombrage, est dépendant de la disponibilité en eau pour les plantes. La récupération et le stockage des eaux pluviales permettent de disposer de l'eau durant les périodes de canicule, sans avoir recours à l'eau potable pour l'arrosage.

RETOUR D'EXPÉRIENCE 18

**VÉGÉTALISATION DES PIEDS DES
REMPARTS DE LA VILLE D'AVIGNON
(PROVENCE-ALPES-CÔTE D'AZUR)**

En bref : désimperméabilisation de 1 900 places de parking qui longeaient les remparts et occasionnaient un îlot de chaleur urbain pour les transformer en prairies et voie de circulation douce, permettant d'améliorer le bien-être des citoyens et citoyennes.

Les remparts d'Avignon ceinturent la vieille ville et sont classés au Patrimoine mondial de l'UNESCO, constituant un des emblèmes majeurs de la cité. Jusqu'en 2010, les façades extérieures étaient longées par des parkings qui formaient un îlot de chaleur en période estivale. La désimperméabilisation des 1 900 places de parking a permis de libérer de l'espace pour des prairies aux pieds des remparts. Elles sont composées d'espèces végétales variées, adaptées à l'exposition (soleil ou mi-ombre) et au contexte méditerranéen. Les travaux ont également été l'occasion de redonner accès à une promenade ombragée aux piétons et aux cyclistes. Par ailleurs, ce projet démontre qu'il est possible de réaliser

de telles opérations à proximité de monuments historiques classés et de composer avec les prescriptions des architectes des bâtiments de France.



Végétalisation au pied des remparts après désimperméabilisation des parkings. ©Cécile Vo Van, Cerema

À RETENIR

- Une attention particulière doit être portée sur le choix des espèces. Privilégier des essences locales, c'est s'assurer qu'elles soient davantage adaptées au contexte climatique régional et qu'elles résistent aux vagues de chaleur, même sans arrosage.
- Monuments historiques classés et renaturation ne sont pas incompatibles. Il est tout à fait possible de composer avec les prescriptions des architectes des bâtiments de France, et d'aboutir à une mise en valeur du patrimoine existant.

**Créer de nouveaux espaces
pour améliorer la qualité de l'air**

Les plantes contribuent à améliorer la qualité de l'air, à diminuer la concentration en CO₂ atmosphérique par la photosynthèse et à réduire les concentrations de particules en suspension par des mécanismes d'absorption et de dépôt sur les surfaces foliaires (Litschke et Kuttler, 2008). En 2020, une synthèse réalisée par Bruxelles Environnement confirme que les arbres sont les végétaux les plus efficaces pour faire atténuer les polluants atmosphériques, le bruit et les fortes chaleurs, suivis des arbustes et des plantes herbacées. Les conifères sont généralement plus efficaces grâce à une plus grande surface d'interaction, et l'adsorption de composés organiques volatils. Ils sont également efficaces toute l'année puisqu'ils ne perdent pas leurs feuilles en hiver, à quelques exceptions près. Les feuillus obtiennent quant à eux de meilleurs résultats pour l'absorption de polluants gazeux (NO₂ et O₃ notamment). Enfin, les plantes à feuilles rugueuses peuvent absorber plus

de polluants que les celles à feuilles lisses (Sæbø *et al*, 2012).

La capacité de la végétation à réduire la pollution locale dépend toutefois de nombreux facteurs comme la nature des polluants, les conditions météorologiques ou encore, l'implantation de la végétation par rapport à la source locale de pollution (Baldauf *et al*, 2008 ; Lefebvre et Vranckx, 2013). S'intéressant à 4 zones critiques en termes de pollution de l'air, Bruxelles Environnement a estimé que des scénarios maximalistes de végétalisation permettraient une réduction de l'ordre de 5 à 10% des concentrations locales de NO₂. Cette étude confirme que les solutions fondées sur la nature sont généralement insuffisantes pour réduire significativement la pollution atmosphérique et que des mesures visant à réduire les émissions de polluants à la source doivent rester la priorité [44]. Les opérations de renaturation de parkings, de places de stationnement sur la chaussée, peuvent aussi être perçues comme un moyen de diminuer la présence de la voiture en milieu urbain, et de fait, contribuer à l'amélioration de l'air.

RETOUR D'EXPÉRIENCE 19

DÉMANTÈLEMENT D'UNE AUTOROUTE URBAINE À SÉOUL (CORÉE DU SUD)

En bref : démantèlement et réduction d'une autoroute de dix à quatre voies pour en faire un parc linéaire de 5 km et permettre la réouverture d'une rivière.

En 2005, la ville de Séoul lance de grands travaux pour rouvrir la rivière Cheonggyecheon située sous une route de dix voies, elle-même surmontée par une autoroute à quatre voies. Les objectifs du projet sont multiples. Ils visent en priorité à améliorer le cadre de vie de la population et sa santé en réduisant la pollution atmosphérique et le bruit engendrés par le passage quotidien des 170 000 véhicules. L'autoroute est alors démantelée et seules quatre voies sur les dix sont conservées afin de laisser suffisamment de place au Cheonggyecheon, ses berges et espaces de promenade attenants. Aujourd'hui, la rivière s'écoule le long d'un parc linéaire de plus de 5 km et attire plus de 60 000 promeneurs par jour.

Plusieurs scientifiques ont effectué un suivi des bénéfiques et soulignent l'intérêt de cette opération dans la protection contre les inondations (Hwang, 2005). Entre les travaux de pré-restauration en 2003 et fin 2008, le nombre d'espèces végétales est passé de 62 à 308, les espèces de poissons de 4 à 25, les espèces d'oiseaux de 6 à 36, les espèces d'invertébrés aquatiques de 5 à 53, les espèces d'insectes de 15 à 192,

les mammifères de 2 à 4 et les amphibiens de 4 à 8 (Revkin, 2009 ; kim *et al.*, 2009). Le projet a également participé à la réduction de l'effet d'îlot de chaleur urbain avec des températures mesurées le long du cours d'eau de 3,3 à 5,9 °C plus fraîches que sur une route parallèle à quelques centaines de mètres. Cela résulte de la suppression de l'autoroute, de l'effet de refroidissement du ruisseau, du développement de la végétation et d'une augmentation de la vitesse du vent se déplaçant dans le corridor. Enfin, en ce qui concerne la qualité de l'air, les mesures effectuées ont confirmé une réduction des particules fines de 35 %, passant de 74 à 48 µg/m³. Avant la restauration, le risque de souffrir de maladies respiratoires pour les personnes habitant cette zone était plus de deux fois supérieur à celui des personnes habitant d'autres quartiers de la ville.

Malgré les performances environnementales du projet, des scientifiques ont mis en évidence des conflits entre la ville de Séoul et une coalition d'associations de protection de l'environnement autour de différentes approches de la renaturation, ces dernières regrettant le manque d'authenticité écologique dans le cours d'eau restauré (Cho, 2010). D'autres regrettent le caractère artificiel où la végétation est enchâssée dans un environnement minéral (Lévy, 2015). Ce projet offre néanmoins un retour d'expérience unique sur le démantèlement d'infrastructures routières de cette envergure pour restaurer un cours d'eau et ses annexes.



Revitalisation du cours d'eau Cheonggyecheon, recouvert par un viaduc autoroutier pendant des décennies. ©Global Designing Cities Initiative

À RETENIR

- Les opérations de renaturation de voirie sont autant d'occasions permettant de limiter la présence de la voiture en ville et donc de diminuer les émissions de polluants à la source. C'est également une façon de redonner plus de place aux piétons et de favoriser les transports actifs connus pour améliorer la santé. En effet, bien qu'incontournable, la marche a été la grande oubliée des politiques publiques de transport en France alors qu'elle est le premier mode de déplacement en Île-de-France. Redonner en ville de l'espace aux piétons, c'est aussi répondre à des enjeux climatiques, de santé et de cadre de vie [45].
- La capacité d'absorption des polluants par les végétaux dépend de plusieurs facteurs tels que les espèces choisies, les flux d'air, la concentration de polluants, la position des plantes, etc. (Pugh *et al.*, 2012). Dans tous les cas, cette capacité d'absorption des polluants par les végétaux demeure faible en proportion et ne peut justifier une absence de diminution des émissions à la source.

RETOUR D'EXPÉRIENCE 20

UN ESPACE TEST SUR LA POLLUTION
DE L'AIR À METZ (GRAND EST)

En bref : la ville de Metz a créé un espace test pour étudier les bénéfices des arbres sur l'amélioration de la qualité de l'air, en lien avec l'étude SESAME.

L'étude SESAME (Services ÉcoSystémiques rendus par les Arbres, Modulés selon l'Essence) est un projet, initié en 2015 par la ville de Metz et mené en partenariat avec l'Eurométropole de Metz et le Cerema. L'étude SESAME identifie pour 85 espèces d'arbres et arbustes, leurs services écosystémiques, notamment sur la qualité de l'air, comme supports de biodiversité, pour la régulation du climat local, la séquestration du carbone, le cadre de vie/paysage et l'adaptation au changement climatique. L'étude prend également en compte les risques allergiques, et les contraintes physiques (dimension de l'arbre, système racinaire, branches cassantes, etc.). L'étude a abouti à la création d'un outil opérationnel destiné aux collectivités, aux particuliers et aux aménageurs, apportant une aide à la décision dans le choix des espèces à planter pour tout projet de plantation d'arbres et arbustes. Cet outil sera transposable à d'autres contextes géographiques. L'étude se poursuit actuellement avec l'analyse de 250 autres essences d'arbres, arbustes et plantes grimpantes et l'étude de nouveaux services et contraintes.

Le plan climat de la ville de Metz intègre des plantations massives d'arbres (20 000 arbres d'ici 2030), qui seront choisis en fonction des résultats de l'étude, le mélange et la diversité des espèces étant une recommandation essentielle pour tout projet de plantation. Un espace test SESAME a été réalisé à l'intersection d'un axe routier très fréquenté qui absorbe un trafic très important, de l'ordre de 4 000 à 9 000 véhicules par jour. ATMO Grand Est, association agréée de surveillance de la qualité de l'air, est sollicitée pour évaluer la qualité de l'air sur ce site d'étude et déterminer l'impact potentiel de la végétation sur la qualité de l'air environnant et donc sur la santé des populations vivant à proximité.

Les polluants mesurés pendant cette étude sont le dioxyde d'azote (NO₂) et les particules dont le diamètre est inférieur à 10 µm (PM10), issus principalement du trafic routier. Parmi les 18 espèces d'arbres sélectionnées, certaines absorbent les polluants (par exemple le Micocoulier de Provence) et d'autres sont favorables à la biodiversité (comme le Sureau noir). Des capteurs seront mis en place sur cette zone et sur la zone lui faisant face pour comparer l'impact des végétaux sur la qualité de l'air et la biodiversité. Des campagnes de mesure seront réalisées tous les deux ans pour vérifier l'impact potentiel des espèces plantées sur la qualité de l'air en comparant les concentrations mesurées à proximité du trafic routier, à quelques dizaines de mètres, avec ou sans barrière végétale environnante.



Plantation des arbres de l'espace test SESAME à Metz. Quatorze espèces ont été sélectionnées pour leur capacité à absorber les polluants et à accueillir la faune locale.
© Ville de Metz

À RETENIR

- Les végétaux peuvent piéger les polluants de l'air, soit parce qu'ils en absorbent une partie (polluants gazeux), soit parce que les polluants se déposent sur leur surface (particules fines).
- L'effet des végétaux sur la qualité de l'air est certes limité mais avéré (Selmi *et al*, 2016), et passe par une augmentation massive du couvert végétalisé, notamment arboré (Cerema, 2019).
- Une étude réalisée par l'Eurométropole de Strasbourg démontre que la végétation arborée permet d'éliminer 0,03 % du monoxyde de carbone (CO), 7 % des PM10, 1,5 % des PM2.5, et 0,5 % du dioxyde de soufre (SO₂) (Selmi *et al*, 2016).
- L'étude SESAME du Cerema propose un tableau des performances de 85 espèces d'arbres en matière de régulation de la pollution de l'air (les espèces étudiées ne sont cependant pas toutes locales) [46].

Des projets de renaturation par et pour la population

La santé est étroitement liée à la qualité du cadre de vie et à l'accès aux espaces de nature. Redonner plus de place à la nature en ville, en quantité comme en qualité, est un moyen d'agir pour le bien-être de la population. Ce constat est renforcé par une forte demande sociale en la matière, qui s'exprime à travers le succès d'initiatives telles que les permis de végétaliser, les budgets participatifs ou encore la création de jardins partagés.

Renaturer les villes est aussi un moyen de lutter contre ce que les sociologues et les écologues appellent « l'extinction de l'expérience de nature » (Miller, 2005). Ces dernières années, les recherches interdisciplinaires sur le sujet, par exemple les travaux d'Anne-Caroline Prévot au Centre d'écologie et des sciences de la conservation du Muséum national d'Histoire naturelle, ont montré la nécessité de maintenir de la nature dans nos espaces urbains afin de multiplier les occasions pour les habitants et habitantes d'être au contact de la biodiversité [47]. C'est par l'observation et l'expérience quotidienne avec la faune, la flore et la fonge que se forment une préoccupation et un intérêt pour le vivant. Ces expériences peuvent être enrichies par la conception d'espaces fortement accueillants pour la biodiversité. Que ce soit pour convaincre, améliorer l'acceptabilité des projets ou mieux répondre aux demandes sociales, les intérêts à engager des démarches participatives sont multiples. Ces expériences participent par ailleurs au bien-être des enfants au quotidien (Fuller *et al*, 2007).

RETOUR D'EXPÉRIENCE 21

CRÉATION D'UN JARDIN FRICHE SUR UN ANCIEN PARKING À AUBERVILLIERS (ÎLE-DE-FRANCE)

En bref : transformation d'un parking en jardin de rocailles pour améliorer le cadre de vie

Le quartier de la Maladrerie est une cité construite dans les années 1980 à Aubervilliers en Seine-Saint-Denis. L'entrée du quartier donnait sur un parking abandonné depuis plusieurs années. Afin d'améliorer le cadre de vie, l'agence de paysage Wagon Landscaping en coopération avec l'habitante et artiste Sylvie Da Costa, mandatés par l'Office public de l'habitat (OPH) d'Aubervilliers, ont œuvré pendant cinq jours pour créer un Jardin des Joyeux en lieu et place du parking. La couche d'enrobé a d'abord été cassée par l'OPH et laissée sur place afin de créer un « jardin de rocailles » de 1 600 m² entre la friche et le jardin botanique. Le site de 1 700 m² a fait l'objet d'apports de terres extérieures (42 m³) et de plantations de 150 espèces vivaces, arbustes et jeunes arbres pour amorcer une dynamique de recolonisation. Au total, 2 000 plants ont été introduits, choisis

pour être adaptés à un substrat minéral et nécessitant un entretien réduit.

Cinq ans après les premiers travaux, la végétation s'est développée au point de recouvrir une grande partie du bitume concassé. Le Jardin des Joyeux est géré le moins possible pour conserver son aspect en friche et laisser apparaître la végétation à travers l'asphalte. Wagon Landscaping, en plus d'avoir réalisé les travaux, réalise un « jardinage par soustraction » qui consiste uniquement à éclaircir la végétation afin de laisser plus de place aux espèces semées. Le jardin ne nécessite aucun arrosage, rien n'est exporté, les produits de la taille sont étalés dans la lisière arborée pour enrichir progressivement le sol. Enfin, la ville d'Aubervilliers a organisé plusieurs journées pour inviter la population à découvrir le projet et le nouvel écosystème évolutif.



Réalisation des premiers travaux sur l'ancien parking : concassage du béton et plantations. ©Wagon landscaping

À RETENIR

- Les pratiques de gestion écologique ou de non-gestion peuvent être déployées partout en ville, leur acceptation est facilitée par une communication qui montre leurs apports pour la nature et pour la santé publique.
- Il est possible de recréer des dynamiques de reconquête végétale même sur des sols fortement artificialisés.

RETOUR D'EXPÉRIENCE 22

**TRANSFORMATION D'UN ANCIEN
AÉRODROME À FRANCFORT (ALLEMAGNE)**

En bref : transformation d'un aéroport en un parc public accueillant différents usages : loisirs sportifs, promenades, ateliers pédagogiques pour les écoles, recolonisation spontanée de la faune et de la flore.

Dix ans après la fermeture d'un ancien aéroport, la ville de Francfort (Allemagne) rachète les 7 hectares de terrain pour les transformer en un nouvel espace de nature ouvert au public. L'objectif est triple : garantir et renforcer la recolonisation spontanée des lieux par la biodiversité, créer un espace récréatif et engager le minimum de dépenses. Plusieurs bâtiments ont donc été maintenus pour conserver l'histoire du site, accueillir des ateliers d'artistes et des cafés. Un tiers de l'ancienne piste a également été conservé pour maintenir un des usages identifiés sur la friche. En effet, à l'écart de la circulation, la piste offre un cadre propice pour la pratique du vélo, du roller et du skateboard.

En tout, 3 hectares de piste et parking ont été démantelés. Au lieu d'être retirées, les plaques de béton ont été concassées et laissées au sol, offrant une hétéro-

généité de cavités colonisables par la faune et la flore. La taille des plaques varie en fonction des secteurs, elle diminue à mesure que l'on s'éloigne des bâtiments. Ceci permet de mettre en scène la reconquête de la nature à travers un gradient de désimperméabilisation et une série de processus de succession végétale. À proximité des bâtiments, le béton est encore très présent, puis viennent les milieux rocailloux, les prairies, les bosquets et enfin un boisement spontané reflétant le climax (état final d'une succession écologique).

Aujourd'hui, l'ancien aéroport est devenu un espace de loisirs et de promenade, mais aussi un lieu pédagogique. Régulièrement, des animations sont proposées aux personnes habitant à proximité et aux scolaires (reconnaissance des plantes, découverte des amphibiens, sorties ornithologiques). Ce projet rappelle celui du célèbre aéroport de Berlin Tempelhof devenu lui aussi un parc urbain en 2007 à la suite de la désartificialisation d'une partie des sols bitumés. Les aéroports, tout comme les grandes zones industrielles ou les gares, occupent des surfaces considérables qui peuvent se transformer en nouvelles opportunités d'augmenter le nombre d'espaces de nature.



La piste de l'ancien aéroport a été maintenue pour conserver la pratique du vélo et l'observation de la nature. ©Stefan Cop

À RETENIR

- Pour la réhabilitation des friches, il est important d'étudier les usages présents sur le site afin de concevoir des projets qui répondent au mieux aux attentes sociales.
- Les sites renaturés sont autant de nouveaux lieux pédagogiques pouvant être utilisés pour sensibiliser les citoyens aux enjeux de préservation de la biodiversité.

RETOUR D'EXPÉRIENCE 23

**RENATURATION DE L'ANCIENNE ROUTE
DÉPARTEMENTALE À SAINT-JACQUES-
DE-LA-LANDE (BRETAGNE)**

En bref : désimperméabilisation et renaturation passive d'une portion de route dans le cadre de la création d'un parc écologique.

Démarré en 2004, l'aménagement du parc écologique de Saint-Jacques-de-la-Lande, près de Rennes, offre aujourd'hui 45 hectares de zones humides, d'espaces boisés, de lieux de détente, de loisirs et de chemins de promenade. Hormis l'accueil du public, le parc assure la gestion des eaux pluviales du nouveau centre-ville. Des canaux plantés de phragmites et des noues végétalisées permettent de diriger les eaux vers un premier bassin de décantation, puis vers une roselière (1,7 hectares) assurant la phyto-épuration des eaux de ruissellement. Les travaux ont permis de désartificialiser partiellement une ancienne route départementale. Pilotée par

les services de la ville et l'Atelier de paysages Bruel Delmar, l'opération a consisté à concasser le bitume et à le conserver sur place pour ne pas générer de déchets. Le principe retenu est une restauration écologique passive : les blocs concassés d'enrobé constituent des pièges à graines, futurs foyers de développement d'une végétation pionnière, le long d'une voie cyclable aménagée sur l'autre partie de la voie désaffectée. Une équipe de chercheurs et d'étudiants de l'Institut Agro Rennes-Angers effectue un suivi de la flore, des lichens et des insectes sur cet espace en libre évolution. Après quelques mois, des observations opportunistes ont permis de confirmer la présence de reptiles (vipères, lézards), dont ces milieux rocailloux sont l'habitat caractéristique.

En combinant une approche écologique et artistique, ce projet réussit le pari d'impliquer les personnes habitant à proximité dans ce projet de restauration écologique. En clin d'œil aux démarches de réensauvagement des aéroports de Berlin Tempelhof et de Francfort Bonames à la fin des années 2010, il réunit des écologues et des paysagistes.



Le bitume concassé laisse place à une végétation spontanée sur une ancienne route départementale à Saint-Jacques-de-la-Lande. ©Yann Laurent

À RETENIR

- Le bitume concassé peut être conservé sur place pour créer un nouveau type d'habitat (milieu rocailloux) adapté à certains groupes d'espèces comme les reptiles : couleuvres, vipères, lézard des murailles.
- Les espaces renaturés peuvent être mis en scène afin de proposer une lecture à la fois artistique et scientifique. La conciliation de l'art et de l'écologie est un moyen de faciliter l'appropriation des projets par les riverains.



RETOUR D'EXPÉRIENCE 24

LE TRANSFORMATEUR, À SAINT-NICOLAS-DE-REDON (PAYS DE LA LOIRE)

En bref : renaturation d'une friche industrielle via plusieurs chantiers participatifs, permettant de réaliser des expérimentations en matière de renaturation tout en organisant de nombreuses animations pour le public.

À Saint-Nicolas-de-Redon (Loire-Atlantique), une ancienne friche industrielle de 5,5 hectares était régulièrement inondée par les débordements de la Vilaine. En 2001, le département de Loire-Atlantique et la ville ont fait appel à des étudiants de l'École nationale supérieure du paysage de Versailles pour réaliser une recherche paysagère sur le devenir de la friche industrielle. La proposition phare est de renaturer les lieux en s'appuyant sur la célèbre phrase d'Antoine Lavoisier « rien ne se perd, rien ne se crée, tout se transforme ». Seuls les matériaux polluants sont évacués, tandis que les autres sont conservés sur place, valorisés pour un autre usage ou pour devenir supports de la reconquête végétale. Les chantiers d'expérimentation et participatifs conduisent la population à se regrouper sous forme associative pour

poursuivre les travaux de renaturation et de gestion du site. Face à ce succès, le département de Loire-Atlantique rachète le site en 2005 au titre de sa politique d'espace naturel sensible (ENS) et passe une convention avec l'association « Les Amis du Transformateur » [48] afin de : (i) gérer et renaturer l'ENS, (ii) mettre en place les conditions nécessaires à l'ouverture et à l'accueil du public, (iii) recueillir et diffuser les expériences faites sur le site. À partir de la friche initiale, la zone d'action de l'association s'est étendue à une quinzaine d'hectares (potager, parcelles de pré et marais pour le pâturage, etc.).

Le Transformateur se caractérise par une hétérogénéité d'espaces (hangars, dalles bétonnées, terrains non bâtis mais réhaussés par remblaiement, milieux herbacés, zones humides), qui a inspiré les futurs usages du site et les projets de renaturation. De multiples expérimentations sont menées depuis 2006 :

- Désimperméabilisation sous forme de tranchées ou de micro-fosses pour accélérer le soulèvement et le grignotage du béton par le végétal.
- Chantiers participatifs pour recréer un boisement, des haies, des potagers, des vergers. Ces chantiers ont permis la transmission de savoir-faire ruraux tels que le plessage de haies, la vannerie et l'utilisa-



Le Transformateur de Saint-Nicolas-de-Redon est un projet de renaturation d'une friche par les habitants et habitantes du territoire.
©Christian Baudu - Scopidrone

tion de matériaux récupérés sur le site.

- Acquisition de vaches nantaises pour gérer les prairies.
- Réalisations artistiques valorisant l'identité du site : Land'Art avec les matériaux de déconstruction, festival de street art (réalisation de graffs sur le bâti).
- Organisation de nombreuses animations : sorties naturalistes, visites historiques, ateliers de cuisine, chantiers participatifs de gestion ou de plantation, expositions artistiques.

En 2015, l'expérimentation du « Bosquito » a été amorcée sur le site du Transformateur, avec la participation de 28 bénévoles. Une surface d'enrobé et de béton de 1 000 m² a été retirée et recouverte d'amendement organique puis d'un paillage végétal afin de créer un futur boqueteau [49]. Par leur conception et leurs

aspects techniques, les boqueteaux se présentent comme des modèles adaptables de boisement et d'installation d'arbres en ville.

Un suivi scientifique a montré la présence de quelques espèces patrimoniales sur le site : l'Ophrys abeille et l'Œillet des dunes. On retrouve également des plantes très rustiques, telles que des bryophytes et sedums, révélatrices d'une reconquête des lieux par les végétaux. Le site est utilisé par les oiseaux comme une zone de transit entre la Vilaine, les boisements et les prairies alentours, ainsi que comme zone de chasse par les chiroptères. Le Milan noir, la Pipistrelle commune et la Pipistrelle de Kuhl y ont par exemple été observés. L'existence de cette dynamique permet d'illustrer efficacement ce processus de reconquête d'une zone industrielle par la nature spontanée.

À RETENIR

- Ce sont les habitants et habitantes, à travers la création d'une association, qui décident et organisent les opérations de renaturation, qui gèrent les lieux et proposent des animations pour faire connaître le projet.
- Approche exemplaire en matière de réemploi des terres et des matériaux de déconstruction qui permet à la fois de réduire les coûts financiers et écologiques des opérations de démolition, d'exportation de matériaux, de dépollution et de traitement/stockage des déchets.
- Le site renaturé est protégé dans le temps grâce à l'acquisition foncière du Département au titre de sa compétence ENS, mais d'autres outils sont mobilisables pour assurer la protection des espaces renaturés : classement en zone N ou en Espaces boisés classés dans les documents d'urbanisme, création d'une Obligation réelle environnementale, etc.



QUEL POTENTIEL DE RENATURATION EN ÎLE-DE-FRANCE ?

La méthodologie présentée dans ce guide permet d'estimer le nombre d'hectares potentiellement désimperméabilisables et renaturables. Ce dernier peut être calculé pour chaque commune francilienne, chaque département et à l'échelle régionale, ainsi qu'à d'autres échelons territoriaux (parcs naturels régionaux, syndicats de bassins, établissements publics territoriaux, etc.). À titre d'exemple, les calculs et la visualisation des données ont ici été effectués sur la commune d'Aulnay-sous-Bois. Les chiffres sont également donnés à titre indicatif pour les départements de Paris et de la petite couronne. Le potentiel pour les EPT de la Métropole du Grand Paris sont présentés en annexe 1.

Potentiel de renaturation à Aulnay-sous-Bois

Surface renaturable en fonction du nombre d'enjeux

À l'échelle de la commune, la méthode permet d'estimer un total de 256,66 hectares de sites minéralisés potentiellement renaturables, dont :

- 16,92 hectares ne sont associés à aucun enjeu majeur de renaturation. Il s'agit de sites minéralisés identifiés grâce au MOS (p. 29) mais qui ne sont pas localisés dans des zones de renaturation prioritaires (autrement dit sur des mailles à faible score).
- 71,87 hectares concernés par un seul enjeu de renaturation, c'est à dire localisés dans une zone prioritaire pour un seul des enjeux étudiés (qu'il s'agisse de la biodiversité, du changement climatique ou du cadre de vie).
- 84,26 hectares localisés dans des zones considérées comme prioritaires pour deux des enjeux étudiés (par exemple, biodiversité et changement climatique, ou changement climatique et cadre de vie).
- 83,61 hectares localisés dans des zones qui sont prioritaires pour les 3 enjeux étudiés. Les sites concernés par ce cas de figure représentent 5,17 % du territoire.

Surface renaturable par enjeu

Il est également possible d'étudier les surfaces renaturables selon le type (et non le nombre) d'enjeu. Les surfaces obtenues seront alors plus élevées que pour l'étude du nombre d'enjeux. À titre d'exemple, les 228,24 hectares potentiellement renaturables en faveur de la biodiversité regroupent les sites présentant uniquement un seul enjeu biodiversité, mais aussi les sites avec un enjeu biodiversité associé à un autre enjeu (biodiversité et changement climatique, ou biodiversité et cadre de vie), et enfin les sites qui cumulent les 3 enjeux. Ceci permet d'évaluer la surface des sites renaturables en faveur de la biodiversité.

ENJEUX	SURFACE POTENTIELLE (HA)	% PAR RAPPORT À LA SURFACE DU TERRITOIRE
SURFACE RENATURABLE PAR ENJEU		
Biodiversité	228,24	14,12
Changement climatique	158,26	9,79
Santé et cadre de vie	104,74	6,48
SURFACE RENATURABLE EN FONCTION DU NOMBRE D'ENJEU		
Sans enjeu majeur	16,92	1,05
1 enjeu identifié	71,87	4,45
2 enjeux identifiés	84,26	5,21
3 enjeux identifiés	83,61	5,17
Surface totale	256,66 ha	15,88 %

TABLEAU 10. Aulnay-sous-Bois



FIGURE 17. Cartographie localisant les surfaces minéralisées potentiellement désimperméabilisables en fonction du nombre d'enjeux (Aulnay-sous-Bois)

Potentiel de renaturation à Paris et en petite couronne

L'estimation de ce potentiel est donnée à titre indicatif et doit être interprétée avec précaution. En effet, bien que celui repose sur un jeu de données issues d'interprétations manuelles menées depuis des orthophotographies, certains sites considérés comme potentiellement imperméabilisés ne le sont pas toujours. À titre d'exemple, les cours d'immeubles et leurs contours sont considérés comme imperméables, bien que ce ne soit pas nécessairement le cas. À l'inverse, certains alignements d'arbres

imperméables, bâtiments abandonnés, trottoirs surdimensionnés ou places de parking sur la chaussée n'ont pas pu être localisés dans cette première approche et ne sont donc pas pris en compte à ce stade. Enfin, il est nécessaire de rappeler que la faisabilité des opérations de renaturation n'a pas été évaluée. Ces limites confirment l'importance d'une phase de vérification sur le terrain qui devra être mise en place par les collectivités utilisant la méthodologie. Pour chaque site identifié, il demeure par ailleurs indispensable de prendre en compte les usages associés aux sites sélectionnés avant d'envisager tous types de travaux.

ENJEUX	SURFACE POTENTIELLE (HA)	% PAR RAPPORT À LA SURFACE DU TERRITOIRE
SURFACE RENATURABLE PAR ENJEU		
Biodiversité	1 206,46	11,44
Changement climatique	1 258,88	11,94
Santé et cadre de vie	1 318,90	12,51
SURFACE RENATURABLE EN FONCTION DU NOMBRE D'ENJEUX		
Sans enjeu majeur	39,20	0,37
1 enjeu identifié	62,04	0,59
2 enjeux identifiés	193,23	1,83
3 enjeux identifiés	1 111,92	10,55
Surface totale	1 412,89 ha	13,34%

TABLEAU 11. Paris (75)

ENJEUX	SURFACE POTENTIELLE (HA)	% PAR RAPPORT À LA SURFACE DU TERRITOIRE
SURFACE RENATURABLE PAR ENJEU		
Biodiversité	1 705,88	9,76
Changement climatique	1 502,42	8,59
Santé et cadre de vie	1 271,10	7,27
SURFACE RENATURABLE EN FONCTION DU NOMBRE D'ENJEUX		
Sans enjeu majeur	683,68	3,91
1 enjeu identifié	504,09	2,88
2 enjeux identifiés	659,91	3,77
3 enjeux identifiés	885,17	5,06
Surface totale	2 732,85 ha	15,63%

TABLEAU 12. Hauts-de-Seine (92)

ENJEUX	SURFACE POTENTIELLE (HA)	% PAR RAPPORT À LA SURFACE DU TERRITOIRE
SURFACE RENATURABLE PAR ENJEU		
Biodiversité	2 533,02	10,68
Changement climatique	1 979,07	8,35
Santé et cadre de vie	2 188,47	9,23
SURFACE RENATURABLE EN FONCTION DU NOMBRE D'ENJEUX		
Sans enjeu majeur	747,93	3,15
1 enjeu identifié	702,02	2,96
2 enjeux identifiés	966,86	4,08
3 enjeux identifiés	1 355,23	5,72
Surface totale	3 772,03 ha	15,91 %

TABLEAU 13. Seine-Saint-Denis (93)

ENJEUX	SURFACE POTENTIELLE (HA)	% PAR RAPPORT À LA SURFACE DU TERRITOIRE
SURFACE RENATURABLE PAR ENJEU		
Biodiversité	1 950,58	7,94
Changement climatique	1 775,60	7,23
Santé et cadre de vie	1 618,25	6,59
SURFACE RENATURABLE EN FONCTION DU NOMBRE D'ENJEUX		
Sans enjeu majeur	703,66	2,86
1 enjeu identifié	648,99	2,64
2 enjeux identifiés	685,51	2,79
3 enjeux identifiés	1 108,14	4,51
Surface totale	3 146,30 ha	12,81 %

TABLEAU 14. Val-de-Marne (94)

ENJEUX	SURFACE POTENTIELLE (HA)	% PAR RAPPORT À LA SURFACE DU TERRITOIRE
SURFACE RENATURABLE PAR ENJEU		
Biodiversité	15 139,52	1,26
Changement climatique	14 872,52	1,24
Santé et cadre de vie	10 373,42	0,86
SURFACE RENATURABLE EN FONCTION DU NOMBRE D'ENJEUX		
Sans enjeu majeur	10 385,10	0,86
1 enjeu identifié	6918,48	0,58
2 enjeux identifiés	6214,94	0,52
3 enjeux identifiés	7016,79	0,58
Surface totale	30 535,31 ha	2,54 %

TABLEAU 15. Île-de-France



#3

RÉUSSIR SON PROJET DE RENATURATION LES ÉTAPES ESSENTIELLES

Cette troisième partie propose quelques recommandations générales pour réussir toutes les étapes de son projet : la planification, la mise en œuvre, le suivi et l'évaluation, ainsi que la pérennisation (ou l'ancrage) des projets dans le temps.

Avant toute chose, il est nécessaire de constituer une équipe pluridisciplinaire pour concevoir et suivre les opérations. Idéalement elle impliquerait différents services de la collectivité, des spécialistes de

la renaturation, des organismes de recherche, des associations locales et si possible les habitants et habitantes concernés par le projet. Réunir plusieurs acteurs dès l'origine du projet permet de prendre en compte une diversité de points de vue et ainsi de fluidifier l'articulation des différentes étapes. Les compétences en écologie scientifique sont primordiales et doivent être identifiées en amont de la démarche.

PRIORISER ET ESTIMER LA FAISABILITÉ DES PROJETS

La méthodologie proposée p. 27 part du principe que les bénéficiaires de la renaturation seront plus importants s'ils ciblent l'adaptation au changement climatique, la reconquête de la biodiversité et l'amélioration du cadre de vie des populations. L'outil cartographique proposé permet ainsi aux collectivités de prioriser leurs actions, mais pas d'estimer la faisabilité technique et financière des projets. Or, la difficulté technique associée à la renaturation dépend de nombreux paramètres. Dans le cadre de sa stratégie de reconquête de ses espaces imperméabilisés, la ville de Berlin s'appuie sur 4 critères pour guider la priorisation des actions.

Le statut foncier

Il convient de prioriser les projets de renaturation sur des sites appartenant au domaine public, les sites privés nécessitant une acquisition préalable qui peut se révéler plus longue. La collectivité peut néanmoins imaginer des dispositifs pour inciter, financer ou accompagner les propriétaires privés à renaturer leurs espaces imperméables (permis de végétaliser, aides de l'agence de l'eau), tout en effectuant une prospection foncière (prise de contact avec les propriétaires privés, identification des biens vacants et sans maître).

	PRIORITÉ FORTE	PRIORITÉ MOYENNE	PRIORITÉ FAIBLE
Statut foncier	Public		Privé
Effort technique	Peu d'efforts	Démolition de petites structures (enrobé, mobilier urbain)	Démolition de grosses structures (bâtiments)
Surface désimperméabilisable sur le site	Toute la surface	Plusieurs zones dispersées	Quelques zones de petite taille et très isolées
Temps nécessaire à la réalisation du projet	Un à deux ans	Environ cinq ans	Supérieur à cinq ans

TABLEAU 16. Critères utilisés par la ville de Berlin pour la faisabilité d'un projet de renaturation des espaces imperméabilisés

L'effort technique

Plus un projet implique un effort technique élevé, plus il sera difficile à mettre en place et onéreux. Sur 2 sites de même taille, un projet nécessitant la démolition de grosses infrastructures ou de bâtiments sera plus difficile à mettre en place qu'un « simple » retrait de surface imperméable (parking, place publique).

La part du site à désimperméabiliser

Un site sur lequel la totalité de la surface perméable peut être retirée présente davantage d'intérêt qu'un site où l'on ne peut agir que sur des petites zones isolées les unes des autres.

Le temps nécessaire à la réalisation du projet

Il est possible de privilégier les projets qui pourront être mis en œuvre rapidement (sous un à deux ans), par rapport à ceux pouvant être menés à moyen terme (environ cinq ans), ou à long terme (au-delà de cinq ans).

DIAGNOSTICS PRÉALABLES

Contexte local et historique

Avant de commencer un projet, une phase de recherches historiques peut s'avérer utile afin de déterminer un état antérieur ou de référence. Elle peut être conduite à travers des enquêtes dans des archives de la collectivité, en consultant les habitants ou encore en étudiant la toponymie des lieux (étude des noms de rue, cartes anciennes). Grâce à son portail <https://remonterletemps.ign.fr/>, l'Institut national de l'information géographique et forestière (IGN) permet par exemple d'observer les évolutions du territoire au cours du temps depuis des photographies aériennes. En Seine-Saint-Denis, le Géoportail départemental <https://geoportail93.fr/> permet également d'effectuer ce type de recherches historiques. De la même façon, une phase de recherches sur le contexte local (niveau des nappes phréatiques, type de sous-sol, etc.) permet d'orienter le projet de façon cohérente avec son environnement.

Pollutions majeures

Les pollutions majeures liées à l'histoire du site, notamment par des substances capables de migrer, telles que les hydrocarbures et métaux lourds (plomb, zinc, cuivre, etc.), peuvent être étudiées au moyen d'une recherche historique concernant les occupations urbaines passées. Ce type d'étude peut conduire à la création d'une cartographie de zone de présomption de pollutions sur laquelle des études et sondages pourront être effectués. En cas de sols dont la pollution est avérée, le projet sera à adapter en fonction des résultats des analyses (voir p. 86). Certaines analyses pourront révéler une pollution qui nécessitera d'adapter le projet pour éviter que les polluants ne migrent vers les eaux souterraines.

Hauteur de la nappe phréatique

D'un point de vue hydrologique, la hauteur de la nappe phréatique doit être étudiée. En effet, une désimperméabilisation peut entraîner un risque de contamination des eaux souterraines par des pollutions chroniques ou accidentelles [50] ainsi que des risques de remontée de la nappe lors d'épisodes pluvieux intenses, notamment si la nappe est affleurante [51].

Toutefois, la présence d'une nappe haute peut aussi se révéler être un avantage dans certains contextes, comme la restauration de zones humides. Le niveau des plus hautes eaux d'une nappe donnée est défini par une étude hydrogéologique faisant appel aux données historiques (BSS « Banque du Sous-sol », archives des services concernés, des exploitants, etc.), et peut éventuellement être complétée par une enquête de quartier ou à l'aide de dispositifs piézométriques [52].

Risques liés aux types de sol et aux roches mères

Certains sols présentent des comportements mécaniques pouvant limiter voire interdire l'infiltration et compromettre la renaturation (risque de dissolution et d'effondrement des sols gypseux [53] ; « retrait-gonflement » des sols argileux [54] ; zones karstiques ou fissurées). Ces différents phénomènes sont donc à étudier en vue de caractériser leur présence ou non sur le site à renaturer. Les risques évoqués ici sont à considérer dans le cas où le projet de renaturation viserait à créer une zone d'infiltration (espace vert inondable, jardin de pluie, zone d'expansion des crues), mais n'interdisent pas nécessairement tout projet de désimperméabilisation / renaturation.

Évaluation écologique du site

À la suite de cette phase de recherche, il est également nécessaire de prévoir une évaluation de l'état écologique initial du site dans lequel le projet va s'inscrire. Ce diagnostic doit s'adapter à la localisation du site et à sa taille, mais devra comprendre a minima des inventaires de la faune, de la flore et des habitats, des analyses du sol, une étude des continuités écologiques dans le périmètre du projet. Il pourra être réalisé par des écologues et naturalistes à leur compte, des bureaux d'études ou par le tissu associatif local. Bien que les sites ciblés par la renaturation soient a priori très dégradés, certaines espèces peuvent s'y être installées. Leur présence doit orienter la trajectoire de renaturation à privilégier. Par ailleurs,

une prospection naturaliste s'effectue généralement au-delà du site pour mieux comprendre l'environnement dans lequel il s'insère et favoriser un projet qui ait un sens écologique à l'échelle du paysage. Si le projet comprend une multitude de sites, cette opération est à renouveler pour chacun d'entre eux.

L'évaluation écologique devra si possible s'appuyer sur des protocoles standardisés et facilement répliquables. Les programmes de sciences participatives proposés par le programme Vigie-Nature du Muséum national d'Histoire naturelle sont tout à fait indiqués pour effectuer un suivi dans le temps. Certains d'entre eux sont présentés plus loin dans ce guide. Il conviendra de cibler les groupes taxonomiques qui font sens en fonction du site et de l'écosystème restauré.

MISE EN ŒUVRE

DÉMANTÈLEMENT D'INFRASTRUCTURES ET DÉSCÈLLEMENT

En ce qui concerne les zones imperméabilisées, l'étape cruciale consiste à retirer les revêtements recouvrant le sol, tels que le béton, l'enrobé ou l'asphalte. Cette étape n'est pas toujours suffisante pour remettre les sols à nu, certaines sous-couches artificielles pouvant être présentes, comme le gravier ou le mâchefer, qui demanderont à être extraites.

Cette étape demande de faire appel à des entreprises

spécialisées, bien qu'il existe des initiatives ayant recours au volontariat à travers l'organisation de chantiers participatifs (voir p. 105). Cependant, cette seconde option s'applique généralement à de petites surfaces et doit se faire dans un cadre juridique et sécuritaire adapté.

Réaliser un diagnostic des déchets en amont des travaux permet d'identifier les opportunités de réemploi, de recyclage et de valorisation des bétons ou enrobés, dans une démarche d'économie circulaire.

Plusieurs entreprises spécialisées proposent ce



Opération de désclément d'un enrobé de parking à Aubervilliers (93). ©Wagon Landscaping

type de services bien que certains revêtements ne puissent être recyclés ou réutilisés. Dans ce cas, et pour éviter leur mise en décharge, les revêtements concassés peuvent être conservés sur place pour créer un environnement rocailleux et laisser la nature y reprendre ses droits. Cependant, il convient de différencier le béton, qui est « minéral », des enrobés (bitume, asphalte, etc.) issus de la pétrochimie et qui peuvent présenter des risques de contamination. Il faudra donc s'assurer de l'innocuité des matériaux issus de la désimperméabilisation avant toutes expériences de réemploi.

Quel coût et quels bénéfices associés aux opérations de renaturation ?

Selon France Stratégie (Fosse et al, 2019), le coût moyen de la désimperméabilisation oscille entre 60 et 270 € par m² mais peut s'avérer plus élevé en cas de démantèlement d'ouvrages bâtis par exemple. Si l'investissement initial paraît élevé, il est à mettre

au regard des économies de fonctionnement pouvant être réalisées par le déploiement d'une gestion des eaux pluviales et des bénéfices directs et indirects apportés par un nouvel espace de nature.

Dans la commune de Douai (Nord) où un quart de l'espace public est géré avec des techniques alternatives, il est estimé que des économies d'1 million d'euros par an sont réalisées par rapport à une gestion des eaux pluviales classique (soit 30 à 40 % d'économies) (Herin et Dennin, 2016). Par ailleurs, les Agences de l'Eau proposent des subventions à la désimperméabilisation via des appels à projets pouvant financer jusqu'à 80 % des travaux. Certaines collectivités ont également mis en place des dispositifs de subventions, à l'image du département de Loire-Atlantique qui propose une aide à la désimperméabilisation et la renaturation des milieux urbains, excluant les aménagements hors-sols [55]. Certains établissements publics fonciers, à l'instar de l'EPF Hauts-de-France, prennent en charge 80 % des coûts de déconstruction et dépollution, ainsi que la totalité des coûts engendrés par les travaux de renaturation.

QUALITÉ PHYSIQUE				
Texture du sol : limons, argiles, sables. Granulométrie : éléments grossiers.	Structure : pénétromètre (perméabilité à l'eau), test bêche (état physique du sol), slake test (cohésion des agrégats du sol).	Profil tarière (0-20 cm).	Couleur du sol.	Profil de rétention d'eau, humidité du sol.
QUALITÉ CHIMIQUE				
Carbone organique, Azote (N), Phosphore (P).	Biochimie du sol, pH.	Contaminants : éléments traces métalliques, hydrocarbures, pesticides.		
QUALITÉ BIOLOGIQUE				
Matières organiques du sol.	Indicateurs du couvert végétal.	Indicateurs de la faune du sol.	Indicateurs micro-organismes.	
Mesure de l'activité biologique des sols : méthode du litter bag (sachet de litières) [56]. Contaminants organiques : pesticides, hydrocarbures aromatiques polycycliques.	Description du couvert : pérennes et annuelles vs spontanées et plantées Étude des systèmes racinaires. Espèces bio-indicatrices du milieu et de la contamination.	Mégafaune : traces d'activité (terrier, modification sol et litière, etc.). Macrofaune : abondance et diversité en vers de terre (Observatoire participatif des vers de terre [57], observation des turricules); capture de la faune du sol (pot barber, protocole JardiBiodiv [58]); planche à gastéropodes Mésafaune : Collemboles; Acariens; Enchytrés. Microfaune : Nématodes.	Biomasse microbienne : densité et diversité taxonomique des bactéries et champignons (métagénomique). Activité microbienne : activité enzymatique, minéralisation, respiration du sol.	

TABLEAU 17. Principaux indicateurs permettant d'évaluer la qualité physique, chimique et biologique des sols*
*Source : projet AgrInnov, indicateurs pour évaluer la qualité biologique des sols [59]

REMISE EN ÉTAT DES SOLS

L'évaluation de l'état du sol après désimperméabilisation

Libéré de sa couche imperméable, le sol urbain aura tout de même subi des dommages importants. Afin d'évaluer l'état du sol sur le site, des prélèvements doivent être effectués à l'aide d'une tarière à divers endroits du projet et envoyés en laboratoire spécialisé pour des analyses bio-physico-chimiques. Ce diagnostic préalable est une des étapes clefs avant d'envisager différentes options de renaturation. Le tableau p.86 synthétise les principaux indicateurs utilisés pour évaluer l'état des sols.

Les résultats des analyses physiques, chimiques et biologiques serviront de point de départ à la restauration des sols. L'implication de spécialistes des sols s'avère indispensable afin d'interpréter les différents paramètres et proposer des solutions adaptées à la restauration des fonctions du sol.

Capacité d'infiltration du sol

En fonction de sa capacité d'infiltration, un sol sera plus ou moins favorable à différents types de projet. Un sol imperméable peut devenir un atout dans le cadre de la restauration de la trame bleue, par exemple en vue de la création d'un réseau de mares temporaires. Dans le cas de sols perméables, il peut exister un risque de pollution de la nappe si celle-ci est haute, mais cela offre également la possibilité d'une gestion à la source des eaux pluviales, qui permettrait de limiter l'accumulation de polluants lors du ruissellement. Ce type de test peut être réalisé à l'aide d'un infiltromètre, un appareil qui mesure la conductivité hydraulique d'un sol. Une alternative consiste à effectuer des trous de faible profondeur que l'on remplit d'eau afin d'y mesurer la vitesse à laquelle le terrain absorbe l'eau.

L'ÉTUDE DE LA POLLUTION EN VUE D'UNE PRODUCTION ALIMENTAIRE

Dans le cas où le projet de renaturation comporte une partie du site dédiée à une production alimentaire (jardins partagés, forêts nourricières, etc.), des tests complémentaires doivent être effectués pour s'assurer de l'absence de polluants pouvant constituer un danger pour les consommateurs. Au vu de l'essor des projets comprenant une part d'agriculture urbaine, des chercheurs et chercheuses de l'INRAE et d'AgroParisTech ont mis au point une démarche, appelée REFUGE (Risques En Fermes Urbaines – Gestion et Evaluation) permettant d'accompagner les porteurs de ce type de projets [60]. Celle-ci consiste dans un premier temps à caractériser le danger éventuel, pour ensuite conduire une évaluation des risques si un danger est avéré. La caractérisation passe non seulement par une phase de recherche historique, mais aussi par une phase d'analyse des sols destinés à un usage agronomique (comportant des analyses chimiques, à raison d'un coût de 90 à 150 € par échantillon de sol, complétées d'une analyse agronomique, à raison d'environ 100 € par échantillon de sol). Le détail du protocole est disponible dans le Guide REFUGE Caractérisation de la contamination des sols urbains destinés à la culture maraîchère et évaluation des risques sanitaires (Barbillon *et al.*, 2019).

Même sur des sols pollués, il reste toutefois possible de cultiver certains végétaux compte tenu de leur faible capacité d'accumulation de polluants [63,64]. Certaines collectivités proposent ainsi des listes d'espèces conseillées ou proscrites en

fonction de l'état du sol. En Île-de-France, la ville de Montreuil a réalisé pendant trois ans, avec l'aide de la DRIAAF, des analyses sur les végétaux qui ont mené à la mise en place d'un plan de gestion encourageant la culture de certaines plantes ne concentrant pas les polluants (choux, oignons, les légumes fruits, les arbres à petits fruits et les arbres fruitiers) et d'un arrêté municipal en 2012 qui prescrit la distribution de certaines plantes à risque dans le secteur des Murs à pêches [65].



Protection des Murs à pêches à Montreuil (93). Ce programme encourage l'agriculture et la création de micro-fermes avec l'aide d'initiatives citoyennes et d'associations.
 ©Gwendoline Grandin/ARB IdF

Comment composer avec un sol pollué ?

En ce qui concerne la pollution des sols et au-delà des analyses classiques (métaux lourds, pollutions organiques comme les hydrocarbures), il peut s'avérer utile de connaître l'état historique d'un site au préalable. Un inventaire historique urbain vise à recenser les informations historiques relatives aux activités passées ou encore présentes et donc les surfaces potentiellement polluées, à l'échelle de la parcelle cadastrale [60]. Cela permet d'intégrer la problématique pollution au stade de la programmation des aménagements et de la définition des projets. Par ailleurs, il est possible d'avoir recours à des bio-indicateurs afin de surveiller la toxicité envers les organismes vivants. En effet, les analyses chimiques ne renseignent en rien sur la biodisponibilité des contaminants, leurs transferts potentiels et leurs niveaux de toxicité vis-à-vis des espèces, lorsqu'ils sont seuls ou en « cocktails » (effets de synergie ou d'antagonisme). L'ADEME a produit un guide sur l'utilisation des bio-indicateurs dont l'objectif est de mesurer la biodiversité et les fonctions du sol, d'évaluer la contamination des sols afin de développer des stratégies de renaturation adaptées et de surveiller la qualité des sols [61].

La dépollution

Les techniques de dépollution des terrains contaminés se sont multipliées ces dernières années. Elles dépendent à la fois du type de polluant (métaux lourds, pollutions organiques, etc.), de la nature des sols et des surfaces à traiter. Contrairement aux techniques de génie civil (excavation, remplacement, procédés physico-chimiques, etc.), les techniques de génie écologique visent à limiter les coûts énergétiques dus à l'excavation des sols, leur transport, le remblaiement par des terres importées et privilégient une restauration in situ. Pour ce faire, les propriétés de certains micro-organismes comme les bactéries et les champignons (bioremédiation) ou de certaines espèces végétales (phytoremédiation) peuvent être utilisées pour traiter la pollution des sols.

La phytoremédiation : dépolluer les sols à l'aide des végétaux

La phytoremédiation regroupe l'ensemble des techniques mobilisant les propriétés des plantes et de leur flore microbienne associée pour traiter des milieux contaminés (terrestres, aériens et humides). Ces techniques se basent sur la capacité des végétaux à



Exemple d'un jardin de phytoremédiation : parc départemental du Peuple de l'Herbe à Carrières-sous-Poissy (78) ©Atelier d'Écologie Urbaine

extraire (phytoextraction), transformer (phytodégradation et phytovolatilisation), stabiliser ou encore accumuler (phytoséquestration ou phytostabilisation) des éléments toxiques, souvent d'origine anthropique. La phytoremédiation s'avère particulièrement efficace pour la dépollution de grands espaces dont la contamination demeure faible et dans des projets où l'on dispose de temps.

Entre 2011 et 2015, l'Atelier d'Ecologie Urbaine a conçu et réalisé 3 jardins en phytoremédiation de 400 m² chacun dans le parc départemental du Peuple de l'Herbe à Carrières-sous-Poissy, dans les Yvelines (Agence TER : mandataire ; Conseil départemental des Yvelines : maître d'ouvrage). Deux techniques ont été appliquées : une technique dite *ex situ* avec des casiers végétalisés construits recevant des matériaux relativement pollués (métaux, hydrocarbures aromatiques, composés volatils) et une technique dite *in situ* pour les sols faiblement pollués aux hydrocarbures aliphatiques via une végétalisation adaptée. La typologie de la végétalisation et des strates mises en place va d'une part jouer un rôle sur la production de biomasse et donc sur les capacités d'extraction, et d'autre part faire varier la profondeur de dépollution : 0,30 m pour des brassicacées ; 1 m pour des légumineuses ; 2,50 m pour des saules ; 5 m pour des peupliers). À titre indicatif, voici les végétaux choisis en fonction des actions de dépollution attendues et pour chacun des jardins en phytoremédiation :

- Le jardin agroforestier *in situ* a été élaboré pour fixer les éléments traces métalliques (ETM) et hydrocarbures. La végétalisation comprend un taillis arbustif avec diverses espèces de saules et une strate herbacée à fabacées (les légumineuses sont efficaces pour la dégradation des hydrocarbures).
- La prairie métallicole *ex situ* a été conçue pour extraire les ETM. Ici, ce sont des brassicacées qui ont été utilisées. D'autres expérimentations dans la plaine de Chanteloup, située à proximité du parc départemental du Peuple de l'Herbe, ont montré que les cultures de *Miscanthus* semblent être efficaces pour traiter les métaux lourds.
- Le jardin agroforestier *ex situ* a été planté en milieu acide pour les ETM et les composés organiques halogénés volatils. Il est constitué de saules gérés en rotation courte pour extraire les polluants stockés dans la biomasse et d'une strate herbacée de type lande acide à bruyères et genêts. Les saules offrent des perspectives intéressantes pour le traitement des métaux lourds, pouvant accumuler du cadmium, plomb, nickel, zinc et cuivre dans leurs racines, tiges et feuilles jusqu'à plusieurs centaines de mg/kg selon les espèces.

Les jardins font l'objet d'un suivi régulier depuis 2016, qui concerne la chimie des sols, mais aussi la biochimie des végétaux et l'hydrochimie des lixiviats récupérés dans une structure drainante. À ces relevés chimiques s'ajoutent des suivis de la flore et de la pédologie, permettant de relever les végétaux présents (plantés, comme spontanés) et d'observer l'évolution

des sols restaurés. Des recommandations sont élaborées et portent sur les plantations complémentaires à réaliser, la gestion des végétaux et des sols (paillage, incorporation de matière organique) [66 ; 67].

Une approche efficace mais encore trop peu utilisée

La phytoremédiation est encore peu courante en ville, bien que les craintes s'estompent à mesure que les exemples se multiplient. En effet, au-delà des conditions de faisabilité et des doutes quant à son efficacité, la législation sur les sites et sols pollués et les durées nécessaires au traitement souvent incompatibles avec des projets immobiliers sont autant de raisons qui pouvaient dissuader les porteurs de projets d'y avoir recours. Aux États-Unis, au Canada, en Angleterre et en Europe du Nord, la phytoremédiation apparaît néanmoins comme une technique préférentielle pour traiter des sites contaminés (friches industrielles, zones militaires, etc.). Plusieurs projets ont été lancés en France et la méthode progresse au regard des résultats scientifiques prouvant son efficacité. Bien que cette méthode nécessite suivi et entretien, elle s'avère moins coûteuse que l'excavation, l'exportation et l'enfouissement des terres contaminées. Elle peut être jusqu'à 10 fois moins onéreuse que les méthodes classiques (Chevrier, 2013). La phytoremédiation peut s'avérer un argument financier notamment lorsque la pollution à traiter recouvre une grande superficie.

Plusieurs végétaux s'avèrent efficaces pour traiter la pollution des sols, notamment les saules, dont *Salix viminalis*, arbuste à fort développement racinaire et capable d'emmagasiner une grande quantité de métaux (racines, tiges, feuilles). Du côté des herbacées, le *Lolium arundinaceum* (Fétuque) dispose également d'un système racinaire très développé servant de support à la flore microbienne responsable de la biodégradation. En fonction de la pollution initiale, des mélanges de plantes peuvent être imaginés : les Buxaceae agissent préférentiellement sur le nickel, les tournesols sur le césium, le strontium et l'uranium, les plantes du genre *Arabidopsis* sur le mercure, le tabac et la moutarde sur le zinc, le cadmium et le plomb.

La décompaction

Au-delà de la dépollution, une remise en état peut être nécessaire afin de retrouver un sol écologiquement fonctionnel, même s'il diffère de son état d'origine en termes de structure et de fonctions.

Sous le béton, les sols urbains ont subi de nombreuses altérations, dont le phénomène de tassement qui entraîne la réduction de la porosité nécessaire à la circulation de l'eau, des gaz et des nutriments fondamentaux pour le fonctionnement et la croissance des plantes. Une bonne porosité est nécessaire à la pénétration des racines et joue également sur les capacités de déplacement de l'eau et sur sa rétention. Des travaux de décompaction peuvent être mis en

œuvre, ils dépendent de la surface du site, de l'intensité et de la profondeur du tassement. Il est possible de recourir à une action mécanique (fourche, grelinette, appareils et engins de décompaction) ou biologique. À titre d'exemple, certains organismes comme les vers de terre ou les plantes par leurs racines peuvent améliorer la porosité des sols. Cependant, ces techniques demandent plusieurs années : entre un et deux ans pour recréer de la porosité dans les 20 premiers centimètres du sol, à plus de dix ans pour atteindre les 30 à 50 cm de profondeur. Pour raccourcir les délais, une action mécanique peut s'avérer nécessaire, en utilisant des décompacteurs et outils de pseudo-labour qui permettent de travailler le sol jusqu'à 20 voire 35 cm de profondeur [68]. En Suisse, une étude réalisée sur 3 anciens sites industriels confirme qu'il est techniquement possible de restaurer des sols préalablement minéralisés et retrouver une végétation de qualité, bien que la compaction soit souvent un facteur limitant le succès de la renaturation (Tobias *et al*, 2018).

Les espèces « ingénieuses » du sol

Que ce soit pour améliorer la structure du sol ou relancer son activité biologique, il est possible d'avoir recours à des espèces dites « ingénieuses des écosystèmes » (vers de terre, fourmis, etc.). Ce principe repose sur leurs capacités de bioturbation, c'est-à-dire le phénomène par lequel les organismes vivants parviennent à remanier les sols ou transférer des éléments nutritifs ou chimiques. Les vers de terre, selon l'espèce, pratiquent le fouissage et l'excavation. Ils vont aussi permettre à d'autres espèces vivantes de venir naturellement trouver refuge dans les sols remaniés. L'introduction d'espèces ingénieuses natives dans un objectif de renaturation nécessite de sélectionner avec attention l'espèce ou les communautés d'espèces en question et

de se rapprocher de spécialistes des sols. Cette sélection devra se baser sur l'analyse préalable de l'état des sols afin de s'assurer que l'espèce introduite puisse se maintenir dans l'environnement dégradé.

Les plantes agissent également sur la structure des sols par le biais de leurs racines, mais aussi sur leur fertilité et leur colonisation par d'autres êtres vivants. L'amélioration de la porosité du sol dépend de la morphologie du système racinaire (forme, diamètre, longueur) des végétaux plantés. Les plantes dotées de racines pivot (pissenlits, bardanes, arbres) permettent une action en profondeur, tandis que celles dotées de racines fasciculées (poacées) ont un impact plus en surface où elles forment un réseau dense. Le mélange d'espèces à systèmes racinaires différents contribuera à la structuration du sol en surface et en profondeur. Des mélanges d'espèces variées et locales peuvent être imaginés pour assurer une complémentarité d'action sur la structure du sol. La végétation influence par ailleurs directement la fertilité des sols via les apports de litières aériennes ou par la capacité de certaines espèces à fixer l'azote de l'air dans le sol. C'est le cas des Fabacées ou légumineuses comme les luzernes, les trèfles, vesces et gesses, etc. Enfin, les plantes, et principalement leurs racines, modifient leur environnement abiotique (température, humidité, pH, pression en oxygène) et biotique en libérant dans la rhizosphère¹ des exsudats. Ces composés alimentent un microbiote spécifique. Les plantes contrôlent ainsi l'abondance, la diversité et l'activité des micro-organismes impliqués dans les processus comme la minéralisation de la matière organique ou la nitrification.

1. Partie du sol qui se trouve dans l'entourage immédiat des racines des plantes, cette région du sol est formée et influencée à la fois par les racines et par les micro-organismes qui leur sont associés



On distingue 3 grandes catégories de vers de terre, chacune ayant des caractéristiques écologiques propres. Les épigés, qui sont des vers de surface ; les endogés, agents majeurs de la stabilisation des sols ; et les anéciques, qui jouent un rôle important dans la répartition de la matière organique dans le sol. ©Maxime Zucca/ARB ÎdF

Reconstituer les sols à partir de sous-produits urbains : les technosols

Pour aménager des espaces verts urbains, l'apport de « terre végétale » issue du décapage des terres agricoles est une pratique encore très courante. Ce procédé contribue toutefois à remplacer une artificialisation par une autre, en délocalisant les impacts dans les milieux agricoles tout en engendrant des émissions de CO₂ pour en assurer le transport. En 2008, l'association Plante & Cité a estimé à 3 millions de m³ le volume de terres végétales utilisé en France pour des besoins urbains (Vidal-Beaudet, 2018).

Pour éviter d'importer des terres agricoles lors des projets de restauration de sols artificialisés, des procédés innovants de construction de sols à partir de

sous-produits ou déchets urbains ont vu le jour. En France, le Laboratoire Sols & Environnement (LSE) de l'Université de Lorraine étudie depuis 2008 la construction de « technosols » en utilisant des matériaux considérés comme des déchets (Morel *et al.*, 2008), afin de reconstituer des sols fonctionnels, auparavant dégradés par l'activité sidérurgique.

Dans une logique d'économie circulaire et de réemploi, cette technique s'appuie sur la valorisation de différents matériaux disponibles sur le site, positionnés en couches ou horizons fonctionnels (Fabbri *et al.*, 2021). Elle associe à la fois un substrat minéral (terres excavées non contaminées, béton, ballast de voies ferrées, déchets de démolition de bâtiment) et un substrat organique (déchets verts broyés, boues de stations d'épuration, composts, balayage de rues).

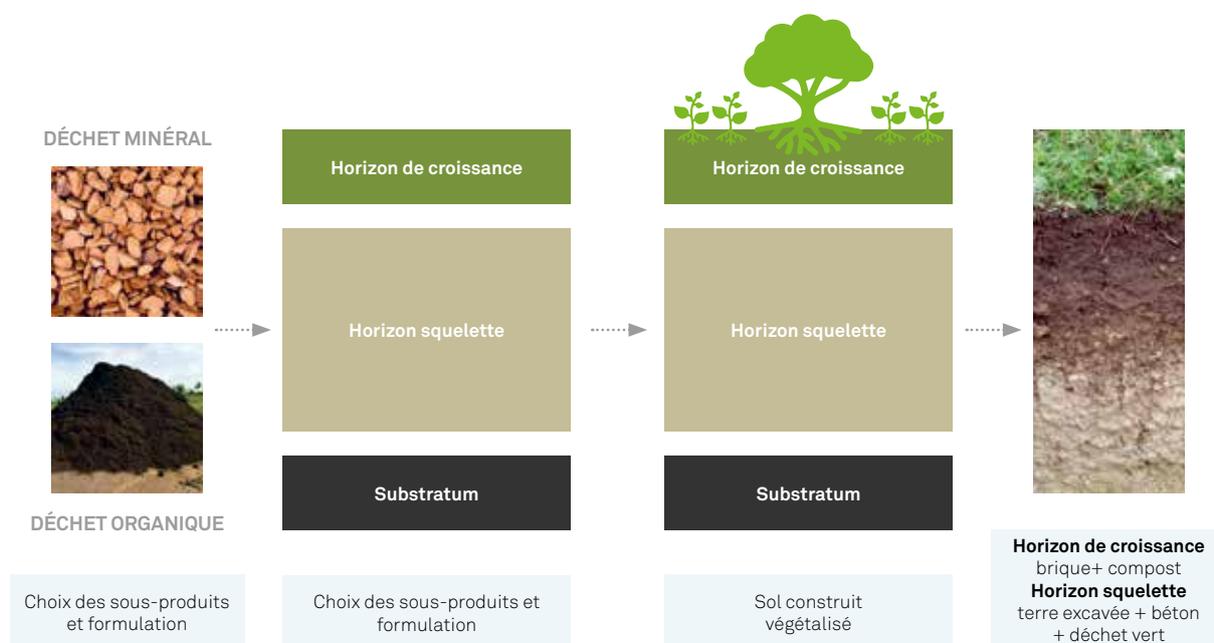


FIGURE 18. Procédé de construction de sol du programme Siterre. Exemple du profil de sol développé pour l'usage « arbre d'alignement ». © Plante & Cité, Institut Agro Rennes-Angers, Université de Lorraine, Ifsttar, BRGM, Rittmo Agroenvironnement, Valterra DR, Luc Durand Travaux Publics, ACTeon

APPORT DE TERRE, PAS TOUJOURS NÉCESSAIRE

Des chercheurs italiens ont émis l'hypothèse que les sols urbains désimperméabilisés verraient leur fertilité augmenter sans application de terre végétale exogène. Entre 2017 et 2019, ils ont donc comparé des parcelles descellées avec et sans apport de terre végétale. Les 2 types de sites ont subi les mêmes aménagements : plantations (2 espèces arbustives) et irrigation. La fertilité des sols a été analysée par des indicateurs chimiques (carbone total et organique) et biologiques (indice de qualité biologique et activité microbienne). Les résultats démontrent que les sols descellés sans apport de terre végétale peuvent améliorer leur fertilité en peu de temps ainsi que leur stabilité fonctionnelle et biologique. (Maienza *et al*, 2021)

LES SOLS PAUVRES DANS LES PROJETS DE RENATURATION

La recherche de l'augmentation de la fertilité des sols ne doit pas constituer un objectif à atteindre à tout prix dans les projets de renaturation. De nombreuses formations herbacées (pelouses, prairies, etc.) ne se développent que sur sols pauvres en nutriments, et sont elles-mêmes le support d'une biodiversité très riche. Ils constituent également des milieux favorables aux espèces thermophiles, comme les reptiles. En contexte urbain, l'étude GROOVES menée par l'ARB îdF sur les toitures végétalisées montre que ces écosystèmes constitués de sols pauvres et de faible épaisseur peuvent accueillir une flore originale, dont la composition spécifique ne ressemble à rien d'autre en ville (assemblage original d'espèces caractéristiques des pelouses sèches ou sableuses) (Barra et Johan, 2021).

Technosols et services écosystémiques

Les recherches ont démontré que ces anthroposols construits² ou « technosols » sont capables d'assurer des services écosystémiques de manière comparable à un sol naturel et que des phénomènes attribuables à la pédogenèse pouvaient être mis en évidence rapidement, comme des processus d'agrégation, de décarbonatation, de colonisation par les racines et d'activité microbienne (Hafeez *et al*, 2012). En ce qui

concerne le stockage de carbone, même si le stock total décroît dans un sol construit, le stock de carbone organique reste quatre fois supérieur dans le technosol que dans les sols naturels étudiés (Séré, 2018). Une étude estime qu'au bout de quatre ans, les technosols sont capables d'avoir un fonctionnement similaire à celui d'une prairie classique (production de biomasse végétale et décomposition de la matière (Cortet *et al*, 2014; Yilmaz *et al*, 2017). Les inventaires montrent que l'on peut également observer les principaux groupes d'organismes du sol dans ces technosols : des micro-organismes aux espèces ingénieuses, en passant par les décomposeurs (Cortet *et al*, 2014).

2. Terme qui regroupe les sols ayant été construits ou profondément modifiés par les activités humaines. AFES, Référentiel pédologique 2008, Éditions Quae, Versailles, 2009

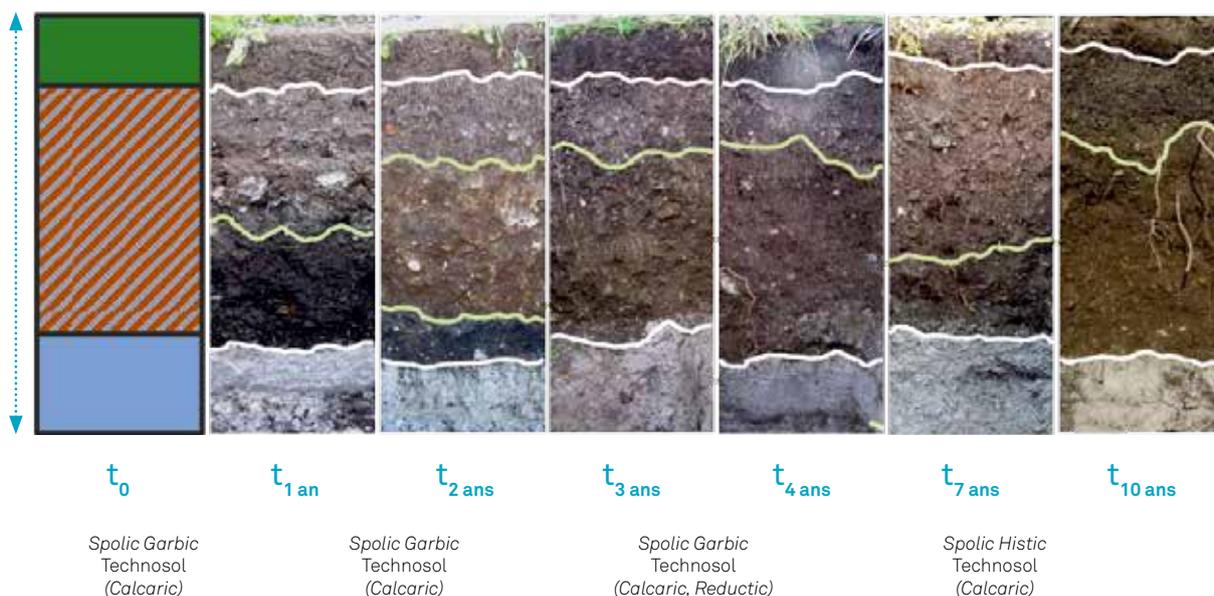


FIGURE 19. Évolution dans le temps des horizons d'un technosol. ©Schwartz, G. Séré, Université de Lorraine

COMPARAISON DES TECHNIQUES DE RÉHABILITATION DE SOLS

Dans le cadre des projets REBU (Réhabilitation Ecologique TalVeg® pour la Biodiversité Urbaine) et Bio-TUBES (Bio-Technosols Urbains en faveur de la Biodiversité Et des Services écosystémiques, [69]), portés par Valorhiz depuis 2016, en collaboration avec le BRGM et Elisol environnement et avec le soutien de l'ADEME, des expérimentations ont été effectuées afin de comparer trois techniques de restauration de sol : le laisser-faire (placette témoin), le décompactage couplé à des opérations de génie écologique

et des technosols combinés à du génie écologique. Au bout de trente mois, les résultats montrent un effet positif des mesures de réhabilitation sur les fonctions de stockage de carbone, de fertilité et de rétention d'eau comparé au témoin. En ce qui concerne la fonction support de biodiversité, tous les sites présentent une dynamique de recolonisation intéressante. Ces premiers résultats viennent également souligner qu'avec un nombre restreint de paramètres physico-chimiques et biologiques, il est possible de caractériser des fonctions écologiques rendues par les sols après la mise en œuvre de solutions techniques distinctes.



Un des sites expérimentaux, cinq mois après avoir mis en place différentes stratégies de réhabilitation de sol © Valorhiz

LE PROJET DESSERT (DESIMPERMÉABILISATION DES SOLS, SERVICES ECOSYSTÉMIQUES ET RÉSILIENCE DES TERRITOIRES)

Pour aller plus loin dans la connaissance des sols urbains, le projet DESSERT a été lancé en 2021 et vise à mieux comprendre le comportement des sols désimpermeabilisés. Ce programme de recherche prévoit de générer de nouvelles connaissances sur la refonctionnalisation des sols à la suite de leur désimpermeabilisation, d'élaborer une typologie des modalités de désimpermeabilisation, d'en mesurer l'efficacité et de mettre en œuvre un suivi pour l'optimisation des procédés de désimpermeabilisation sur des sites expérimentaux. Entre 2021 et 2024, une thèse se penchera sur un inventaire des pratiques, sur des observations du fonctionnement de sols descellés et sur la caractérisation des fonctions et services rendus par ces milieux [70]. Ce projet est financé par l'ADEME dans le cadre de l'appel à projets MODEVALURBA, et coordonné par l'Université de Lorraine/INRAE (LSE Laboratoire Sols et Environnement) avec les partenaires suivants : Institut Agro Rennes-Angers/EPHor-BAGAP, AMU (Institut d'Urbanisme et d'Aménagement Régional) – UMR Telemme, SCE, Wagon Landscaping, D&L Enromat (Goupe Durand), Plante & Cité.



Fosse de sol sous un enrobé à Angers.
©Robin Dagois / Plante & Cité

Un projet de valorisation des déchets issus de la démolition en Île-de-France

En Île-de-France, un partenariat entre l'Observatoire départemental de la biodiversité urbaine de Seine-Saint-Denis, la société ECT et l'université Paris-Est Créteil a permis de tester la valorisation de déchets de démolition et de déchets verts produits localement pour reconstituer des sols fertiles (Pruvost, 2018). Sur un site d'expérimentation de 4 000 m² à Ville-neuve-sous-Dammartin, 26 placettes expérimentales ont été mises en place, correspondant à trois types d'usages : prairies de parcs et jardins, arbres d'alignement et usages agricoles. Des sols composés de terre stérile (remblais, alluvions, limons) ont été préparés avec et sans compost (10 % du volume total) pour les 3 types de végétation. Des mélanges avec ou sans

granulats de béton concassé ont également été testés pour les placettes d'arbres d'alignement. Un suivi de quatre ans a montré que le compost utilisé était responsable de la mort de certains arbres, mais qu'associé au béton, il augmentait fortement leur vitesse de croissance et de colonisation par la macrofaune. En usage prairial, l'ajout de compost a augmenté la production de biomasse et modifié l'assemblage de la communauté végétale, en favorisant les espèces compétitives, mais pas de la macrofaune. Il est donc possible d'améliorer la productivité primaire de nouveaux écosystèmes en manipulant la composition des mélanges de matériaux tout en évitant la dominance de certaines espèces, afin de conserver des communautés diversifiées [71].

RENATURER DES SITES DÉGRADÉS À L'AIDE DES COMMUNAUTÉS VÉGÉTALES

La renaturation d'un milieu anthropisé inclut une restauration des communautés végétales, soit par le biais d'une régénération naturelle, soit par recolonisation assistée. Le « végétal » est ici compris dans son acception scientifique. Il est d'ailleurs davantage question de communautés végétales, et non d'individus, en interaction avec leur environnement et les autres espèces. Cette approche implique de mobiliser des connaissances précises sur les écosystèmes existants, à restaurer ou à créer.

La colonisation par la flore spontanée : laisser la nature reprendre ses droits

De nos jours, la libre expression des processus naturels n'est que très rarement appliquée en milieu urbain, l'interventionnisme étant la règle. Cependant, en laissant

évoluer la nature spontanément dans le temps, des dynamiques naturelles s'installent, se complexifient, se structurent, aboutissant à des écosystèmes fonctionnels et résilients. Ce type de renaturation permet d'observer la dynamique des communautés végétales à travers la succession écologique.

Cette succession se caractérise par la hauteur du couvert végétal qui augmente au cours du temps, la majorité des habitats étant voués à évoluer naturellement vers le boisement sous nos latitudes. Le processus commence par l'installation d'espèces pionnières (algues, mousses, puis plantes herbacées). Ce sont les premières à coloniser des sols pauvres, perturbés ou pollués. Leur action dans le temps modifie physiquement (travail des racines) et chimiquement (accumulation de litière) la structure du sol, favorisant alors leur remplacement par des espèces plus exigeantes préférant s'implanter sur des sols déjà colonisés et plus riches. Puis arrivent les premiers arbustes, et enfin les arbres, plus exigeants.



Friche colonisée par des buddléia, à Strasbourg. ©Gilles Lecuir/ARB îdF

Le rôle des plantes pionnières dans la réhabilitation des sols

Les plantes pionnières sont les plantes qui s'installent en premier sur un site perturbé. Elles sont généralement considérées comme des « mauvaises herbes » alors que leur rôle dans la préparation du sol est essentiel. Elles sont capables de coloniser un milieu instable, très pauvre en matière organique et aux conditions climatiques difficiles (absence d'eau, forte chaleur, etc.) (Sarasin, 2011). En milieu urbain, ce sont généralement des plantes annuelles appartenant aux Amaranthacées, Brassicacées ou Papavéracées (Muratet et al, 2017). Au fur et à mesure que ces plantes

modifient le milieu, elles sont remplacées par des espèces vivaces moins spécialisées ou plus exigeantes. L'utilisation de ces espèces est particulièrement intéressante dans le cadre d'opérations de restauration écologique spontanée mais elles peuvent aussi être utilisées pour restaurer activement des milieux très dégradés.

Le cas des espèces exotiques envahissantes

Lors de la réalisation d'un projet de renaturation, les perturbations engendrées par les travaux sont susceptibles de favoriser le développement de certaines

LES PLANTES FACILITATRICES

La facilitation est un mécanisme par lequel un organisme est capable de modifier les conditions du milieu afin de le rendre plus favorable à un autre organisme, incapable de se développer dans les conditions initiales (Thiffault et al, 2017). Une plante facilitatrice, également appelée nurse, accélère la croissance d'autres espèces en leur conférant un refuge et en améliorant la disponibilité des ressources. Ce refuge peut offrir une protection contre des prédateurs, mais aussi contre un stress environnemental comme l'exposition au soleil, la sécheresse, la chaleur ou au contraire le froid. Les plantes pionnières peuvent faire office de plantes facilitatrices mais d'autres espèces

arrivent à des stades plus tardifs dans le schéma de succession écologique peuvent être utilisées. À titre d'exemple, en zone tropicale, la plantation de fougères arborescentes est facilitatrice des mécanismes de régénération forestière (Rivière et al, 2008). En contexte méditerranéenne, une étude a montré que la plantation d'une espèce de lavande et d'une autre de thym préalablement mycorhizées améliore le développement des plantes forestières et la qualité des sols (Hafidi et al, 2013). La facilitation joue un rôle essentiel notamment dans les environnements qui ont été dégradés, aux conditions difficiles pour les espèces secondaires, et plus largement en matière de colonisation d'habitats neufs et de renaturation.

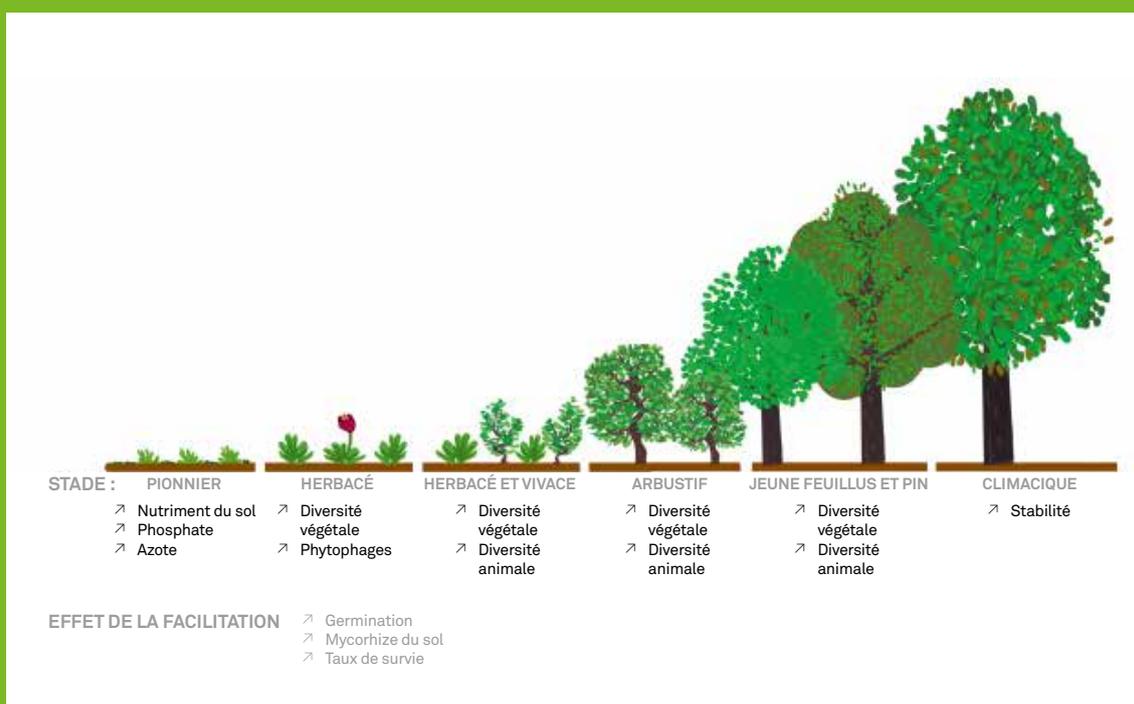


FIGURE 20. Récapitulatif des différents effets de la facilitation sur les stades de succession écologique.
Source : Schéma inspiré de Chapin et al, 1994

espèces exotiques à caractère envahissant. En effet, la présence de ces espèces est fortement corrélée à l'instabilité du milieu et il peut s'avérer nécessaire de les prendre en compte pour éviter une colonisation et une dispersion non désirée. Dans ce cas, une surveillance de l'évolution du site est nécessaire, voire un arrachage sélectif de jeunes pousses pour éviter la colonisation d'une seule espèce (par ex. *Buddleia*) au détriment des autres. Dans le cas d'une renaturation par plantation, certaines techniques de génie végétal permettent aujourd'hui d'intégrer cette variable en respectant, par exemple, des densités de plantations suffisantes pour créer une compétition inhibant le processus de développement d'espèces exotiques envahissantes telles que la Renouée du Japon ou la Berce du Caucase. Certaines surfaces imperméabilisées laissées à l'abandon peuvent d'ores et déjà être colonisées par ces espèces. Dans ce cas, un traitement préalable peut s'avérer nécessaire pour éviter la dissémination des résidus lors des étapes suivantes de renaturation.

La colonisation spontanée dans le cadre de la renaturation

La renaturation passive n'est pas synonyme de « ne rien faire ». Il s'agit dès lors d'observer attentivement

les premières étapes de colonisation spontanée. Ces observations peuvent influencer le choix vers lequel l'écosystème à restaurer doit tendre (Ravot *et al*, 2020). Expérimenter la colonisation spontanée dans les villes peut s'avérer utile aux scientifiques pour mieux comprendre l'intérêt de ce type de dynamiques propres aux écosystèmes urbains. L'observation, et le savoir qui peut en découler, devient donc un des enjeux des projets de renaturation pour alimenter une connaissance scientifique plus holistique.

La recolonisation assistée : un coup de pouce aux écosystèmes

Dans certains cas, le processus d'autoréparation des écosystèmes peut être accéléré en s'appuyant sur le génie végétal, allant du semis d'espèces facilitatrices à des travaux plus lourds de transfert de « plaques de sol » provenant d'écosystèmes proches. S'il existe différentes méthodes mobilisables pour ensemen- cer ou planter un site à renaturer, elles doivent être réfléchies au cas par cas. En amont du projet de renaturation, il convient de considérer : l'objectif de l'intervention (accélérer un processus de recolonisation spontanée, obtenir le cortège le plus complet possible du milieu à réhabiliter, lutter contre l'érosion des sols), la typologie du site récepteur (surface, type

RENATURATION PASSIVE DES BERGES DE LA SELUNE (NORMANDIE)

Dans le cadre du démantèlement des 2 grands barrages de la Sélune, fleuve côtier qui se jette dans la baie du Mont-Saint-Michel, un programme scientifique de suivi de la renaturation du fleuve a été mis en place. Ce projet pilote combine des actions de restauration passive (colonisation végétale spontanée) et active (enlèvement des barrages; vidange progressive; talutage; creusement du lit). Les scientifiques se sont intéressés à la végétation qui colonisait les alluvions de l'ancien réservoir du barrage. En l'espace de deux ans et demi, les résultats montrent qu'une végétation spontanée typique de berges s'est implantée et permet d'assurer leur maintien. Ces résultats confortent la pertinence et l'efficacité des opérations de renaturation passive. Un suivi des communautés végétales est prévu au travers d'un observatoire de la vallée sur le long terme et permettra de guider les choix entre ingénierie civile et restauration passive pour les futurs travaux (Ravot *et al*, 2020).

Renaturation spontanée des berges de la Sélune, deux ans après la vidange progressive d'anciens barrages et du reprofilage des berges. ©Charlotte Ravot



de sol, connexion écologique), le type de technique à privilégier (semis, foin, plantes en motte), les équipements et main-d'œuvre disponibles, ainsi que les aspects économiques et le plan de gestion du site après le semis.

Restaurer avec des semences d'origine locale

Les plantes d'origine locale sont de plus en plus utilisées dans les opérations de renaturation. Elles ont l'avantage d'être mieux adaptées aux conditions écologiques actuelles et hébergent une diversité génétique qui constitue le meilleur garant d'adaptation aux changements climatiques. Le choix d'espèces locales assure par ailleurs l'installation de l'ensemble du cortège d'espèces compagnes (entomofaune, invertébrés du sol, flore bactérienne et fongique symbiotique) indispensable au fonctionnement de leur écosystème. Elles auront de plus grandes chances de s'implanter durablement et de réaliser un cycle de végétation complet, contrairement aux espèces issues de mélanges horticoles traditionnels.

Il est possible de recourir à l'achat de végétaux locaux auprès de certains pépiniéristes ou fournisseurs. La marque Végétal local® [72] a été créée en ce sens. Il s'agit d'une marque collective née de la volonté de maîtres d'ouvrage et de gestionnaires d'espaces d'utiliser des plantes sauvages collectées dans leur région. Elle a été créée en 2015 à l'initiative de la Fédération des Conservatoires botaniques nationaux, de Plante & Cité et de l'Afac-Agroforesteries,

et est aujourd'hui propriété de l'Office français de la biodiversité. Végétal local® permet de garantir la provenance locale d'espèces de fleurs sauvages, d'arbres ou d'arbustes dans une région écologique donnée

(11 biorégions ont ainsi été définies en France métropolitaine), avec une diversité génétique locale et un renouvellement régulier des semences. Dans certains cas, il est également possible de sélectionner ses propres semences en récoltant des graines sauvages ou du foin directement dans leur milieu naturel, à proximité du site à renaturer.



La récolte de plantes et de semences

Le transfert de foin

Une des techniques utilisées en écologie de la restauration pour réhabiliter les communautés végétales est le transfert de foin (Jaunatre *et al*, 2014 ; [73]). Cette technique consiste à faucher une prairie riche en espèces végétales dans une zone à proximité du projet, au moment où le maximum de plantes a fructifié. L'épandage peut s'effectuer directement après la récolte (foin vert) ou après une phase de stockage (foin sec). Le produit de fauche est épandu sur le sol, préalablement ameubli et décompacté, de l'espace que l'on souhaite renaturer. Les herbes, en séchant, libèrent en abondance leurs graines arrivées à ma-

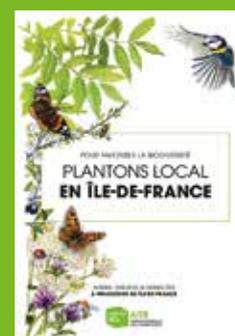
CRÉATION D'UNE FILIÈRE DE SEMENCES LOCALES À BESANÇON (GRAND EST)

La ville de Besançon est engagée depuis plusieurs années dans la sauvegarde de la biodiversité, et tout particulièrement dans la préservation des pollinisateurs en milieu urbain. Pour augmenter la présence d'espèces locales et favoriser l'habitat de ces espèces, la ville a choisi de faire évoluer les compétences de ses agents et les structures de production (serres et orangerie municipales) afin de créer une filière de collecte locale de semences sauvages. Cette opération s'est faite en lien étroit avec le Conservatoire de Botanique et le Conservatoire des Espaces Naturels de Franche-Comté. Les 3 jardiniers-botanistes de la ville se chargent aujourd'hui de récolter les semences et d'effectuer des mélanges adaptés au plan de gestion écologique de la ville. Ces dernières sont utilisées dans les massifs fleuris de la ville et en sur-semis sur les plateformes végétalisées du tramway. En 2017, 20 espèces ont ainsi été récoltées (thym serpolet, œillet, sainfoin...).

LE GUIDE PLANTONS LOCAL

L'ARB ÎdF a élaboré un manuel pour augmenter la proportion de plantes indigènes sur les espaces publics et privés. L'ouvrage propose des listes d'espèces les mieux adaptées aux conditions environnementales de l'Île-de-France pour créer des prairies, haies, bosquets, boisements, etc. Les espèces présentées sont :

- favorables aux interactions avec la faune : plantes hôtes pour les larves/ chenilles, aux fleurs attractives pour les adultes (papillons, syrphes, bourdons, abeilles...), aux fruits attractifs pour les oiseaux et mammifères, etc. ;
- adaptées au climat, aux sols naturels ou remaniés de la région ainsi qu'aux pratiques de gestion ;
- proposées sous la marque Végétal local®.



EXEMPLE D'APPLICATION : LA RESTAURATION DE PRAIRIE

La technique d'épandage de foin a été testée en 2006 dans la plaine de la Crau (Bouches-du-Rhône) pour réintroduire des espèces inféodées aux pelouses sèches et augmenter la richesse spécifique de friches post-agricoles. L'originalité de l'action réside dans le fait qu'en plus du fauchage manuel à 20 cm de hauteur, les produits de fauche ont ensuite été prélevés grâce à un aspirateur à feuilles. Pendant la saison estivale, le foin a été conservé au sec, puis, après

les premières pluies automnales, il a été épandu. Afin de favoriser la germination et de limiter la perte des graines contenues dans le foin, le sol a été préalablement hersé. Les placettes ont été arrosées avant et après l'épandage. Un grillage a été appliqué pour éviter la dispersion par le mistral. Cette technique s'est révélée très efficace. Deux ans après l'épandage, la richesse végétale observée dans les quadrats avait significativement augmenté et l'on notait la réapparition d'espèces caractéristiques de la végétation steppique (thym, avoine, pimprenelle, sauge, etc.).

turité, ensemençant ainsi l'espace ciblé par le projet. L'idéal est de répéter l'opération à plusieurs reprises durant la période de fructification. La phénologie des plantes qui composent une prairie étant hétérogène, il peut être nécessaire de choisir une fenêtre assez large qui permet de récolter une grande diversité de plantes. Le transfert de mulch (broyat et litière) ou de branches de taille issus de la gestion d'un site est également possible (Lemoine, 2016).

La transplantation de mottes

Cette technique consiste à prélever la végétation ainsi qu'une partie du sol par plaques entières ou petites mottes, et à les transférer sur le site à restaurer. La couverture végétale est reconstituée en un temps record. Cette méthode permet de réimplanter, en plus de la flore des micro-écosystèmes riches en semences, plantules, mousses et micro-organismes du sol. Pour la réussite de l'opération, il est recommandé de prélever une vingtaine de centimètres de sol. Cette technique entraînant une dégradation de « l'écosystème donneur » n'est à envisager que dans le cas de figure où l'habitat est menacé de destruction (urbanisation).

La mycorhization

Une mycorhize est le produit d'une coévolution entre un champignon et une racine. Cette association procure de nombreux avantages aux végétaux : amélioration de l'accès aux nutriments et à l'eau, protection contre les organismes pathogènes, meilleure résistance aux stress environnementaux, etc. Il a par exemple été démontré que les champignons mycorhiziens (dans les écosystèmes non perturbés) ont pour effet d'améliorer la croissance des plantes par rapport à celles non mycorhizées (Plenchette *et al*, 1983 ; Karagiannidis et Hadjisavva Zinoviadi, 1998).

La mycorhization contrôlée consiste à reconstituer « artificiellement » la relation symbiotique existant entre champignons et racines. Si elle est particulièrement utilisée pour des besoins agricoles, elle peut s'avérer intéressante pour des projets de restauration en milieu urbain (Henry *et al*, 2021).

Le moment idéal pour mycorhizer est celui de la plantation, en particulier si le sujet est à des racines nues (arbres, arbustes), où l'on peut appliquer le produit contenant le champignon directement sur les racines. Sinon, il est possible de mélanger le produit directement avec le sol. Ce processus est notamment utilisé par plusieurs paysagistes ou fournisseurs de terres pour améliorer la fertilité des sols et accélérer la croissance végétale. Au-delà de cette approche productiviste, il est possible de réfléchir à une mycorhization favorisant les fonctions durables des sols. Plante & Cité a réalisé une étude en 2009 en partenariat avec l'INRAE de Nancy pour évaluer le statut mycorhizien des racines [74].



Mycélium (blanc) de champignon ectomycorhizen associé aux racines ©André-Ph. D. Picard

TRANSFERT DE FOIN : UNE TECHNIQUE PAS UNIQUEMENT RÉSERVÉE AUX MILIEUX NATURELS

Construite en 2014 par les architectes Chartier-Dalix, l'École des Sciences et de la Biodiversité de Boulogne-Billancourt (92) est l'un des exemples les plus aboutis d'architecture intégrant le vivant en Île-de-France. Sa façade unique constituée de micro-anfractuosités et sa toiture végétalisée sont le fruit d'un partenariat entre les architectes et l'écologue Aurélien Huguet. Sur la toiture, la profondeur de substrats varie entre 30 cm et 1 m, permettant de créer une diversité d'habitats allant de la prairie à la « micro-forêt » urbaine.

En 2020, après quelques années d'exploitation, le cabinet d'architectes a décidé de rénover la prairie afin d'accroître son potentiel pour la biodiversité en utilisant des techniques issues du génie écologique. L'objectif principal était d'augmenter la richesse en espèces vivaces, florifères et locales, typiques des prairies anciennes. L'équipe projet a identifié des prairies sèches appartenant au Domaine national de Marly-le-Roi (78). Avec l'accord du Domaine, une parcelle a été identifiée en tant que « donneur idéal », pour son exceptionnelle richesse floristique et la compatibilité avec les conditions rencontrées sur la toiture de Boulogne. Entre juin et juillet, les graines ont été successivement collectées à la main pour les espèces

les plus précoces (Sauge des prés, Brome érigé, Amourette) avant que les prairies ne soient entièrement fauchées à la main. Les graines récoltées ainsi que le foin ont été épandus sur la toiture. Un suivi a été réalisé afin d'évaluer le succès de l'opération et de préciser les éventuels ajustements dans les pratiques. Un an après les travaux, les indices d'évolution de la flore montrent l'apparition de onze espèces provenant de la prairie donneuse, ainsi que l'apparition de plusieurs espèces nouvelles d'insectes.



Fauchage et récolte à la main des prairies du Domaine royal de Marly pour réensemencer la toiture de l'École des Sciences et de la Biodiversité de Boulogne-Billancourt. ©Sophie Deramond (en haut) © Aurélien Huguet (en bas)

CRÉER DES HABITATS FAVORABLES À LA BIODIVERSITÉ

Bien qu'il soit nécessaire de contextualiser les actions de renaturation et de ne pas les généraliser à la restauration d'un seul et même type d'habitat, un certain nombre de principes peuvent être mobilisés de manière plus ou moins systématique lors de la mise en œuvre des opérations. En fonction des projets, il sera recommandé de :

- Diversifier les strates de végétation (muscinale, herbacée, arbustive et arborée), les espèces et les milieux (prairie, bosquet, haie, mare, talus, pierrier, etc.) pour offrir aux espèces différentes conditions d'adaptation. L'hétérogénéité spatiale doit primer sur l'uniformité.
- Créer des micro-habitats supplémentaires pour les espèces, comme les enrochements, le bois mort

déposé au sol ou éventuellement un point d'eau (mare).

- Proscrire le recours aux barrières artificielles (murets et grillages mitoyens) qui sont un vrai fléau pour le déplacement des espèces. Elles participent à la fragmentation des paysages et au mitage de l'espace. Si la protection du site est nécessaire (par exemple pour éviter le piétinement), des ganivelles permettant le déplacement de la petite faune doivent être privilégiées.
- Privilégier la reconstitution d'habitats spécifiques à un cortège d'espèces plutôt que l'installation d'abris ou refuges de substitution (ruches, nichoirs, hôtels à insectes, etc.).
- Limiter l'empreinte écologique due aux matériaux, en privilégiant les matériaux de récupération in situ et en limitant le nombre de composants artificiels (membranes géotextiles, bacs plastiques, etc.).

LA GESTION DES ESPACES RENATURÉS

La multiplicité des usages et l'intérêt des espaces renaturés pour les populations impliquent bien souvent une forme de gestion. Cependant, les espaces de nature urbains sont souvent entretenus de manière trop intensive, occultant le cycle biologique des espèces et l'expression libre du vivant. Concevoir des espaces favorables à la biodiversité implique de recourir à une gestion écologique et différenciée voire, dans certains cas, de privilégier une libre évolution du milieu. La gestion écologique trouve son origine dans le principe de gestion différenciée, qui consiste à faire un compromis entre la gestion relativement stricte et contrainte des espaces communaux et la gestion de conservation des espaces protégés. L'association des deux a pour but de trouver un compromis favorable à la biodiversité tout en répondant aux besoins et aux attentes des usagers. Cette gestion peut être minimaliste, en rendant le site accessible et en prévoyant des espaces de cheminement pour les activités récréatives, ce qui permet de limiter les actions d'entretien

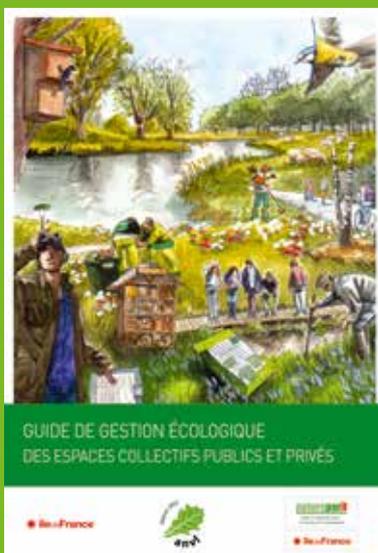
aux abords de chemin et à la taille de sécurité des arbres ou arbustes. Certaines zones peuvent alors être laissées sans gestion. Dans certains cas, la mise en place de platelages permet de circuler sans déranger la faune.

Si l'objectif est le maintien d'une espèce ou d'une communauté cible, des mesures de gestion peuvent être effectuées en rapport avec les traits de vie de l'espèce ou du groupe d'espèces. Elles dépendront alors du cortège de milieux visé (maintien d'une végétation herbacée par la suppression des ligneux, pâturage pour maintenir le milieu ouvert, maintien de zones en terre nue pour les abeilles terricoles ou guêpes fouisseuses, apports de bois mort, etc.). Dans le cas des zones humides, il peut être nécessaire de réaliser des opérations d'entretien de mares ou de roselières afin de maintenir le milieu en état. Quoiqu'il en soit, ces mesures de gestion doivent faire l'objet d'un échange avec des spécialistes afin de limiter l'intervention humaine au strict nécessaire.



Dans le parc de la réserve écologique d'Épinay-sur-Seine, certaines zones sont laissées en libre évolution.
©Marc Barra / ARB ÎdF

AIDES POUR PASSER À LA GESTION ÉCOLOGIQUE



L'ARB îdF et l'ANVL (Association des naturalistes de la vallée du Loing et du massif de Fontainebleau) ont publié un guide pratique de gestion écologique. De nombreux guides ont déjà été publiés sur le sujet mais ils se concentrent généralement sur un thème particulier (pollution de l'eau, désherbage, etc.). Cet ouvrage aborde des sujets plus transversaux tels que la biodiversité au sein d'un territoire, les émissions de gaz à effet de serre ou encore les incidences humaines que peuvent engendrer les différentes pratiques. Ainsi, il ne dispense pas de se référer aux guides plus spécialisés, qui permettront d'appréhender une gamme

plus large et une description plus précise de méthodes touchant à un thème particulier, en rappelant que les techniques évoluent très vite [75]. En complément, le label EcoJardin a été créé en 2012 par Plante & Cité pour répondre à la demande croissante des collectivités publiques et des entreprises d'évoluer vers une gestion écologique de leurs espaces verts [76].



SUIVI ET INDICATEURS

La mise en place d'un suivi est nécessaire pour évaluer le succès de son projet de renaturation ou réorienter les actions de gestion si nécessaire. Au-delà des suivis de la biodiversité, un grand nombre de paramètres peuvent être évalués sur plusieurs années, comme la qualité des sols, les services rendus (rafraîchissement, capacité d'infiltration de l'eau, qualité de l'air), la connectivité écologique, l'acceptation citoyenne. Le suivi est à envisager à la fois comme un moyen de communication autour des projets et un moyen pour convaincre les décideurs de leur pertinence. Il n'existe pas de « suivi type » pouvant être appliqué sur tous les sites restaurés, cela dépendra avant tout du projet (surface, milieux restaurés, objectifs visés, budget, compétences en interne).

En ce qui concerne le suivi naturaliste, il est recommandé de s'appuyer sur des protocoles standardisés³

qui permettront de comparer le site avec d'autres milieux similaires au niveau régional et national [77 ; 78]. Les programmes de sciences participatives proposés par Vigie-Nature sont particulièrement indiqués pour effectuer ce type de suivi dans le temps. Couplées à un accompagnement et une médiation par une association locale, les sciences participatives sont également un bon moyen de valoriser les résultats d'un projet de renaturation auprès de la population. Il conviendra de cibler les groupes taxonomiques qui font sens en fonction du site et de l'écosystème restauré. Il est possible de faire appel aux associations naturalistes ou à des écologues pour mettre en place un plan de suivi et aider à réaliser certains inventaires quand les compétences en interne manquent.

3. Il s'agit d'un protocole défini dans un document de référence et applicable par différents opérateurs sur des territoires variés. La standardisation permet des suivis à long terme et à large échelle en gommant les différences liées à l'observateur, notamment en standardisant l'unité d'espace et de temps (par exemple : un comptage de cinq minutes sur 10 points répartis dans un carré de 2 km de côté).

GRUPE VISÉ	PROTOCOLE	TYPE DE MILIEU	TEMPS CONSACRÉ PÉRIODICITÉ	NIVEAU DE CONNAISSANCE
RHOPALOCÈRES (PAPILLONS DE JOUR) 	STERF, suivi temporel des rhopalocères de France	Milieus ouverts	Minimum 4 h par an et par site	Naturaliste
	Propage, Protocole papillon gestionnaire	Milieus ouverts	Minimum 3 x 10 min par an sur un site (Juin et août)	Gestionnaire d'espaces
	Opération Papillons	Milieus ouverts	1 x par an (Mars à octobre)	Pour tous
OISEAUX 	STOC, suivi temporel des oiseaux communs et / ou EPOC (estimation des populations d'oiseaux communs)	Tout type de milieu	1 x par an (Mars à juin)	Naturaliste
	SHOC, suivi hivernal des oiseaux communs	Tout type de milieu	1 x par an (Décembre à janvier)	Naturaliste
	Oiseaux des jardins	Jardins privés, parcs publics	Toute l'année	Pour tous
LIBELLULES 	STELI, Suivi temporel des libellules	Milieus humides	1 x par an (Mars à octobre)	Naturaliste / Gestionnaire d'espaces
FLORE 	Vigie-Flore, suivi des plantes communes	Tout type de milieu	1 x par an (Avril à août)	Naturaliste
	Sauvage de ma rue	Milieus urbains (rue)	Tout au long de l'année	Pour tous
	Florilège, suivi de la flore urbaine	Milieus ouverts	1 x par an (Juin à juillet)	Gestionnaire d'espaces
	sTREETs, étude de la flore des pieds d'arbres	Milieus urbains (pieds d'arbres)	1 x par an (Avril à juin)	Naturaliste
CHIROPTÈRES 	Vigie-Chiro, suivi des chauves-souris	Tout type de milieu	2 x par an (Juin à septembre)	Naturaliste
INSECTES POLLINISATEURS 	SPIPOLL, suivi photographique des insectes pollinisateurs	Espèces végétales en fleur, tout type de milieu	Tout au long de l'année, temps consacré variable	Pour tous

TABLEAU 18. Les différents protocoles de suivi de la biodiversité proposés par Vigie-Nature*

* Non exhaustifs. Pour plus d'information sur les protocoles présentés, voir la webographie [79 ; 80])

IMPLICATION CITOYENNE

La crise écologique, matérialisée par les changements climatiques et l'érosion de la biodiversité, produit souvent un sentiment individuel d'impuissance. S'inscrire dans une approche participative de désimperméabilisation et de renaturation peut permettre aux citoyens et citoyennes de s'investir concrètement et d'avoir un impact réel sur leur environnement quotidien. C'est aussi une façon de leur proposer de se réapproprier l'espace public et de concevoir différemment la ville en réponse à de nouvelles aspirations. Convaincre, rendre acceptable, multiplier les ambassadeurs : les intentions qui motivent à associer la population aux actions de renaturation sont multiples. Par ailleurs, la renaturation revêt différents niveaux d'engagement. Cela part de l'amélioration de la communication, à l'implication dans la réalisation d'un diagnostic, la recherche d'espaces minéralisés à renaturer, la co-construction du projet, une intégration participative dans les réalisations, jusqu'aux suivis naturalistes.

Quel que soit le projet de renaturation, il est primordial de communiquer et d'informer à toutes les étapes du processus. Souvent oubliée ou négligée, la communication arrive généralement après les premières actions ou réactions. Or, elle doit être faite en amont pour préparer les personnes habitant à proximité, les usagers, les élus, les agents, aux changements à venir

et s'appuyer sur l'ensemble des supports disponibles pour diffuser largement l'information (newsletter, réseaux sociaux, ateliers participatifs). Cela est d'autant plus nécessaire dans le cadre d'un projet de renaturation passive qui implique de la non-gestion. Une communication centrée sur les bénéfices en termes de biodiversité, de santé, d'amélioration du cadre de vie et de gestion des risques permettra aux riverains de s'approprier les lieux renaturés et comprendre leur utilité. Les moyens d'information et de participation pouvant être mobilisés sont nombreux, en voici quelques exemples pour inspirer de futurs projets :

- organisation de débats, d'ateliers, de conférences pour sensibiliser aux enjeux de désimperméabilisation / renaturation et mettre à disposition les savoirs scientifiques ;
- les outils de communication peuvent prendre la forme de réunions publiques, d'articles dans les journaux locaux et les réseaux sociaux, la création d'un site internet dédié ;
- pour la participation, il est possible de réaliser des enquêtes (questionnaires, entretiens individuels) pour recueillir avis et idées, d'organiser des ateliers de co-construction de projet, de prévoir des chantiers participatifs, d'associer les habitants et habitantes au suivi naturaliste à travers des programmes de sciences participatives.



La cour Oasis de l'école maternelle Émeriau à Paris. ©Théo Ménivard, CAUE Paris

Désimperméabilisation des cours d'écoles : le cas des cours OASIS

De plus en plus de collectivités s'engagent aujourd'hui à désimperméabiliser les cours d'écoles et à les végétaliser. Ces espaces, dont la conception se résume souvent à une dalle de béton et à la présence de quelques arbres isolés, recouvrent pourtant de multiples enjeux tant au niveau éducatif qu'environnemental. Les bénéfices de la renaturation de ces espaces sont nombreux : reconnexion avec la nature, éducation à l'environnement, partage plus équitable de l'espace, lutte contre l'effet d'îlot de chaleur urbain, etc. Si dans certains établissements, les actions se limitent à la gestion des eaux pluviales (remplacement du revêtement par une alternative perméable), de plus en plus de collectivités font le choix de transformer

leurs cours en espaces végétalisés. En plus des bénéfices directs sur le bien-être, la santé et l'éveil des enfants, ces lieux deviennent propices à l'éducation à la nature, notamment par le biais des sciences participatives⁴. Le cahier de recommandations produit dans le cadre du programme OASIS de la ville de Paris offre de nombreuses informations sur la façon de mettre en œuvre la désimperméabilisation des cours d'écoles, ainsi que sur la phase de co-conception avec la communauté éducative, essentielle pour le succès d'une telle opération [81].

4. Le programme Vigie-Nature École du Muséum national d'Histoire naturelle propose des protocoles adaptés aux scolaires : <https://www.vigienature-ecole.fr/>



Désimperméabilisation de la cour d'école de l'Ille. ©RM

Sous les pavés : un projet de dépavage participatif au Canada

Ces dernières années, plusieurs initiatives de « dépavage » participatif d'espaces minéralisés ont émergé au Canada et aux États-Unis. Depuis 2005, le collectif DEPAVE à Portland dans l'Oregon entreprend des actions de désimperméabilisation des sols avec le slogan « Sous le bitume, le paradis ». Cette initiative a inspiré une dynamique similaire au Canada intitulée « Sous les pavés ». Elle est portée par le Centre d'écologie urbaine de Montréal (CEUM) au Québec [82]. Ce projet d'urbanisme participatif vise à déminéraliser, à la main et de manière participative, des

espaces publics et à vocation communautaire pour y aménager des espaces végétalisés. Les citoyens sont impliqués tout au long du processus depuis la recherche d'un site, des ateliers de co-construction, la validation du projet final, des journées de dépavage et de plantation, et enfin lors de l'inauguration du site réaménagé. Les espaces sélectionnés sont compris entre 100 et 300 m². Le site est préparé en amont, des entreprises spécialisées viennent prédécouper l'asphalte qu'il ne restera plus qu'à retirer à la main ou à la brouette avant de le déposer dans une benne prévue à cet effet.

Le mouvement DEPAVE s'exporte à Rennes

L'Audiar (Agence d'urbanisme de Rennes) a apporté son appui aux stratégies du territoire avec le projet « Depave, la ville perméable ». S'inspirant de l'initiative DEPAVE outre-Atlantique, un groupe de réflexion avec les services de la métropole ont analysé la mise en œuvre de la désimperméabilisation sur les espaces publics en vue d'améliorer les pratiques et de créer une culture commune. Deux projets sur l'espace public et un groupe scolaire ont été analysés. Des visites et des ateliers ont permis de mettre en commun les pratiques actuelles et les questions soulevées pour une meilleure intégration des enjeux liés à l'eau et à la biodiversité. Ce travail a contribué à nourrir le guide d'aménagement de l'espace public de la métropole, nouveau cadre de référence pour les aménagements à venir. Le projet « Depave, la ville perméable » intègre également un partenariat avec le monde de la recherche (LETG Rennes) visant à identifier par télédétection et suivre les matériaux imperméables dans les tissus urbains (en cours).



Dépavage et plantation participatifs lors d'une opération « Sous les pavés » ©Martin Matteau, autorisation d'utilisation à titre gracieux par le Centre d'écologie urbaine de Montréal. Sous les pavés a publié un guide pour mener à bien des projets de désimperméabilisation participatifs. Pour chaque phase, des outils et des activités sont suggérés.

Strasbourg ça pousse : végétalisation participative invitant les citoyens à jardiner l'espace public

Depuis 2017, la ville de Strasbourg propose aux usagers et citoyens de jardiner l'espace public. Pieds d'arbres, trottoirs, façades sont autant de possibilités offertes pour végétaliser la ville, développer les espaces d'accueil de la biodiversité et améliorer l'infiltration des eaux pluviales, seul, avec ses voisins ou devant les commerçants. Organisée autour d'un portail internet unique du jardinage en ville, la démarche a réuni en 2020 pas moins de 160 projets sur les trottoirs pour 700 m² déminéralisés, 50 pieds d'arbres fleuris et de nombreux pots conventionnés avec les commerçants [83]. Un guide pour accompagner les porteurs de projet dans leurs choix de plantations a vu le jour en 2020. Des pistes d'amélioration sont en cours de réflexion : concertation approfondie et améliorée, don de plantes, plusieurs évolutions sont à l'étude pour rendre la démarche toujours plus accessible et comprise par toutes et tous.



Toute action de plantation sur l'espace public est soumise à l'autorisation des services de la Ville et de l'Eurométropole de Strasbourg. Ces projets doivent par ailleurs respecter la démarche « Zéro-pesticide » et « Plantons local ». ©Alban Hefti/ Strasbourg Eurométropole

PROTECTION DES SITES RENATURÉS

La renaturation n'a de sens que si les milieux restaurés sont pérennisés dans le temps. En effet, dans le cadre du ZAN comme dans celui des mesures compensatoires, le risque est de voir ces sites être à nouveau artificialisés quelques années plus tard par un nouveau projet d'aménagement urbain. En France, la protection des espaces naturels peut s'effectuer par :

- La maîtrise foncière, qui consiste à acquérir des terrains afin d'assurer leur protection. Cette approche est souvent privilégiée dans les zones menacées par l'urbanisation.
- La protection réglementaire, qui encadre ou interdit des activités humaines pouvant nuire à la faune, la flore et aux écosystèmes (exemple : arrêté de protection biotope, réserve biologique, site classé, règlement des PLU).
- La protection contractuelle, qui consiste à déléguer, dans le cadre d'une convention et pour une durée déterminée, la gestion d'un espace naturel (exemple : Natura 2000, bail rural à clauses environnementales, obligation réelle environnementale).

Ces différentes modalités sont complémentaires et peuvent se superposer pour renforcer le niveau de protection. Les collectivités locales disposent à leur niveau de plusieurs outils, facilement mobilisables,

pour protéger des espaces de nature en milieu urbain, souvent qualifiés de « nature ordinaire ».

L'acquisition foncière. Pour faciliter les opérations de renaturation et assurer leur pérennisation, les collectivités ont la possibilité d'acquérir du foncier. L'acquisition peut résulter d'une procédure de gré à gré ou être mise en œuvre via l'exercice de leur droit de préemption urbain (DPU). Le DPU offre la possibilité à une collectivité locale, dans un périmètre prédéfini, de se substituer à l'acquéreur éventuel d'un bien immobilier, lorsque celui-ci est mis en vente par son propriétaire, pour réaliser une opération répondant à l'intérêt général. Les collectivités ont aussi la possibilité de recourir à un certain nombre d'acteurs titulaires d'un droit de préemption, comme les établissements publics fonciers principalement en milieu urbain, les SAFER en milieux agricoles ou encore les départements en milieux naturels. En effet, les départements possèdent un droit de préemption dans le cadre de leur politique de protection des espaces naturels sensibles (ENS), appelé droit de préemption dans les espaces naturels sensibles (DPENS). Il permet d'acquérir plus facilement des terrains à forts enjeux de biodiversité ou environnementaux, comme restaurer des champs d'expansion des crues. Certaines structures peuvent se substituer au département ou se



À Rouen, le parc naturel urbain de Repainville s'étend sur une zone de près de 10 hectares. Historiquement urbanisable, ce site en partie renaturé fait l'objet d'un classement en Zone N au PLU. ©Marc Barra/ARB IdF

voir déléguer ce droit, comme les collectivités territoriales, les parcs naturels régionaux, mais aussi les établissements publics fonciers locaux ou, en Île-de-France, l'Agence des espaces verts (AEV).

Les emplacements réservés (L151-41 3° & R151-43 3° CU). Communes et intercommunalités peuvent instituer par le biais de leurs documents d'urbanisme des emplacements réservés sur des terrains qu'elles envisagent d'acquérir pour protéger ou créer des espaces de nature ou des continuités écologiques. Cet outil permet d'anticiper l'acquisition d'un terrain et d'y interdire toute autre construction ou aménagement qui ne serait pas compatible avec la réalisation à venir du projet pour lequel l'emplacement est réservé. C'est en ce sens un bon outil pour des espaces stratégiques en matière de désimperméabilisation et renaturation.

L'obligation réelle environnementale (ORE) est un outil créé par la loi de 2016 pour la reconquête de la biodiversité (L132-3 CE), permettant aux propriétaires fonciers d'attacher sur leur terrain des obligations de protection de l'environnement pour une durée pouvant aller jusqu'à quatre-vingt-dix-neuf ans. Ce contrat est mis en place entre (i) un propriétaire foncier, qui peut être une personne de droit privé (personne physique ou morale) ou une personne de droit public et (ii) un cocontractant, qui peut être une collectivité publique, un établissement public ou une personne morale de droit privé agissant pour la protection de l'environnement. Attention, les personnes de droit public ne peuvent souscrire une ORE que sur leur domaine privé. Le domaine public, par ses caractéristiques et étant par nature imprescriptible et inaliénable, ne peut pas être couvert par une ORE. Les obligations réciproques que contient le contrat et les modalités de gestion du site sont librement discutées et consenties entre les parties. L'acte est notarié, opposable à tous et transmis automatiquement aux propriétaires successifs. L'ORE peut être contractualisée sur tout type de foncier (jardins, toits, forêts, parcelles agricoles etc.), tout type de milieu (tourbières, prairies, zones humides etc.) et pour tout type de biodiversité (ordinaire, extraordinaire ou menacée). Il en va de même pour les fonctions écologiques : qu'elles soient à restaurer, à gérer ou à maintenir, elles peuvent faire l'objet d'une ORE.

Le classement en zone naturelle et forestière (N) vise à protéger des sites, des milieux naturels, des paysages et leur intérêt, en raison de leur qualité esthétique, historique ou écologique. La création d'une zone (N) intervient dans le cadre du plan local d'urbanisme établi par une commune ou une intercommunalité. L'urbanisation y est interdite ou admise sous forme légère. Le règlement peut encadrer les prescriptions techniques sur les constructions jusqu'à l'interdiction de toute occupation du sol. Le classement en zone N permet de protéger des espaces très variés, comme par exemple des forêts, des parcs ou des zones humides.

Le classement en espace boisé (article articles L.113-1 & R.113-1 CU) vise à protéger ou à créer des boisements notamment en milieu urbain. La définition d'un espace boisé classé intervient elle aussi dans le cadre du plan local d'urbanisme. Le classement empêche le changement d'affectation ou les modes d'occupation des sols. Le défrichement y est par exemple interdit. Cette protection s'applique aux bois, forêts, parcs à protéger ou à créer. Ce classement peut s'appliquer également à des arbres isolés, des haies ou réseaux de haies, des plantations d'alignement.

La protection d'éléments et de sites à enjeux paysagers et écologiques par l'article L.151-23 et R.151-43 4° à 6° du Code de l'urbanisme. Les collectivités peuvent identifier et localiser sur le document graphique de zonage des éléments de paysage, des espaces publics, des sites, etc., à protéger ou restaurer pour des motifs écologiques, notamment pour la préservation, le maintien ou la remise en état des continuités écologiques, et définir, le cas échéant, les prescriptions de nature à assurer leur préservation. De nombreux PLU utilisent ce dispositif pour protéger des linéaires boisés, des arbres remarquables, des mares, des zones humides, des berges, etc. Le même article propose également la protection des terrains cultivés et des espaces non bâtis. Le règlement peut localiser dans les zones urbaines, les terrains cultivés et les espaces non bâtis nécessaires au maintien des continuités écologiques à protéger et à maintenir inconstructibles. Par « terrains cultivés », il est question des jardins familiaux, des jardins potagers particuliers, des terrains maraîchers, vergers ou vignobles.

Les orientations d'aménagement et de programmation (OAP) sont des pièces des documents d'urbanisme qui viennent se superposer au règlement. Elles peuvent définir et localiser des actions de protection, restauration, création de continuités écologiques ou d'espaces de nature. Il faut rappeler que les OAP sont opposables aux tiers dans un rapport de compatibilité. Elles indiquent une direction à suivre plutôt qu'un résultat impératif à atteindre. Un écart mineur par rapport aux dispositions fixées est donc admis, ce qui affaiblit leur rôle dans la protection stricte de secteurs à renaturer [84]. Elles peuvent prendre différentes formes : sectorielle, thématique ou hybride. Les OAP sectorielles sont établies à l'échelle d'un quartier ou secteur de territoire déterminé. Elles permettent de localiser des éléments naturels ou de la TVB à conserver, à restaurer ou à recréer. Elles peuvent prendre la forme de schémas d'aménagement et de documents graphiques (distincts des documents graphiques liés à la partie réglementaire du PLU). Les OAP thématiques ont pour vocation de fixer des orientations sur n'importe quelle thématique du PLU (« TVB », « Paysage et biodiversité », « renaturation ») et concerner une partie ou l'intégralité du territoire. Elles peuvent devenir un vrai mode d'emploi de l'intégration des enjeux de biodiversité ou de renaturation sur un territoire.

CONCLUSION

Les crises du climat et de la biodiversité auxquelles nous devons faire face ne sont pas une fatalité et peuvent être enrayerées. Elles nous invitent, plus que jamais, à repenser collectivement nos modes de vie, ainsi que le fonctionnement et la conception de nos villes. Jusqu'à présent, l'urbanisation a fait la part belle à la minéralité, consommant les sols pour les recouvrir de voiries ou de bâtis. En France, le rythme moyen d'artificialisation s'élève à 27 638 hectares par an sur la période 2009-2019 (Bocquet, 2021). Cette dynamique insoutenable appelle à des réformes structurelles, aussi bien pour ralentir l'étalement urbain que pour réparer les erreurs du passé. Un nouveau pacte entre la nature et la ville semble possible à condition d'imaginer des modes d'aménagement plus frugaux, d'améliorer la protection des écosystèmes et d'accélérer la renaturation des milieux dégradés, artificialisés, voire imperméabilisés.

De nombreuses métropoles sont d'ores et déjà confrontées à la surdensité et à la minéralité. L'imaginaire des métropoles compactes et de la densification est aujourd'hui réinterrogé au profit des petites villes et des villes moyennes (Faburel et al., 2021). Si 75% de la population française vit dans des zones urbaines, une grande majorité plébiscite un retour de la nature en ville, notamment pour améliorer le cadre de vie. Les bénéfices de la nature en ville ne sont plus à démontrer, que ce soit en matière d'adaptation au changement climatique (gestion de l'eau, rafraîchissement), de santé publique (qualité de l'air, offre en espaces récréatifs) ou de support pour de nombreuses espèces dont l'abondance a fortement décliné ces dernières années. Ces différents constats viennent appuyer une nouvelle fois le besoin de renaturer les milieux urbains.

L'ingénierie écologique et les recherches en restauration écologique ont permis d'accumuler une somme conséquente de connaissances et expertises mobilisables afin d'amorcer la désartificialisation des villes. Comme en témoignent de nombreux projets, la renaturation des sols minéralisés a déjà fait ses preuves et nous offre des retours d'expérience dont il est possible de s'inspirer. Cependant, la mise en œuvre de travaux de restauration écologique en milieu urbain reste relativement récente. Ce guide a vocation à diffuser les connaissances en la matière, aider les collectivités à élaborer une stratégie et susciter le partage et l'expérimentation.

La renaturation est aussi une invitation à retisser des liens entre les différents acteurs et usagers de la ville qui demeurent encore trop ténus. Urbanistes, aménageurs, élus, techniciens doivent plus que jamais s'appuyer sur les écologues et naturalistes pour repenser la ville de demain et amorcer une renaturation capable d'apporter des réponses écologiques et climatiques. La conception de la ville doit également s'ouvrir à sa population, qu'il est primordial de replacer au cœur des politiques de la ville. Convaincre, rendre acceptable, se réappropriier le domaine public, multiplier les ambassadeurs, être inventif, sont autant d'intentions qui peuvent venir motiver la participation des citoyens pour renaturer nos villes.

L'ESSENTIEL À RETENIR



1

La renaturation correspond à un **retour à l'état naturel ou semi-naturel** des écosystèmes qui ont été dégradés ou détruits par les activités humaines. Elle peut-être passive (laissez-faire) ou active, par l'ingénierie écologique. Elle concerne tous types de milieux.

2

La renaturation implique un retour à la pleine terre et à des sols vivants.

La désimperméabilisation, qui vise à rendre le sol perméable, est un préalable mais ne suffit pas. Si les bénéfices des aménagements hors-sols (ex. toitures végétalisées) en ville sont réels, ils ne correspondent pas pour autant à de la renaturation.

3

Le verdissement, par opposition à la renaturation, décrit les approches centrées sur le « végétal » et dont l'objectif essentiellement esthétique. À l'inverse, **la renaturation s'appuie sur la connaissance du vivant et prend en compte l'ensemble des niveaux de biodiversité** (génétique, spécifique et écologique).

4

ENVIRON

27 000 HECTARES
D'ESPACES ONT ÉTÉ CONSOMMÉS
ANNUELLEMENT EN FRANCE PAR
L'URBANISATION ENTRE 2009 ET 2019

à un rythme près de 4 fois plus rapide que la croissance démographique. Il est prioritaire d'éviter toute nouvelle artificialisation des sols en composant uniquement avec l'existant, en parallèle d'une protection forte des espaces naturels.

5

La mise en œuvre du ZAN requiert une stratégie complexe qui vise d'une part à **réduire l'étalement urbain** en encourageant le renouvellement et la densification et, d'autre part, à **restituer les surfaces consommées par l'urbanisation** à l'aide de stratégies de renaturation.

6

La densification ne peut se faire au détriment des petits espaces de nature en ville et jardin, ni des friches végétalisées dont l'intérêt pour le vivant est avéré.

7

Si l'Île-de-France n'est responsable « que » de 5% de la consommation d'espace en France, alors qu'elle accueille 20% de la population, c'est aussi **la région la plus urbanisée**. La renaturation doit permettre de revenir sur l'artificialisation passée : l'enjeu est de désartificialiser la ville et d'augmenter l'offre en espaces de nature.

8

La renaturation devrait **concerner en priorité les surfaces imperméabilisées** (parkings ; places publiques ; etc.) pour des gains écologiques plus importants.

9

La notion de « pleine terre » renvoie à plusieurs critères relatifs au sol : le revêtement en surface, la continuité verticale, la continuité horizontale (trame brune), la qualité physico-chimique et biologique et la perméabilité.



10

La méthode **REGREEN** permet de faire ressortir des zones de renaturation prioritaires dans les secteurs urbanisés franciliens, de localiser des sites potentiellement renaturables et d'estimer un potentiel de renaturation chiffré.

11

Sur l'ensemble de l'Île-de-France, la méthode permet d'estimer un total de **30 535,31 hectares de sites minéralisés potentiellement renaturables**, soit

2,54 % DE LA SURFACE DU TERRITOIRE

12

Les sites dont la renaturation apporterait un **bénéfice global sur les 3 enjeux** (biodiversité, changement climatique et santé) représentent **7 016,79 hectares**

13

Un **diagnostic écologique est nécessaire avant tout projet de renaturation**. Il comprend des inventaires de la faune, de la flore et des habitats, des analyses du sol, une étude des continuités écologiques dans le périmètre du projet.



14

La **phytoremédiation** consiste à **dépolluer les sols à l'aide des végétaux**. L'efficacité de ces techniques est aujourd'hui avérée, bien qu'elle prenne un certain temps. Elle est par ailleurs **jusqu'à 10 fois moins onéreuse** que les méthodes de dépollution classique.

15

Les **"technosols"** sont des sols **construits à partir de matériaux considérés comme des déchets urbains** (béton, déchets de démolition, ballast de voies ferrés). Ces sols assurent des services écosystémiques semblables aux sols naturels : stockage de carbone, décomposition de la matière organique, etc. L'utilisation de nouvelles techniques comme les technosols permettrait d'éviter ces importations, qui ne font que délocaliser les impacts de l'artificialisation.

16

La **gestion des sites renaturés est aussi importante que la phase de renaturation elle-même**. Un site renaturé géré de façon intensive ne pourra exprimer pleinement son potentiel, contrairement à un site qui ferait l'objet d'une gestion écologique ou d'une non-gestion.

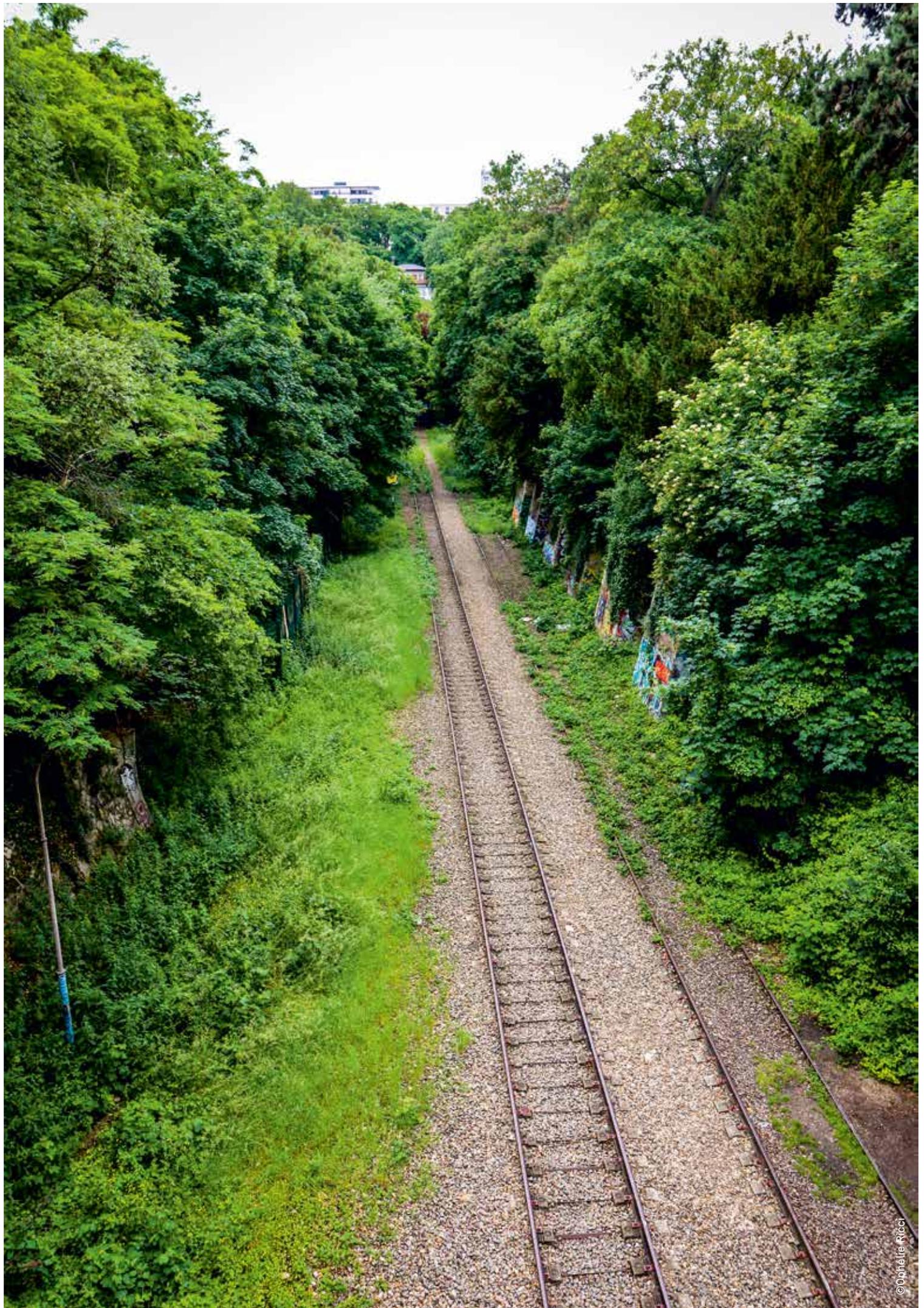
17

Impliquer la population dans la co-construction des projets de renaturation permet de faciliter leur acceptation, leur appropriation et leur durabilité dans le temps. Cette communication et ces échanges sont d'autant plus importants pour les projets qui impliquent une non-gestion, afin de défaire certaines idées reçues.



18

Il existe désormais **de nombreux outils juridiques qui permettent de pérenniser un projet dans le temps** : maîtrise foncière, protection réglementaire ou contractuelle, sont autant de façon de s'assurer que les sites renaturés ne soient à nouveaux artificialisés quelques années plus tard.



CONCEPTS ET DÉFINITIONS COMPLÉMENTAIRES

Le glossaire proposé ci-dessous vise à préciser certains termes en fonction des connaissances disponibles dans la littérature scientifique et apporter des éclairages complémentaires.

ARTIFICIALISATION

L'artificialisation est le résultat du processus d'anthropisation dont le stade ultime est l'imperméabilisation. Donner une définition de l'artificialisation s'avère complexe et nécessite de prendre en compte de nombreuses dimensions dont l'état des sols, la biodiversité, le paysage. La figure 1 (p. 17) propose une classification des espaces en fonction d'un gradient d'artificialisation - naturalité. Les définitions scientifiques sont par ailleurs souvent différentes de celles retenues par la réglementation. En France, avant le vote de la loi Climat et Résilience d'août 2021, l'artificialisation était définie au sens large comme la consommation d'espaces agricoles, forestiers et naturels (dits ENAF). La loi introduit une nouvelle définition qui renvoie à « l'altération durable de tout ou partie des fonctions écologiques d'un sol, en particulier de ses fonctions biologiques, hydriques et climatiques, ainsi que de son potentiel agronomique par son occupation ou son usage ». Elle s'approche davantage des définitions proposées par les paysagistes ou les écologues qui considèrent qu'il existe plusieurs degrés d'artificialisation, le stade ultime étant l'imperméabilisation par le bâti ou le goudronnage. Elle implique cependant d'être capable de mesurer l'état et les fonctions du sol via des outils de connaissance et de suivi spécifiques. En milieu urbain, la grande variabilité des sols et les multiples gradients de qualité écologique des espaces végétalisés rendent la frontière entre espace artificialisé et non artificialisé tout aussi difficile à appréhender. Certaines collectivités mettent au point des méthodes d'évaluation et de classification des espaces ouverts, en fonction de leur intérêt pour la biodiversité. En Île-de-France, l'indice de biodiversité ordinaire (BIOMOS) développé par les services de l'État (DRIEAT, MNHN, Clergeau, Liénart, 2009), permet de distinguer les espaces de nature ordinaire selon leur potentiel d'accueil de la biodiversité. Ces outils peuvent s'avérer nécessaires pour sortir d'une définition binaire de l'artificialisation. Alors qu'un décret sur la nomenclature de l'artificialisation est paru en 2022, il est important de rappeler que tous les espaces de pleine terre, végétalisés ou non, sont précieux en ville

et ne doivent pas être considérés comme artificialisés dans les documents d'urbanisme, au risque d'accroître la pression immobilière sur ces derniers.

BIO-INDICATEURS

Organismes (animal, végétal, bactérien, fongique) ou groupes d'organismes dont la présence ou l'état renseigne sur la qualité de l'environnement. Selon l'objectif poursuivi, on peut distinguer plusieurs types de bio-indicateurs (Argillier *et al.*, 2008) : les bio-indicateurs de diagnostic, qui permettent de mesurer des modifications liées aux activités humaines et de les comparer à des situations de référence en écosystèmes peu perturbés ; les bio-indicateurs d'objectifs, qui permettent de déterminer si les objectifs fixés ont été atteints ; et enfin les bio-indicateurs d'alerte, qui servent à révéler l'existence de processus d'intoxication de l'environnement, avant que des effets plus graves ne se manifestent au sein de l'écosystème. Désartificialisation : processus conduisant à rétablir tout ou partie des fonctionnements d'un milieu ou d'un paysage et à rétablir les fonctions des sols, vers un retour à l'état naturel ou semi-naturel.

DÉSIMPERMÉABILISATION

Action qui consiste à rendre perméable à l'eau, à ne plus imperméabiliser. La désimpermeabilisation renvoie au domaine de la gestion alternative des eaux pluviales et aux techniques visant à favoriser une infiltration ou un stockage des eaux pluviales à la source. La désimpermeabilisation consiste à redonner une perméabilité à la couche superficielle du sol. Elle est un préalable indispensable mais non suffisant à la restauration des fonctions écologiques du sol. Le recours à des revêtements poreux et drainants (pavés non jointés, enrobés perméables), n'équivaut pas à une renaturation.

ÉCOLOGIE DU PAYSAGE

Discipline de l'écologie consistant à étudier les processus écologiques à l'échelle du paysage, en considérant sa composition et sa configuration comme des éléments clés influençant ces processus. Un des concepts clés de cette discipline est celui de connectivité du paysage, qui met en évidence l'importance des réseaux écologiques dans les dynamiques des populations (Bourgeois, 2015). Les principes de

l'écologie du paysage doivent être mobilisés dans le cadre de la renaturation, afin de mettre en cohérence le projet avec les autres échelles spatiales et son environnement local.

ÉCOLOGIE URBAINE

Sous-discipline de l'écologie scientifique qui étudie les écosystèmes urbains et cherche à comprendre la dynamique, l'évolution et les caractéristiques de la biodiversité dans les villes et villages. L'écologie urbaine s'inscrit dans une approche multidisciplinaire pour comprendre les interactions entre humains et non-humains dans les villes. Elle s'appuie à la fois sur les sciences naturelles et sociales, comme la sociologie, la démographie, la géographie, l'économie et l'anthropologie. Les racines de l'écologie urbaine remontent aux années 1950 avec la Berlin School of Urban Ecology (Sukopp) et la Chicago School of Urban Ecology (Park, Burgess, McKenzie). L'écologie urbaine est un domaine en pleine expansion qui rapproche les écologues des acteurs de la ville (urbanistes, paysagistes, architectes) et vise à élaborer des méthodes et des solutions pour concevoir des villes plus favorables au vivant. Écrit par les écologues Audrey Muratet et François Chiron et illustré par le photographe Myr Muratet, le Manuel d'Écologie Urbaine (2019) propose un état des connaissances actuelles sur le fonctionnement de la nature en milieu urbain.

ESPACES VERTS

La notion d'espaces verts appartient au vocabulaire de la planification urbaine et paysagère. Dans les agglomérations urbaines, les espaces verts désignent des terrains non encore bâtis, végétalisés ou arborés, boisés ou agricoles. La circulaire du 22 février 1973 définit les espaces verts de manière très large : parcs, jardins, squares, plantations d'alignement et arbres d'ornement intramuros, de même que les bois, les forêts, espaces naturels et ruraux périurbains [85]. En écologie, le terme d'espaces verts est considéré comme réducteur car il ne reflète pas la diversité des espaces non bâtis ni leur intérêt pour le vivant. Il renvoie à l'imaginaire du gazon, de l'ornement et des jardins horticoles conçus pour leurs aspects esthétiques et dont les modes de conception et de gestion peuvent nuire à la biodiversité. Certains auteurs lui préférèrent le terme d'espaces végétalisés, qui englobe les mêmes types d'espaces (terrains non encore bâtis, végétalisés ou arborés, boisés ou agricoles) mais insiste davantage sur leurs composantes végétales (là où les espaces verts sont considérés comme faisant office d'aménagement pour la population). D'autres auteurs utilisent enfin le terme d'espaces de nature en ville, qui ne se limite pas au végétal et reflète une diversité dans la composition de ces espaces et leurs qualités variables pour la biodiversité. Aucune de ces définitions n'est parfaite et il semble nécessaire d'in-

sister sur la composition de ces espaces en termes de faune, de flore, de fonge et d'habitats, voire d'utiliser un vocabulaire spécialisé pour les décrire (prairie urbaine, boisement, espace cultivé, jardin en gestion extensive, etc.). Plusieurs collectivités s'attachent aujourd'hui à évaluer la qualité écologique de leurs « espaces verts » à travers plusieurs critères afin de sortir de ces définitions trop génériques.

ESPÈCE FACILITATRICE

Espèce dont la présence permet ou améliore le développement d'autres espèces. Dans le cas des plantes, une plante dite facilitatrice (ou nurse) facilitera l'implantation et la croissance d'autres espèces. Les effets bénéfiques des espèces facilitatrices sont de plusieurs natures : protection contre les UV solaires, contre la prédation et la concurrence, échange de ressources, parfois une facilitation du transport des gènes, propagules ou individus, effets atténuateurs face à divers stress environnementaux [86].

ESPÈCE INDIGÈNE / LOCALE / SAUVAGE

Espèce dont la présence dans un écosystème ou dans une région donnée est le résultat de processus naturel, sans intervention humaine. L'utilisation de végétaux sauvages issus de collecte en milieu naturel est adaptée à des opérations ayant un objectif de restauration de la fonctionnalité écologique des milieux. En effet, les végétaux sauvages et locaux (prélevés durablement dans la région biogéographique) ont bénéficié d'une longue coévolution avec la faune et la flore locales : ils contribuent ainsi au bon fonctionnement des écosystèmes auxquels ils sont inféodés. En France, la marque Végétal local® est un outil de traçabilité des végétaux sauvages et locaux. Onze grandes régions écologiques ont été définies dans le cadre de la marque (indépendantes des régions administratives) et permettent de justifier l'emploi de « local ». L'objectif est de garantir la traçabilité de ces végétaux et la conservation de leur diversité génétique afin d'avoir sur le marché des gammes adaptées pour la restauration des écosystèmes et des fonctionnalités écologiques [87]. A l'inverse, les plantes horticoles sont des espèces qui ont fait l'objet de sélections dans le but de créer des variétés ornementales. Elles ont été sélectionnées pour leur aspect esthétique et ont généralement une diversité génétique faible, les rendant plus vulnérables aux facteurs extérieurs (conditions météorologiques, pathogène, etc.) que les espèces locales.

ESPÈCE INGÉNIEURE

Espèce dont la seule présence et activité aura pour effet de modifier significativement leur environnement (ex : castor, vers de terre, etc.). Le concept d'« ingé-

nieurs de l'écosystème» a été proposé en 1994 par Clive Jones. Il désigne un organisme qui modifie de façon importante son environnement au point d'avoir un impact significatif sur d'autres espèces qui lui sont proches. On distingue deux types d'ingénieurs de l'écosystème. Les ingénieurs autogéniques qui sont des organismes qui modifient l'environnement par leur simple présence (par exemple l'arbre qui intercepte des ressources lumineuses et va donc créer des conditions particulières pour la photosynthèse d'un certain nombre d'autres plantes) et des organismes allogéniques qui modifient leur environnement par leur activité. Là encore, le castor est l'exemple le plus simple, mais les pics qui créent des cavités dans les arbres, vont aussi permettre à des champignons ou à d'autres oiseaux de s'installer. En ingénierie écologique, les organismes ingénieurs sont des outils extrêmement précieux pour renaturer les milieux [88].

ESPÈCE PIONNIÈRE

Désigne les premières espèces qui coloniseront ou recoloniseront un milieu donné. Il peut s'agir d'un milieu nouveau (mur, friche, sol désimperméabilisé, etc.) ou récemment perturbé (remblaiement, chantiers urbains, coupe forestière, glissement de terrain, décapage, etc.). Les espèces pionnières sont les premières à apparaître en début de succession écologique.

ESPÈCE URBANOPHILE

Espèce fortement dépendante des humains pour leur nourriture et abris, ou ayant trouvé des conditions écologiques en ville proches de leur environnement d'origine (ex. La Cymbalaire des murs, la Fouine, le Pigeon biset, le Moineau domestique) (Muratet *et al.*, 2019).

ESPÈCE URBANOPHOB

Espèce qui a tendance à fuir le milieu urbain ou qui va disparaître après un processus d'urbanisation, du fait de la perte de son habitat, des ressources nécessaires à sa survie, ou du fait des nuisances occasionnées par les zones urbaines. Les espèces ayant besoin d'une aire de répartition importante sont souvent affectées par l'urbanisation, comme certains rapaces ou mammifères (ex. renards). Certaines espèces parviennent également à s'acclimater au milieu urbain et s'y maintiennent tant bien que mal, sans pour autant en tirer profit. On parle alors d'espèces tolérantes.

FÉRALITÉ

Désigne l'état de ce qui retourne à l'état sauvage après avoir été domestiqué. Il peut s'agir de l'état d'une espèce animale ou végétale, ou d'un écosystème tout entier comme le propose Génot et Schnitzler (2012).

Ce concept se rapproche de l'ensauvagement ou de retour à la friche d'un milieu exploité par l'être humain. Le Pigeon biset (*Columba livia*) est une espèce férale en France métropolitaine hors Corse.

FRICHE

Il n'existe pas de définition unanimement partagée concernant les friches. Cette difficulté à les définir repose sur plusieurs raisons qui leur sont propres. Tout d'abord, ce sont des espaces extrêmement hétérogènes du fait de leur passé, de leur nature ou du fait des milieux qu'ils abritent. Il peut s'agir aussi bien d'anciennes zones industrielles que de jardins ou parcelles agricoles à l'abandon. Par ailleurs, les friches inspirent des sentiments divers et contradictoires. Un riverain, un usager, un habitant, un urbaniste, un élu, un écologue, un anthropologue, un photographe, etc. n'auront pas la même vision de cet espace. Enfin, les friches se métamorphosent constamment, ce ne sont pas des espaces figés, ce qui les rend encore plus difficiles à saisir. S'il y a bien un point commun entre toutes les friches, c'est cette idée « d'abandon », d'un endroit où l'être humain a arrêté son activité et où la nature reprend ses droits petit à petit. Bien qu'abandonnés, ces espaces ne sont pas pour autant inhabités. Flore et faune sauvages réinvestissent ces lieux librement. Les friches ont la particularité d'abriter un ensemble d'habitats naturels, chacun correspondant à une étape de la succession écologique commençant par les sols nus et se terminant par le boisement. Cette hétérogénéité de milieux et l'absence de gestion humaine en font des noyaux de biodiversité. À l'inverse des espaces verts en ville, les friches accueillent des espèces dites « urbanophobes ». Elles sont à la fois un refuge pour la biodiversité mais aussi une escale dans les déplacements des espèces au sein de la matrice minérale (les fameuses trames vertes et bleues). Récemment, la loi Climat et Résilience (n°2021-1104 du 22 août 2021) a créé un article dans le Code de l'urbanisme (L.111-26) pour donner une définition juridique de la notion de friche. Cette dernière s'entend comme « tout bien ou droit immobilier, bâti ou non bâti, inutilisé et dont l'état, la configuration ou l'occupation totale ou partielle ne permet pas un réemploi sans un aménagement ou des travaux préalables ». Cette définition a été pensée uniquement sous l'angle de l'objectif « zéro artificialisation nette » où il est question de refaire la ville sur elle-même. Les friches sont alors uniquement considérées comme des réserves foncières alors qu'elles sont aussi des espaces à protéger pour la biodiversité.

GÉNIE VÉGÉTAL

Mise en œuvre de techniques utilisant les végétaux et leurs propriétés mécaniques et/ou biologiques pour : le contrôle, la stabilisation et la gestion des sols érodés ; la restauration, la réhabilitation ou la renaturation de mi-

lieux dégradés, incluant une intégration paysagère des aménagements; la phytoréhabilitation ou phytoremédiation, correspondant à l'épuration ou la dépollution des sols et des eaux (Rey *et al.*, 2015).

INGÉNIERIE ÉCOLOGIQUE

Se définit comme « la gestion de milieux et la conception d'aménagements durables, adaptatifs, multifonctionnels, inspirés de, ou basés sur, les mécanismes qui gouvernent les systèmes écologiques (auto-organisation, diversité, structures hétérogènes, résilience)» (Abbadie *et al.*, 2015). Ce mouvement s'inscrit dans la réhabilitation d'écosystèmes dégradés, la restauration de communautés fonctionnelles, la réintroduction d'espèces, la création de nouveaux écosystèmes durables ayant une valeur pour l'être humain et pour la biosphère. Le génie écologique est une « conduite de projets qui, dans sa mise en œuvre et son suivi, applique les principes de l'ingénierie écologique et favorise la résilience des écosystèmes (JORF du 18/08/2015 [89]). La renaturation, quand elle ne se fait pas de manière spontanée, fait appel aux connaissances et aux techniques de l'ingénierie et du génie écologique.

IMPERMÉABILISATION

Désigne le recouvrement permanent d'un terrain et de son sol par un matériau artificiel imperméable (asphalte ou béton, par exemple), notamment lors de la construction de bâtiments et de routes.

NATURALITÉ

Le concept de naturalité, adaptation francophone de wilderness, est de plus en plus communément utilisé dans la littérature pour désigner un espace à fort caractère naturel n'ayant subi que peu ou pas de perturbation ou de dégradation par l'être humain : son état est vierge ou presque vierge. Il renvoie à l'intégrité biophysique, la spontanéité et les continuités spatio-temporelles au sein d'un espace naturel (Guetté *et al.*, 2018). Ce concept peut être utilisé pour définir différentes qualités, parfois antagonistes, d'un espace, en parlant de faible ou de forte naturalité. En milieu urbain, il peut s'avérer intéressant de distinguer les espaces végétalisés à faible naturalité (gazons, jardins horticoles) dont la qualité écologique est faible des espaces végétalisés à forte naturalité (friches, milieux non gérés ou abandonnés) qui présentent davantage de similarités avec les espaces naturels.

RÉENSAUVAGEMENT

Peut désigner d'une part, la réintroduction d'espèces disparues depuis plusieurs siècles ou millénaires ou,

d'autre part, l'absence d'intervention humaine sur un territoire donné (on parle alors de régénération naturelle). Dans le cas où l'absence d'intervention humaine est recherchée, toutes les activités perturbatrices pour la nature sont interdites et il n'y a pas d'intervention de gestion sur le site. Cependant, la présence humaine n'est pas totalement exclue, les promenades sur les sentiers définis et l'observation sont autorisées. Le réensauvagement est synonyme de « libre évolution » de la nature. Un espace en libre évolution est une zone gouvernée par des processus naturels. Il est composé d'espèces et d'habitats suffisamment grands pour le fonctionnement écologique effectif des processus naturels. Il est non ou peu modifié et sans activité humaine intrusive ou extractive, habitat permanent, infrastructure ou perturbation visuelle (Wild Europe, 2012).

RÉSILIENCE/RÉGÉNÉRATION NATURELLE

Le mot résilience trouve son origine dans le mot latin *resiliare* qui signifie « revenir en arrière ». La notion de résilience date des travaux de Holling (1973) qui cherchait à différencier un système écologique qui se maintient dans des conditions de stabilité et une réponse de systèmes dynamiques qui sont soumis à un stress et changent de positionnement par rapport à leur stabilité. En écologie, le terme est employé pour évoquer un organisme, une espèce (taxon) ou un écosystème capable de retrouver un fonctionnement normal après des perturbations majeures ou mineures (catastrophe naturelle, industrielle, etc.). La résilience est en général fonction de la diversité et de la complexité des écosystèmes et du patrimoine génétique des individus. Elle se fonde sur la stabilité des écosystèmes et sur la vitesse à laquelle ces écosystèmes retournent à un état stable après une perturbation (Triplet, 2021). La régénération naturelle désigne la capacité d'un écosystème à se reconstituer spontanément à la suite d'une perturbation qui aurait entraîné sa destruction partielle, on peut également parler de résilience. C'est cette capacité qui est mise à profit dans les processus de renaturation visant dans ce cas à une recolonisation spontanée.

RÉHABILITATION OU REFUNCTIONNALISATION

Action permettant la création d'un écosystème identique en termes de structure et de fonctions à celui qui était présent avant la perturbation (Séré, 2007). Cependant, il diffère en composition (richesse spécifique et abondance) de l'écosystème initial.

RENATURATION

Au sens large, la renaturation renvoie au retour à l'état naturel ou semi-naturel des écosystèmes qui ont été dégradés, endommagés ou détruits par les acti-

vités humaines. Elle est synonyme de restauration écologique. Elle est dite active lorsque des actions intentionnelles sont mises en place pour initier ou accélérer l'autoréparation de l'écosystème en question. La renaturation peut aussi être passive, lorsque les forces de dégradation sont réduites, permettant aux processus naturels de restaurer l'écosystème initial. On parle de renaturation aussi bien pour des écosystèmes naturels que semi-naturels. Dans le cadre de l'objectif zéro artificialisation nette, le législateur a défini la renaturation dans la loi Climat et résilience du 22 août 2022 comme les « actions ou des opérations de restauration ou d'amélioration de la fonctionnalité d'un sol, ayant pour effet de transformer un sol artificialisé en un sol non artificialisé ».

SERVICES ÉCOSYSTÉMIQUES

La notion de services écosystémiques est apparue dans les années 1980 sous l'impulsion de naturalistes engagés dans la conservation de la nature. Elle s'est considérablement développée à la fin des années 1990 à la suite de travaux économiques (Costanza *et al.*, 1997 ; Daly, 1997) mais a véritablement pris de l'ampleur après la publication du rapport sur l'Évaluation des écosystèmes pour le millénaire, en 2005. Elle renvoie aux bénéfices que les sociétés humaines retirent du fonctionnement des écosystèmes. On classe généralement ces services en quatre grandes catégories :

Les services d'approvisionnement/production

Produits issus des écosystèmes (bois, cultures, prélèvements, pollinisation, accès à l'eau etc.).

Les services de régulation

Avantage assuré par le bon fonctionnement des écosystèmes permet leur résilience et leur résistance face aux perturbations (protection ou atténuation face aux inondations, pollinisation, stockage du CO₂ et limitation du réchauffement climatique, épuration de l'eau etc.).

Les services culturels

Apports non matériels de la nature perçus au travers de la relation qui est entretenue avec elle (aspects récréatif et spirituel, éducation, ressourcement, activités de pleine nature, etc.).

Les services de support

Nécessaires à la production de tous les autres services, ils assurent le bon fonctionnement des écosystèmes (formation des sols, cycles biogéochimiques, production primaire, etc.).

Ce concept doit être mobilisé avec précaution et peut susciter des critiques en contribuant à instaurer une logique utilitariste (voire monétariste), occultant des divergences de visions et de valeurs accordées à la nature. En effet, il faut distinguer logique de protection de la biodiversité et logique de gestion des services écosystémiques, qui ne se superposent

pas nécessairement. Certes, la biodiversité peut offrir de multiples services écosystémiques (stockage du carbone, qualité paysagère, rétention des eaux etc.) mais elle ne saurait être réduite à des catégories de services. Une telle approche pourrait conduire à des dérives pour maximiser un ou plusieurs services en faisant fi de l'intégrité des écosystèmes (ex. monocultures pour la séquestration de carbone, surdéveloppement des ruches au détriment des pollinisateurs sauvages, etc.). Il est important de rappeler que la protection de la biodiversité renvoie avant tout à des considérations éthiques dépourvues de tout utilitarisme. Plutôt que de se demander pourquoi protéger la biodiversité, le champ de l'éthique se demande « à quoi bon la détruire? » (Sarrazin et Lecomte, 2016).

TRAMES ÉCOLOGIQUES

En 2007, le Grenelle de l'environnement a reconnu le phénomène de fragmentation des habitats comme l'une des causes de déclin de la biodiversité. Cette prise de conscience a débouché sur le lancement d'une nouvelle politique portée par le ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie (MEDDE) : la trame verte et bleue (SPN, 2014). Le concept de trames renvoie à l'objectif de maintenir ou reconstituer un réseau permettant aux espèces animales et végétales de se déplacer et d'accomplir les étapes nécessaires à leur cycle de vie. La TVB reprend ainsi des concepts issus de l'écologie des paysages (Keitt *et al.*, 1997 ; Henein et Merriam, 1990 ; Pulliam, 1988 ; Forman et Baudry, 1984). Les réservoirs de biodiversité servent de lieux de vie et de reproduction, tandis que les corridors sont dédiés aux déplacements des espèces entre ces sites. La politique TVB est déclinée à l'échelle régionale dans les schémas régionaux de cohérence écologique (SRCE), puis aux échelles infrarégionales dans les documents d'urbanisme, chartes de parcs naturels régionaux, etc. Aujourd'hui, de nouvelles trames sont conceptualisées par les scientifiques et concernent l'ensemble des compartiments de l'espace – air, surface, sol – habités par la biodiversité, avec par exemple la trame noire (empruntée par les espèces nocturnes), brune (empruntée par les espèces du sol), aérienne (empruntée par les espèces volantes) (Sordello, 2021), ou encore l'absence de bruits anthropiques excessifs (trame blanche).

URBANISATION

Concentration croissante de la population dans les agglomérations urbaines. La métropolisation désigne le même processus que l'urbanisation mais prend davantage en compte ses dimensions économiques, politiques et symboliques, en désignant les niveaux supérieurs d'organisation des systèmes urbains en fonction du niveau d'échelle étudié.



ANNEXES

ANNEXE 1

POTENTIEL DE RENATURATION DANS LES DIFFÉRENTS ÉTABLISSEMENTS PUBLICS TERRITORIAUX D'ÎLE-DE-FRANCE (HORS PARIS)

La méthodologie présentée dans ce guide permet d'estimer le nombre d'hectares potentiellement désimperméabilisables et renaturables. Ce potentiel constitue une base qui pourra être affinée avec des vérifications et inventaires de terrain et arbitrée en fonction des faisabilités techniques. Pour les collectivités, ces données peuvent néanmoins constituer un objectif de renaturation à atteindre pour relever un seul, deux ou trois des enjeux proposés. La première partie des tableaux présente la surface renaturable par type d'enjeu. La seconde partie, la surface renaturable en fonction du nombre d'enjeux.

Surface renaturable en fonction du nombre d'enjeux

A titre d'exemple, pour le T2 Vallée Sud Grand Paris, la méthode permet d'estimer un total de 813,27 hectares de sites minéralisés potentiellement renaturables, dont :

- 280,26 ha associés à aucun enjeu majeur de renaturation. Il s'agit de sites minéralisés identifiés grâce au MOS (p.29) mais qui ne sont pas localisés dans des zones de renaturation prioritaires (autrement dit sur des mailles à faible score).
- 173,94 ha concernés par un seul enjeu de renatura-

tion, c'est à dire localisés dans une zone prioritaire pour un seul des enjeux étudiés (qu'il s'agisse de la biodiversité, du changement climatique ou du cadre de vie).

- 170,29 ha localisés dans des zones considérées comme prioritaires pour deux des enjeux étudiés (par exemple, biodiversité et changement climatique, ou changement climatique et cadre de vie).
- 188,78 ha localisés dans des zones qui sont prioritaires pour les 3 enjeux étudiés. Les sites concernés par ce cas de figure représentent 3.99 % du territoire.

Surface renaturable par enjeu

Il est également possible d'étudier les surfaces renaturables selon le type (et non le nombre) d'enjeu. Les surfaces obtenues seront alors plus élevées que pour l'étude du nombre d'enjeux. A titre d'exemple, les 457.89 hectares potentiellement renaturables en faveur de la biodiversité regroupent les sites présentant uniquement un seul enjeu biodiversité, mais aussi les sites avec un enjeu biodiversité associé à un autre enjeu (biodiversité et changement climatique, ou biodiversité et cadre de vie), et enfin les sites qui cumulent les 3 enjeux. Ceci permet d'évaluer la surface des sites renaturables en faveur de la biodiversité.

ENJEUX	SURFACE POTENTIELLE (HA)	% PAR RAPPORT À LA SURFACE DU TERRITOIRE
SURFACE RENATURABLE PAR ENJEU		
Biodiversité	457,89	9,67
Changement climatique	326,22	6,89
Santé et cadre de vie	296,74	6,27
SURFACE RENATURABLE EN FONCTION DU NOMBRE D'ENJEUX		
Sans enjeu majeur	280,26	5,92
1 enjeu identifié	173,94	3,67
2 enjeux identifiés	170,29	3,60
3 enjeux identifiés	188,78	3,99
Surface totale	813,27 ha	17,18 %

T2 : Vallée Sud Grand Paris

ENJEUX	SURFACE POTENTIELLE (HA)	% PAR RAPPORT À LA SURFACE DU TERRITOIRE
SURFACE RENATURABLE PAR ENJEU		
Biodiversité	208,05	5,69
Changement climatique	223,49	6,11
Santé et cadre de vie	172,67	4,72
SURFACE RENATURABLE EN FONCTION DU NOMBRE D'ENJEUX		
Sans enjeu majeur	153,71	4,20
1 enjeu identifié	74,65	2,04
2 enjeux identifiés	69,14	1,89
3 enjeux identifiés	130,42	3,56
Surface totale	427,93 ha	11,70%

T3 : Grand Paris Seine Ouest

ENJEUX	SURFACE POTENTIELLE (HA)	% PAR RAPPORT À LA SURFACE DU TERRITOIRE
SURFACE RENATURABLE PAR ENJEU		
Biodiversité	547,77	9,26
Changement climatique	466,53	7,88
Santé et cadre de vie	422,91	7,15
SURFACE RENATURABLE EN FONCTION DU NOMBRE D'ENJEUX		
Sans enjeu majeur	232,64	3,93
1 enjeu identifié	191,39	3,23
2 enjeux identifiés	215,77	3,65
3 enjeux identifiés	271,43	4,59
Surface totale	911,23 ha	15,40 %

T4 : Paris Ouest La Défense

ENJEUX	SURFACE POTENTIELLE (HA)	% PAR RAPPORT À LA SURFACE DU TERRITOIRE
SURFACE RENATURABLE PAR ENJEU		
Biodiversité	635,39	12,74
Changement climatique	631,88	12,67
Santé et cadre de vie	507,45	10,18
SURFACE RENATURABLE EN FONCTION DU NOMBRE D'ENJEUX		
Sans enjeu majeur	96,83	1,94
1 enjeu identifié	97,33	1,95
2 enjeux identifiés	261,56	5,25
3 enjeux identifiés	384,75	7,72
Surface totale	840,47 ha	16,86 %

T5 : Boucle Nord de Seine

ENJEUX	SURFACE POTENTIELLE (HA)	% PAR RAPPORT À LA SURFACE DU TERRITOIRE
SURFACE RENATURABLE PAR ENJEU		
Biodiversité	868,16	18,30
Changement climatique	700,71	14,77
Santé et cadre de vie	824,58	17,39
SURFACE RENATURABLE EN FONCTION DU NOMBRE D'ENJEUX		
Sans enjeu majeur	134,11	2,83
1 enjeu identifié	145,57	3,07
2 enjeux identifiés	307,38	6,48
3 enjeux identifiés	544,37	11,48
Surface totale	1 131,43 ha	23,85 %

T6 : Plaine Commune

ENJEUX	SURFACE POTENTIELLE (HA)	% PAR RAPPORT À LA SURFACE DU TERRITOIRE
SURFACE RENATURABLE PAR ENJEU		
Biodiversité	775,09	9,90
Changement climatique	635,52	8,12
Santé et cadre de vie	575,50	7,35
SURFACE RENATURABLE EN FONCTION DU NOMBRE D'ENJEUX		
Sans enjeu majeur	241,08	3,08
1 enjeu identifié	234,08	2,99
2 enjeux identifiés	273,40	3,49
3 enjeux identifiés	401,74	5,13
Surface totale	1 150,30 ha	14,69 %

T7 : Paris Terre d'Envol

ENJEUX	SURFACE POTENTIELLE (HA)	% PAR RAPPORT À LA SURFACE DU TERRITOIRE
SURFACE RENATURABLE PAR ENJEU		
Biodiversité	618,82	15,79
Changement climatique	493,33	12,59
Santé et cadre de vie	684,31	17,46
SURFACE RENATURABLE EN FONCTION DU NOMBRE D'ENJEUX		
Sans enjeu majeur	78,78	2,01
1 enjeu identifié	143,24	3,66
2 enjeux identifiés	218,93	5,59
3 enjeux identifiés	405,12	10,34
Surface totale	846,08 ha	21,59 %

T8 : Est Ensemble

ENJEUX	SURFACE POTENTIELLE (HA)	% PAR RAPPORT À LA SURFACE DU TERRITOIRE
SURFACE RENATURABLE PAR ENJEU		
Biodiversité	389,18	5,41
Changement climatique	275,55	3,83
Santé et cadre de vie	225,05	3,13
SURFACE RENATURABLE EN FONCTION DU NOMBRE D'ENJEUX		
Sans enjeu majeur	301,48	4,19
1 enjeu identifié	191,53	2,66
2 enjeux identifiés	189	2,63
3 enjeux identifiés	106,74	1,48
Surface totale	788,77 ha	10,96 %

T9 : Grand Paris-Grand Est

ENJEUX	SURFACE POTENTIELLE (HA)	% PAR RAPPORT À LA SURFACE DU TERRITOIRE
SURFACE RENATURABLE PAR ENJEU		
Biodiversité	376,56	6,69
Changement climatique	383,41	6,81
Santé et cadre de vie	287,92	5,11
SURFACE RENATURABLE EN FONCTION DU NOMBRE D'ENJEUX		
Sans enjeu majeur	213,97	3,80
1 enjeu identifié	209,65	3,72
2 enjeux identifiés	169,88	3,02
3 enjeux identifiés	166,16	2,95
Surface totale	759,66 ha	13,49 %

T10 : ParisEstMarne et Bois

ENJEUX	SURFACE POTENTIELLE (HA)	% PAR RAPPORT À LA SURFACE DU TERRITOIRE
SURFACE RENATURABLE PAR ENJEU		
Biodiversité	550,43	5,49
Changement climatique	488,08	4,87
Santé et cadre de vie	356,79	3,56
SURFACE RENATURABLE EN FONCTION DU NOMBRE D'ENJEUX		
Sans enjeu majeur	242,22	2,42
1 enjeu identifié	181,57	1,81
2 enjeux identifiés	206,03	2,06
3 enjeux identifiés	267,22	2,67
Surface totale	897,05 ha	8,95 %

T11 : Grand Paris Sud Est Avenir

ENJEUX	SURFACE POTENTIELLE (HA)	% PAR RAPPORT À LA SURFACE DU TERRITOIRE
SURFACE RENATURABLE PAR ENJEU		
Biodiversité	1 220,30	9,91
Changement climatique	1 143,88	9,29
Santé et cadre de vie	1 104,24	8,97
SURFACE RENATURABLE EN FONCTION DU NOMBRE D'ENJEUX		
Sans enjeu majeur	375,88	3,05
1 enjeu identifié	380,49	3,09
2 enjeux identifiés	398,70	3,24
3 enjeux identifiés	763,51	6,20
Surface totale	1 918,58 ha	15,58 %

T12 : Grand-Orly Seine Bièvre

ANNEXE 2

EXEMPLES DE SURFACES MINIMALES NÉCESSAIRES AU MAINTIEN DE CERTAINS GROUPES TAXONOMIQUES

ESPÈCES	SURFACE CONTINUE NÉCESSAIRE POUR DES ESPÈCES URBANOPHILES	SOURCES
Oiseaux	5 ha	<i>Beninde et al, 2015</i>
Anoures (grenouilles et crapauds)	3 ha	<i>Drinnan, 2005</i>
Flore et fonge (champignons)	2 ha	<i>Drinnan, 2005</i>
Pollinisateurs	8 ha	<i>Hinners et al, 2012</i>
Carabes	8 ha	<i>Salder et al, 2006</i>

ESPÈCES	SURFACE CONTINUE NÉCESSAIRE POUR DES ESPÈCES URBANOPHOBES	SOURCES
Oiseaux	46 ha	<i>Beninde et al, 2015</i>
Anoures (grenouilles et crapauds)	50 ha à 72,5 ha	<i>Drinnan, 2005</i>
Pollinisateurs	20 ha	<i>Hinners et al, 2012</i>
Reptiles	50 ha	<i>Vignoli et al, 2009</i>

ANNEXE 3

DÉTAILS DE L'ÉTUDE DE L'EXPOSITION AU RISQUE DE RUISSELLEMENT

L'imperméabilisation est déduite depuis la couche du MOS à 47 postes de L'Institut Paris Région, et regroupé en 3 catégories : fortement imperméabilisé; moyennement imperméabilisé; faiblement imperméabilisé. Les pentes sont étudiées depuis les données de L'Institut Paris Région et sont également regroupées en 3 classes : pentes fortes (supérieure à 7%); pentes moyennes (entre 3% et 7%); pentes faibles (inférieure à 3%). Des valeurs sont ensuite attribuées à chacune de ces catégories de façon à pouvoir croiser les informations. Les espaces fortement imperméabilisés prennent une valeur de 0, ceux moyennement imperméabilisés une valeur de 1 et ceux faiblement imperméabilisés une valeur de 2. En ce qui concerne les classes de pente, les zones en pente forte prennent une valeur de 0, celles en pente

moyenne une valeur de 1 et celles en pente faible une valeur de 2.

Ces valeurs sont ensuite croisées et résumées dans le tableau ci-dessous. Les valeurs cumulées sont reclassées pour être comprises entre 0 et 2 (valeur à droite dans le tableau croisé), et permettent ainsi d'obtenir une information reflétant l'exposition au risque de ruissellement en fonction de la pente et de l'imperméabilisation des sols au sol.

Les mailles prennent ensuite le score associé au type de risque majoritaire les occupant. Une exposition forte au ruissellement attribue un score de 0, une exposition moyenne un score de 1 et une exposition faible un score de 2.

IMPERMÉABILISATION	VALEUR ASSOCIÉE
Forte	0
Moyenne	1
Faible	2

PENTE	VALEUR ASSOCIÉE
Forte	0
Moyenne	1
Faible	2

IMPER- MÉABILISATION \ PENTE	PENTE		
	FORTE (= 0)	MOYENNE(= 1)	FAIBLE(= 2)
Forte(= 0)	0 → 0	1 → 0	2 → 1
Moyenne(= 1)	1 → 0	2 → 1	3 → 2
Faible(= 2)	2 → 1	3 → 2	4 → 2

Tableau croisé permettant d'étudier l'exposition au risque de ruissellement en fonction de la pente et du degré d'imperméabilisation des sols.

ANNEXE 4

DÉTAILS DE L'ÉTUDE DE L'EXPOSITION AU RISQUE D'INONDATION

remièrement, le MOS à 11 postes a été regroupé en 3 catégories : espaces non bâtis ; espaces bâtis ouverts (ex : parcs, cimetières) ; espaces bâtis denses (ex : habitations, zones d'activités). Le risque d'inondation est quant à lui étudié en distinguant 3 catégories d'aléa : aléa faible (zone inondée avec moins de 1 m d'eau ou avec un courant faible) ; aléa fort (zone inondée entre 1 et 2 m d'eau) ; aléa très fort (zone inondée avec plus de 2 m d'eau, ou entre 1 et 2 m avec un courant fort). Puis, de la même façon que pour le reste de la méthodologie, des valeurs sont attribuées aux différents types d'espace (MOS) ainsi qu'aux différents types d'aléa, de façon à pouvoir étudier leurs impacts cumulés. Pour le MOS, les espaces non bâtis se voient attribuer une valeur de 3, les espaces bâtis ouverts une valeur de 1 et les espaces correspondant à du bâti dense une valeur de 0. En ce qui concerne les aléas, les aléas faibles à moyen se voient attribuer une valeur de 2, les aléas forts une valeur de 1 et les

aléas très forts une valeur de 0.

Ces valeurs sont ensuite croisées et résumées dans le tableau ci-dessous. Ces valeurs cumulées sont reclassées pour être comprises entre 0 et 2 (valeur à droite dans le tableau croisé). Ceci permet d'obtenir une information reflétant l'exposition au risque d'inondation en fonction de l'occupation au sol et de l'intensité potentielle des inondations. Un score est ensuite attribué aux mailles de 125 m en fonction du risque majoritaire dans la maille.

Les mailles prennent ensuite le score associé au type de risque majoritaire les occupant. Une exposition forte aux inondations attribue un score de 0, une exposition moyenne un score de 1 et une exposition faible un score de 2.

MOS À 11 POSTES	
Type d'espace	Valeur attribuée
Non bâti	3
Bâti ouvert	1
Bâti dense	0

ZONES INONDABLES	
Type d'aléa	Valeur attribuée
Faible à moyen	2
Fort	1
Très fort	0

TYPE D'ESPACE \ ALÉA	ALÉA		
	FAIBLE/MOYEN (=2)	FORT(= 1)	TRÈS FORT (= 0)
Non bâti (=3)	5 → 2	4 → 2	3 → 2
Bâti ouvert (=1)	3 → 2	2 → 1	1 → 0
Bâti dense (=0)	2 → 1	1 → 0	0 → 0

Tableau croisé, permettant d'étudier l'exposition au risque d'inondation en fonction de l'occupation au sol et de l'intensité potentielle des inondations.

ANNEXE 5

LA CARENCE EN ESPACES VERTS ET DE NATURE OUVERTS AU PUBLIC

La carence en espaces verts et de nature ouverts au public en termes de ratio, indicateur utilisé dans le cadre de l'élaboration du Plan vert régional de 2017, est égal à 1 si le ratio glissant d'offre en espaces verts ou de nature ouverts au public est inférieur à 10 m²/habitant et égal à 0 dans tous les autres cas. Le ratio glissant d'offre en espaces verts ou de nature ouverts au public est égal au rapport entre la superficie totale des espaces verts et de nature 2019 et la population totale 2016 dans un disque de 9 km² centré sur la maille 500 (il est égal à 0 si la population totale est nulle).

La carence en espaces verts et de nature ouverts au public en termes d'accessibilité, indicateur également utilisé dans le cadre de l'élaboration du Plan vert régional de 2017 est égal à 1, si les micro-maillles du réseau viaire de la maille sont situées en moyenne :

- à plus de 150 m d'un espace vert ou de nature ouvert au public de moins d'un hectare ;
- à plus de 300 m d'un espace de 1 à 10 ha (ou d'un espace linéaire de 300 m à 1 km) ;
- à plus de 600 m d'un espace de 10 à 30 ha (ou d'un espace linéaire de 1 à 5 km) ;
- à plus de 1 200 m d'un espace de plus de 30 ha (ou d'un espace linéaire de plus de 5 km).

Et est égal à 0 dans tous les autres cas. On peut noter que ces distances ont été calculées non pas « à vol d'oiseau », mais en considérant le parcours réel à pied sur le terrain et en prenant donc en compte les détours imposés par les coupures urbaines ou la localisation effective des entrées de grands espaces verts et de nature.

ANNEXE 6

DÉTAILS DE L'ÉTUDE DE LA CARENCE EN ESPACES DE NATURE

L'étude de la carence en espaces verts publics a été conduite par L'Institut Paris Région dans le cadre du Plan vert de 2017. Elle distingue les zones carencées en espaces verts, les zones carencées en accessibilité, les zones carencées dans les deux cas et les zones non carencées. Un score de 0 a été attribué aux mailles ne présentant aucune carence ; un score de 1 pour les

zones présentant un seul type de carence ; et un score de 2 aux mailles combinant les deux carences.

Pour qualifier l'indice de végétation, les mailles avec un couvert végétal < 30 % prennent une valeur de 0 ; celles avec un couvert végétal \geq 30 % et < 45 % une valeur de 1 ; les mailles avec un couvert végétal \geq à 45 % une valeur de 2.

ESPACES VERTS PUBLICS	
Type de carence	Valeur
Les deux	0
Carence en espaces verts	1
Carence en accessibilité	1
Aucune	2

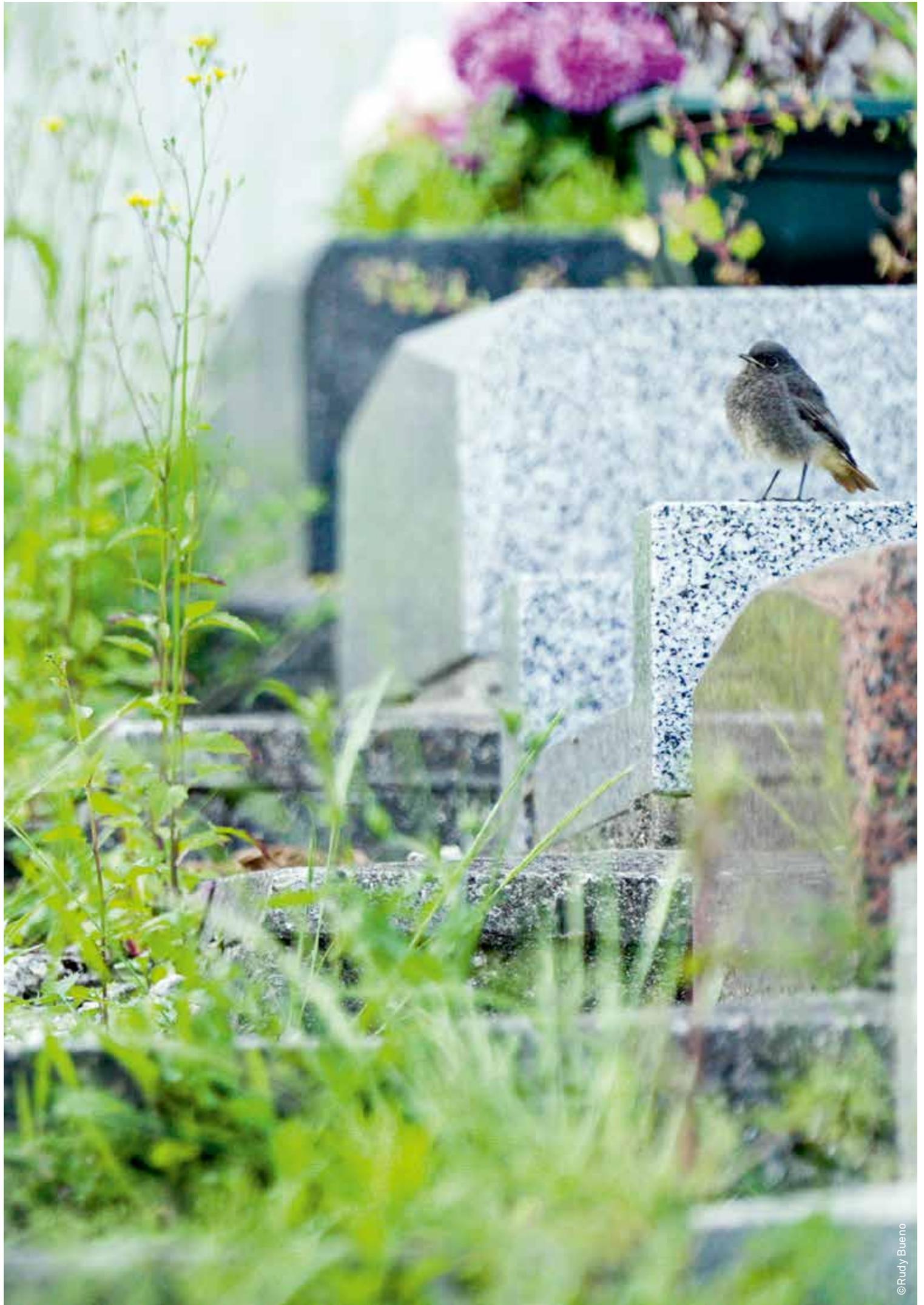
INDICE DE VÉGÉTATION	
Couvert végétal	Valeur
Couvert < 30 %	0
30% \leq couvert < 45 %	1
Couvert \geq 45 %	2

CARENCE EN ESPACES VERTS PUBLICS \ INDICE DE VÉGÉTATION	CARENCE EN ESPACES VERTS PUBLICS			
	LES DEUX (=0)	CARENCE EN AMÉNAGEMENT (=1)	CARENCE EN ACCESSIBILITÉ (=1)	AUCUNE (=2)
Faible (=0)	0 → 0	1 → 0	1 → 0	2 → 1
Moyen (=1)	1 → 0	2 → 1	2 → 1	3 → 2
Fort (=2)	2 → 1	3 → 2	3 → 2	4 → 2

Tableau croisé, permettant de cumuler (i) carence en espaces verts publics et (ii) l'indice de végétation

Le cumul des 2 composantes (carence en espaces verts publics et indice de végétation) permet de différencier les zones peu carencées des zones fortement carencées. Le score final obtenu par cumulation est reclassé pour être compris entre 0 et 2 (valeur valeur

à droite dans le tableau croisé). Un score est ensuite attribué aux mailles en fonction de la carence en espaces de nature : une carence forte attribue un score de 0, une carence moyenne un score de 1 et une carence faible un score de 2.



BIBLIOGRAPHIE

Abbadie, L., Bastien-Ventura, C. & Frascaria-Lacoste, N. (2015). Bilan et enjeux du programme interdisciplinaire Ingeco du CNRS (2007-2011) : un tournant pour l'ingénierie écologique en France ?. *Natures Sciences Sociétés*, 23, 389-396.

Adobati, F., & Garda, E. (2020). Soil releasing as key to rethink water spaces in urban planning. *City, Territory and Architecture*, 7(1), 1-16.

Ahn, C., & Schmidt, S.A. (2019). Designing Wetlands as an Essential Infrastructural Element for Urban Development in the era of Climate Change. *Sustainability*.

Alikhani, S., Nummi, P., & Ojala, A. (2021). Urban Wetlands: A Review on Ecological and Cultural Values. *Water*.

ARB îdF – Gestion des eaux pluviales et biodiversité : revue bibliographique et préconisations, 2020

Argillier, C., Levêque, C., & Oberdorff, T. (2008). Qu'entend-on par bio-indicateurs de la qualité des eaux continentales?.

Aronson, J., France, Winterhalder, K., Hobbs, R.J., Murdoch, W., Australia, J., Harris, C., Murcia, Cali, C., Rieger, J.P., & Diego, S. (2004). *The SER International Primer on Ecological Restoration*.

Aronson, M.F.J., La Sorte, F.A., Nilon, C.H., Katti, M., Goddard, M.A., Lepczyk, C.A. et al (2014). A global analysis of the impacts of urbanization on bird and plant diversity reveals key anthropogenic drivers. *Proc. Biol. Sci.*, 281, 20133330.

Atger, C., & Edelin, C. (1994). Premières données sur l'architecture comparée des systèmes racinaires et caulinaires. *Botany*.

Atkinson, G.E., Doick, K.J., & Burningham, K. (2014). 'Brownfield regeneration to greenspace: Delivery of project objectives for social and environmental gain'. *Urban Forestry & Urban Greening*, 13, 586-594

Assessment, M. E. (2005). *Ecosystems and human well-being: wetlands and water*. World Resources Institute.

Baldauf, R.W., Thoma, E., Khlystov, A.Y., Isakov, V., Bowker, G.C., Long, T.C., & Snow, R. (2008). Impacts of noise barriers on near-road air quality. *Atmospheric Environment*, 42, 7502-7507.

Barra, M., Clergeau, P., « Zéro Artificialisation Nette » : des questions écologiques se posent. *Revue Diagonale*, 2020

Barra, M., Johan, H., (coord)., *Écologie des toitures végétalisées. Synthèse de l'étude GROOVES (Green roofs verified ecosystem services)*. 2021, 92p

Barbillon, A., Aubry, C., & Manouchehri, N. (2019). Guide REFUGE Caractérisation de la contamination des sols urbains destinés à la culture maraîchère et évaluation des risques sanitaires. Cas de la région Île-de-France (Doctoral dissertation, INRAE; AgroParisTech).

Basagaña, X., Sartini, C., Barrera-Gómez, J., Dadvand, P., Cunillera, J., Ostro, B., ... & Medina-Ramón, M. (2011). Heat waves and cause-specific mortality at all ages. *Epidemiology*, 765-772.

Baude, M., Muratet, A., Fontaine, C., & Pellaton, M. (2011). Plantes et pollinisateurs observés dans les terrains vagues de Seine-Saint-Denis. Livret publié par l'Observatoire départemental de la Biodiversité Urbaine, 64 pages

Beaudet, L. V., & Rossignol, J. P. (2018). Les sols urbains: artificialisation et gestion

Beninde, J., Veith, M., & Hochkirch, A. (2015). Biodiversity in cities needs space: a meta-analysis of factors determining intra-urban biodiversity variation. *Ecology letters*, 18(6), 581-592.

Beute, F., Andreucci, M. B., Lammel, A., Davies, Z. G., Glanville, J., Keune, H., ... & de Vries, S. (2020). Types and characteristics of urban and peri-urban green spaces having an impact on human mental health and wellbeing: a systematic review.

Bismuth V, Merceron E. 2008. L'observatoire des papillons des jardins. Muséum national d'Histoire naturelle. Paris. France

Bocquet, M., (2021). Les déterminants de la consommation d'espaces. Période 2009-2019 – Chiffres au 1er janvier 2019. Cerema, Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement. 69 pages.

Bonthoux, S., Brun, M., Pietro, F.D., Greulich, S., & Bouché-Pillon, S. (2014). How can wastelands promote biodiversity in cities? A review. *Landscape and Urban Planning*, 132, 79-88.

Bourgeois, M. (2015). Impacts écologiques des formes d'urbanisation : modélisations urbaines et paysagères (Doctoral dissertation, Besançon).

Bowler, D. E., Buyung-Ali, L., Knight, T. M., & Pullin, A. S. (2010). Urban greening to cool towns and cities: A systematic review of the empirical evidence. *Landscape and urban planning*, 97(3), 147-155.

Brunbjerg, A. K., Hale, J. D., Bates, A. J., Fowler, R. E., Rosenfeld, E. J., & Sadler, J. P. (2018). Can patterns of urban biodiversity be predicted using simple measures of green infrastructure?. *Urban Forestry & Urban Greening*, 32, 143-153.

Burel, F., & Baudry, J. (1999). *Écologie du paysage concepts, méthodes et applications*.

Burghardt, K. T., Tallamy, D. W., & Gregory Shriver, W. (2009). Impact of native plants on bird and butterfly biodiversity in suburban landscapes. *Conservation Biology*, 23(1), 219-224.

Cerema. (2019) SESAME Services écosystémique rendus par les arbres modulés selon l'essence

Chapin, F. S., Walker, L. R., Fastie, C. L., & Sharman, L. C. (1994). Mechanisms of primary succession following deglaciation at Glacier Bay, Alaska. *Ecological Monographs*, 64(2), 149-175.

Chazdon, R.L., & Guariguata, M.R. (2016). Natural regeneration as a tool for large-scale forest restoration in the tropics: prospects and challenges. *Biotropica*, 48, 716-730.

Chevrier, É. (2013). *La phytoremédiation, une solution d'avenir pour le Québec*.

Cho, M. (2010). The politics of urban nature restoration: The case of Cheonggyecheon restoration in Seoul, Korea. *International Development Planning Review*, 32, 145-165.

Clark, N.E., Lovell, R., Wheeler, B.W., Higgins, S.L., Depledge, M.H. & Norris, K. (2014). Biodiversity, cultural pathways, and human health: a framework. *Trends in Ecology & Evolution*, 29, 198-204.

Connop, S., & Nash, C. (2018). *Blandscaping that erases local ecological diversity*.

Convention de Ramsar sur les zones humides. (2018). *Perspectives mondiales des zones humides : état des zones humides à l'échelle mondiale et des services qu'elles fournissent à l'humanité*. Gland, Suisse : Secrétariat de la Convention de Ramsar.

Coppola, E., Nogherotto, R., Ciardo, J. M., Giorgi, F., van Meijgaard, E., Kadygrov, N., ... & Wulfmeyer, V. (2021). Assessment of the European climate projections as simulated by the large EURO CORDEX regional and global climate model ensemble. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 126(4), e2019JD032356.

Cordeau, E. (2017). *Adapter l'Île-de-France à la chaleur urbaine*.

Cornet, N., Cocquière, A., (2021). *La pleine terre : nécessité d'une définition partagée dans les PLU - Note rapide Environnement, n° 884*

- Cortet, J., Auclerc, A., Beguiristain, T., & Watteau, F. (2014, November). Biodiversité et fonctionnement d'un Technosol construit utilisé dans la restauration de friches industrielles: principaux résultats issus du programme Biotechnosol. In 3èmes rencontres nationales de la Recherche sur les sites et sols pollués, journées techniques nationales (p. np).
- Costanza, R., D'Arge, R.C., Groot, R.D., Farber, S.B., Grasso, M., Hannon, B.M., Limburg, K.E., Naeem, S., O'Neill, R.V., Paruelo, J.M., Raskin, R.G., Sutton, P.C., & Belt, M.V. (1997). The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 387, 253-260.
- Cox, D. T., Shanahan, D. F., Hudson, H. L., Plummer, K. E., Siriwardena, G. M., Fuller, R. A., ... & Gaston, K. J. (2017). Doses of neighborhood nature: the benefits for mental health of living with nature. *BioScience*, 67(2), 147-155.
- Daly, H.E. (1997). *Beyond Growth: The Economics of Sustainable Development*.
- David, A. (2016). Vers une compréhension du fonctionnement carboné et écohydrologique des tilleuls argentés (*Tilia tomentosa* Moench) plantés en alignement à Paris.
- DeClerck, F.A., Jones, S.K., Estrada-Carmona, N., & Fremier, A.K. (2021). Spare half, share the rest: A revised planetary boundary for biodiversity intactness and integrity
- Drinnan, I.N. (2005). The search for fragmentation thresholds in a Southern Sydney Suburb. *Biological Conservation*, 124, 339-349.
- Dutoit, T., Buisson, E., Fadda, S., Henry, F., Coiffait-Gombault, C., Jaunatre, R., Alignan, J., Masson, S., & Bulot, A. (2013). The pseudo-steppe of La Crau (South-Eastern France): origin, management and restoration of a Mediterranean rangeland.
- Fabrizi, D., Pizzol, R., Calza, P., Malandrino, M., Gaggero, E., Padoan, E., & Ajmone-Marsan, F. (2021). Constructed Technosols: A Strategy toward a Circular Economy. *Applied Sciences*, 11, 3432.
- Faburel, G. (2020). *Pour en finir avec les grandes villes: Manifeste pour une société écologique post-urbaine*. Le Passager Clandestin.
- Ford, A.T., Sunter, E.J., Fauvelle, C., Bradshaw, J.L., Ford, B., Hutchen, J., Phillipow, N., & Teichman, K.J. (2020). Effective corridor width: linking the spatial ecology of wildlife with land use policy. *European Journal of Wildlife Research*, 66.
- Fortel, L., Henry, M., Guilbaud, L., Mouret, H., & Vaissiere, B. E. (2016). Use of human-made nesting structures by wild bees in an urban environment. *Journal of Insect Conservation*, 20(2), 239-253.
- Fosse, J., Belaunde, J., Dégremont, M., & Grémillet, A. (2019). Objectif « zéro artificialisation nette » : quels leviers pour protéger les sols. *France Stratégie*.
- Foti, L., Dubs, F., Gignoux, J., Lata, J., Lerch, T.Z., Mathieu, J., Nold, F., Nunan, N., Raynaud, X., Abbadie, L., & Barot, S. (2017). Trace element concentrations along a gradient of urban pressure in forest and lawn soils of the Paris region (France). *The Science of the total environment*, 598, 938-948 .
- France, M. (2020). Les nouvelles projections climatiques de référence DRIAS 2020 pour la métropole. Collaboration entre Météo France, CNRM, Cerfacs et IPSL.
- Forman, R.T., & Baudry, J. (1984). Hedgerows and hedgerow networks in landscape ecology. *Environmental Management*, 8, 495-510.
- Fuller, R.A., Irvine, K.N., Devine-Wright, P., Warren, P.H., & Gaston, K.J. (2007). Psychological benefits of greenspace increase with biodiversity. *Biology Letters*, 3, 390 - 394.

Gardiner, M. M., Burkman, C. E., & Prajzner, S. P. (2013). The value of urban vacant land to support arthropod biodiversity and ecosystem services. *Environmental entomology*, 42(6), 1123-1136.

Génot, J., Schnitzler, A. (2012). *La France des friches : De la ruralité à la féralité*. Versailles : Éditions Quæ.

Genot, J. C., & Schnitzler, A. (2020). *La nature férale ou le retour du sauvage*. Jouvence.

Grandin G., Barra M., *Renaturer l'Île-de-France : vers un territoire plus résilient* (2020). Note rapide Les ateliers du ZAN, n° 843

Grubb, P. J., & Hopkins, A. J. M. (1986). Resilience at the level of the plant community. In *Resilience in mediterranean-type ecosystems* (pp. 21-38). Springer, Dordrecht.

Griffith, J.J., Silva, E., Williams, D., Rossi, R.L., Ardinghi, N., & Cenni, M. (2013). *SER International Primer on Ecological Restoration*.

Goddard, M. A., Dougill, A. J., & Benton, T. G. (2010). Scaling up from gardens: biodiversity conservation in urban environments. *Trends in ecology & evolution*, 25(2), 90-98.

Gouedard, Q. (2014). *Les sols urbains, des milieux contraignants pour le développement de l'arbre dans la ville*.

Guetté, A., Carruthers-Jones, J., Godet, L., & Robin, M. (2018). «Naturalité»: concepts et méthodes appliqués à la conservation de la nature. *Cybergeo: European Journal of Geography*.

Hafeez, F., Spor, A., Breuil, M.C., Schwartz, C., Martin-Laurent, F., & Philippot, L. (2012). Distribution of bacteria and nitrogen-cycling microbial communities along constructed Technosol depth-profiles. *Journal of hazardous materials*, 231-232, 88-97 .

Hafidi, M., Ouahmane, L., Thioulouse, J., Sanguin, H., Boumezzough, A., Prin, Y., Baudoin, E., Galiana, A., & Duponnois, R. (2013). Managing Mediterranean nurse plants-mediated effects on soil microbial functions to improve rock phosphate solubilization processes and early growth of *Cupressus atlantica* G. *Ecological Engineering*, 57, 57-64.

Henein, K., & Merriam, G. (1990). The elements of connectivity where corridor quality is variable. *Landscape Ecology*, 4, 157-170

Henry, C., Richard, F., Ramanankierana, H., Ducousso, M., & Selosse, M. A. (2021). Comprendre la dynamique des communautés mycorhiziennes lors des successions végétales. Deuxième partie: Potentialités d'applications à la restauration des écosystèmes forestiers (revue bibliographique).

Herin, J. J., & Dennin, L. (2016). Une politique pluviale volontariste et durable: bilan de 25 ans de bonnes pratiques environnementales-l'exemple chiffré du Douaisis-France. *Fonctionnement global du système d'assainissement/ Global performance of the drainage system-Stratégie/Strategy*.

Hill, M. J., Biggs, J., Thornhill, I., Briers, R. A., Gledhill, D. G., White, J. C., ... & Hassall, C. (2017). Urban ponds as an aquatic biodiversity resource in modified landscapes. *Global change biology*, 23(3), 986-999.

Hinners, S.J., Kearns, C.A., & Wessman, C.A. (2012). Roles of scale, matrix, and native habitat in supporting a diverse suburban pollinator assemblage. *Ecological applications* : a publication of the Ecological Society of America, 22 7, 1923-35 .

Hostetler, M.E., & Holling, C.S. (2004). Detecting the scales at which birds respond to structure in urban landscapes. *Urban Ecosystems*, 4, 25-54.

Hwang, K.Y., & Joon, L. (2005). Three Keys to the Success of Cheonggyecheon Restoration Project: Conflict Management Strategies.

Hystad, P., Payette, Y., Noisel, N., & Boileau, C. (2019). Green space associations with mental health and cognitive function: results from the Quebec CARTaGENE cohort. *Environmental Epidemiology*, 3(1).

IPBES (2019): Global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. E. S. Brondizio, J. Settele, S. Díaz, and H. T. Ngo (editors). IPBES secretariat, Bonn, Germany.

IPBES (2019): Summary for policymakers of the global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. S. Díaz, J. Settele, E. S. Brondizio, H. T. Ngo, M. Guèze, J. Agard, A. Arneth, P. Balvanera, K. A. Brauman, S. H. M. Butchart, K. M. A. Chan, L. A. Garibaldi, K. Ichii, J. Liu, S. M. Subramanian, G. F. Midgley, P. Miloslavich, Z. Molnár, D. Obura, A. Pfaff, S. Polasky, A. Purvis, J. Razzaque, B. Reyers, R. Roy Chowdhury, Y. J. Shin, I. J. Visseren-Hamakers, K. J. Willis, and C. N. Zayas (eds.). IPBES secretariat, Bonn, Germany. 56 pages.

Jaunatre, R., Buisson, E., & Dutoit, T. (2014). Topsoil removal improves various restoration treatments of a Mediterranean steppe (La Crau, southeast France). *Applied Vegetation Science*, 17(2), 236-245.

Kaplan, R., & Kaplan, S. (1989). *The experience of nature: A psychological perspective*. Cambridge university press.

Karagiannidis, N., & Hadjisavva-Zinoviadi, S. (1998). The mycorrhizal fungus *Glomus mosseae* enhances growth, yield and chemical composition of a durum wheat variety in 10 different soils. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 52(1), 1-7.

Keitt, T.H., Urban, D.L., & Milne, B.T. (1997). Detecting Critical Scales in Fragmented Landscapes. *Conservation Ecology*, 1, 4.

Kim, H.S., T.G. Koh, and K.W. Kwon. (2009.) *The Cheonggyecheon (Stream) Restoration Project Effects of the restoration work*. Cheonggyecheon Management Team, Seoul Metropolitan Facilities Management Corporation. Seoul, South Korea.

Kowarik, I. (2005). *Wild Urban Woodlands: Towards a Conceptual Framework*.

Kurylo, J. S., Threlfall, C. G., Parris, K. M., Ossola, A., Williams, N. S. G., & Evans, K. L. (2020). Butterfly richness and abundance along a gradient of imperviousness and the importance of matrix quality. *Ecological Applications*, 30(7), e02144.

Lefebvre W. and Vranckx S. (Eds.), 2013. Validation of the IFDM-model for use in urban applications, Study accomplished in the framework of the ATMOSYS-project, 2013/RMA/R/56

Lemoine, G., (2016). Essais de création ex nihilo de deux « landes à Ericacées » sur friches industrielles. *Bull. Soc. Bot. N. Fr.*, 2016, 69 (1-4) : 123-129

Le Roux, D.S., Ikin, K., Lindenmayer, D.B., Manning, A.D., & Gibbons, P. (2014). The Future of Large Old Trees in Urban Landscapes. *PLoS ONE*, 9.

Le Roux, D. S., Ikin, K., Lindenmayer, D. B., Manning, A. D., & Gibbons, P. (2015). Single large or several small? Applying biogeographic principles to tree-level conservation and biodiversity offsets. *Biological Conservation*, 191, 558-566.

Levrel et al., 2021. Limiter l'artificialisation des sols pour éviter une dette écologique se chiffrant en dizaines de milliards d'euros. *The Conversation*

Lévy, J. (2015). *Habiter Cheonggyecheon : l'exception ordinaire*.

Litschke, T., & Kuttler, W. (2008). On the reduction of urban particle concentration by vegetation-a review. *Meteorologische Zeitschrift*, 17(3), 229-240.

Maienza, A., Ungaro, F., Baronti, S., Colzi, I., Giagnoni, L., Gonnelli, C., ... & Calzolari, C. (2021). Biological Restoration of Urban Soils after De-Sealing Interventions. *Agriculture*, 11(3), 190.

Mathieu, J. (2015). Biodiversité et syndrome de dispersion dans les communautés de macrofaune du sol (Doctoral dissertation, Université Pierre et Marie Curie).

Meyer-Grandbastien A., Vajou B., Fromage B., Galopin G., Laille P. (2021). Effets bénéfiques des espaces de nature en ville sur la santé : Synthèse des recherches internationales et clés de compréhension. *Plante & Cité*, Angers, 18 p.

Miller, J.R. (2005). Biodiversity conservation and the extinction of experience. *Trends in Ecol. Evol.* 20, 430–434.

Monberg, R. J., Howe, A. G., Kepfer-Rojas, S., Ravn, H. P., & Jensen, M. B. (2019). Vegetation development in a stormwater management system designed to enhance ecological qualities. *Urban Forestry & Urban Greening*, 46, 126463.

Monteiro, M. V., Doick, K. J., Handley, P., & Peace, A. (2016). The impact of greenspace size on the extent of local nocturnal air temperature cooling in London. *Urban Forestry & Urban Greening*, 16, 160-169.

Morel, J. L., Renat, J. C., Schwartz, C., & Séré, G. (2008). Procédé de valorisation de déchets et sous-produits en construction de sol pour la réhabilitation de sites dégradé. *Environnement, Ingénierie & Développement*.

Muratet, A., Machon, N., Jiguet, F., Moret, J., & Porcher, E. (2007). The role of urban structures in the distribution of wasteland flora in the greater Paris area, France. *Ecosystems*, 10(4), 661-671.

Muratet, A., Porcher, E., Devictor, V., Arnal, G., Moret, J., Wright, S., & Machon, N. (2008). Evaluation of floristic diversity in urban areas as a basis for habitat management.

Muratet A., 2016, Etat de santé de la biodiversité en Île-de-France. Apport du programme de sciences participatives Vigie Nature. Dossier de presse Natureparif. 22 pages

Muratet, A., Muratet, M., Pellaton, M., & Book., L. (2017). Flore des friches urbaines du nord de la France et des régions voisines / Audrey Muratet ; [photographies de] Myr Muratet [et dessins de] Marie Pellaton.

Muratet A, Chiron F, Muratet M (2019), Manuel d'écologie urbaine, Editions les presses du réel, 120 pages

Nash, C. (2017). Brownfield-inspired green infrastructure: a new approach to urban biodiversity conservation (Doctoral dissertation, University of East London).

Nowak, D.J., Bodine, A. R., Hoehn, R. E., Ellis, A., Hirabayashi, S., Coville, R., ... & Endreny, T. (2018). The urban forest of new york city. *Resource Bulletin NRS-117*. Newtown Square, PA: US Department of Agriculture, Forest Service, Northern Research Station. 82 p, 117, 1-82.

Oertli, B., & Parris, K.M. (2019). Review: Toward management of urban ponds for freshwater biodiversity. *Ecosphere*.

Pascal, M., de Crouy Chanel, P., Wagner, V., Corso, M., Tillier, C., Bentayeb, M., ... & Medina, S. (2016). The mortality impacts of fine particles in France. *Science of the Total Environment*, 571, 416-425.

Pascal, M., Goria, S., Wagner, V., Sabastia, M., Guillet, A., Cordeau, E., ... & Host, S. (2021). Greening is a promising but likely insufficient adaptation strategy to limit the health impacts of extreme heat. *Environment international*, 151, 106441.

Pech, P. (2015). Renaturation. *Hypergeo*

Pellegrini P., Maurel N., Lizet B., Machon N., à paraître, « Pieds d'arbres jardinés, espaces de diversité », in Menozzi M.-J., Manusset S., Bioret F. (éds), Jardins, espaces de vie, de connaissance et de biodiversité, actes du colloque de la Société d'écologie humaine, 2-4 juin 2010, Brest, PUR, Rennes.

Peyrat, M. (2014). Entre objet naturel et objet technique, quelle place pour l'arbre en ville? (Doctoral dissertation, Mairie de Fontaine, Service Développement Durable, 89 mail Marcel Cachin, 38600 Fontaine).

Pileri, P. (2007). Compensazione ecologica preventiva per un 'nuovo' governo del territorio.

Plante & Cité, 2021. Associer santé et espaces de nature - Les clés pour comprendre et agir. Plante & Cité, Angers, 68 p

Plenchette, C., Furlan, V., & Fortin, J.A. (1983). Responses of endomycorrhizal plants grown in a calcined montmorillonite clay to different levels of soluble phosphorus. I. Effect on growth and mycorrhizal development. *Botany*, 61, 1377-1383.

Powers, S., Peterson, C., Grabowski, J.H., & Lenihan, H.S. (2009). Success of constructed oyster reefs in no-harvest sanctuaries: implications for restoration. *Marine Ecology Progress Series*, 389, 159-170.

Prach, K., & Hobbs, R.J. (2008). Spontaneous Succession versus Technical Reclamation in the Restoration of Disturbed Sites. *Restoration Ecology*, 16, 363-366.

Prach, K., & Moral, R.D. (2015). Passive restoration is often quite effective: response to Zahawi et al (2014). *Restoration Ecology*, 23, 344-346.

Prigioniero, A., Zuzolo, D., Niinemets, Ü., & Guarino, C. (2021). Nature-Based Solutions as tools for air phytoremediation: a review of the current knowledge and gaps. *Environmental Pollution*, 116817.

Pruvost, C. (2018). Potentiel de la biodiversité dans la construction de Technosols à partir de déchets urbains (Doctoral dissertation, Paris Est).

Pugh, T.A., MacKenzie, A.R., Whyatt, J.D., & Hewitt, C.N. (2012). Effectiveness of green infrastructure for improvement of air quality in urban street canyons. *Environmental science & technology*, 46 14, 7692-9.

Pulliam, H.R. (1988). Sources, Sinks, and Population Regulation. *The American Naturalist*, 132, 652 - 661.

Ravot, C., Laslier, M., Hubert-Moy, L., Dufour, S., Coeur, D.L., & Bernez, I. (2020). Apports d'une observation précoce de la végétation spontanée pionnière pour la renaturation des rives de la rivière Sélune.

Référentiel Pédologique (2008). Association Française pour l'Étude du Sol. Ed Quæ.

Revkin A, 2009, "Peeling Back Pavement to Expose Watery Havens", *The New York Times*, July 16

Rey, F., Cécillon, L., Cordonnier, T., Jaunatre, R., & Loucougaray, G. (2015). Integrating ecological engineering and ecological intensification from management practices to ecosystem services into a generic framework: a review. *Agronomy for Sustainable Development*, 35, 1335-1345.

Riboulot-Chetrit, M. (2015). Les jardins privés: de nouveaux espaces clés pour la gestion de la biodiversité dans les agglomérations?. *Articulo-Journal of Urban Research*, (Special issue 6).

Rivière, J. N., Hivert, J., Schmitt, L., Derroire, G., Sarrailh, J. M., & Baret, S. (2008). Rôle des fougères arborescentes dans l'installation des plantes à fleurs en forêt tropicale humide de montagne à la Réunion (Mascareignes, Océan Indien). *Revue d'écologie*.

Ropars, L., Dajoz, I., & Geslin, B. (2017). La ville un désert pour les abeilles sauvages?. *Journal de Botanique*, 79, 29-35.

Sæbø, A., Popek, R., Nawrot, B., Hanslin, H.M., Gawrońska, H., & Gawroński, S.W. (2012). Plant species differences in particulate matter accumulation on leaf surfaces. *The Science of the total environment*, 427-428, 347-54 .

Sarasin, G. (2011). Biotechnologie des symbioses racinaires en restauration écologique des écosystèmes dégradés à Madagascar.

Sarrazin, F., & Lecomte, J. (2016). Evolution in the Anthropocene. *Science*, 351, 922 - 923.

Schiechtl, H.M., & Stern, R. (1992). *Handbuch für naturnahen Wasserbau : eine Anleitung für ingenieurbio-logische Bauweisen*.

Schirone, B., Salis, A., & Vessella, F. (2011). Effectiveness of the Miyawaki method in Mediterranean forest restoration programs. *Landscape and Ecological Engineering*, 7(1), 81-92.

Schwartz, T. (2020). *Les dispositifs artificiels au service de la restauration et de la compensation écologique: de l'évaluation du risque de piège écologique aux recommandations de bonnes pratiques* (Doctoral dissertation, Université Paris sciences et lettres).

Selmi, W., Weber, C., Rivière, E.D., Blond, N., Mehdi, L., & Nowak, D.J. (2016). Air pollution removal by trees in public green spaces in Strasbourg city, France. *Urban Forestry & Urban Greening*, 17, 192-201.

Séré, G. (2007). *Fonctionnement et évolution pédogénétiques de Technosols issus d'un procédé de construction de sol*.

Séré, G., Schwartz, C., Ouvrard, S., Renat, J., Watteau, F., Villemin, G., & Morel, J. (2010). Early pedogenic evolution of constructed Technosols. *Journal of Soils and Sediments*, 10, 1246-1254.

Séré, G. (2018). *Mieux connaître la pédogenèse et le fonctionnement des Technosols pour optimiser les services écosystémiques rendus* (Doctoral dissertation, Université de Lorraine, 34 cours Léopold, 54000 Nancy).

Shanahan, D.F., Miller, C.J., Possingham, H.P., & Fuller, R.A. (2011). The influence of patch area and connectivity on avian communities in urban revegetation. *Biological Conservation*, 144, 722-729.

Sonntag-Öström, E., Nordin, M., Lundell, Y., Dolling, A., Wiklund, U., Karlsson, M., ... & Järvholm, L. S. (2014). Restorative effects of visits to urban and forest environments in patients with exhaustion disorder. *Urban forestry & urban greening*, 13(2), 344-354.

Shwartz, A., Muratet, A., Simon, L., & Julliard, R. (2013). Local and management variables outweigh landscape effects in enhancing the diversity of different taxa in a big metropolis. *Biological Conservation*, 157, 285-292.

Sordello, R., 2021. *Trame verte, trame bleue et autres trames*. Regard 72, Société Française d'écologie

Spotswood, E.N., Grossinger, R.M., Hagerty, S., Bazo, M., Benjamin, M., Beller, E.E., Grenier, L., & Askevold, R.A. (2019). *Making Nature's City*

Stanghellini, P.S. (2010). Stakeholder involvement in water management: the role of the stakeholder analysis within participatory processes. *Water Policy*, 12, 675-694.

Stagoll, K., Lindenmayer, D. B., Knight, E., Fischer, J., & Manning, A. D. (2012). Large trees are keystone structures in urban parks. *Conservation Letters*, 5(2), 115-122.

Strohbach, M. W., Lerman, S. B., & Warren, P.S. (2013). Are small greening areas enhancing bird diversity? Insights from community-driven greening projects in Boston. *Landscape and Urban Planning*, 114, 69-79.

Szulczewska, B., Giedych, R., Borowski, J., Kuchcik, M., Sikorski, P., Mazurkiewicz, A., & Stańczyk, T. (2014). How much green is needed for a vital neighbourhood? In search for empirical evidence. *Land Use Policy*, 38, 330-345.

- Thiffault, N., & Hébert, F. (2017). Mechanical site preparation and nurse plant facilitation for the restoration of subarctic forest ecosystems. *Canadian Journal of Forest Research*, 47, 926-934.
- Threlfall, C. G., Ossola, A., Hahs, A. K., Williams, N. S. G., Wilson, L., & Livesley, S. J. (2016). Variation in vegetation structure and composition across urban green space types. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 4(JUN), 1-12. [66].
- Threlfall, C. G., Mata, L., Mackie, J. A., Hahs, A. K., Stork, N. E., Williams, N. S., & Livesley, S. J. (2017). Increasing biodiversity in urban green spaces through simple vegetation interventions. *Journal of applied ecology*, 54(6), 1874-1883.
- Tobias, S., Conen, F., Duss, A., Wenzel, L. M., Buser, C., & Alewell, C. (2018). Soil sealing and unsealing: State of the art and examples. *Land degradation & development*, 29(6), 2015-2024.
- Triplet, P., 2021. Dictionnaire de la diversité biologique et de la conservation de la nature. 7ème édition.
- Turo, K.J., & Gardiner, M.M. (2019). From potential to practical: conserving bees in urban public green spaces. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 17(3), 167-175.
- Urban green spaces and health. Copenhagen: WHO Regional Office for Europe, 2016.
- Vautard, R., Munck, C., Noblet, N., 2021, Les grandes lignes du changement climatique en Ile-de-France, GREC Ile-de-France (non accessible au public)
- Vega, K. A., & Küffer, C. (2021). Promoting wildflower biodiversity in dense and green cities: the important role of small vegetation patches. *Urban Forestry & Urban Greening*, 127165.
- Vidal-Beaudet, L. (2018). Du déchet au Technosol fertile : l'approche circulaire du programme français de recherche SITERRE. *VertigO-la revue électronique en sciences de l'environnement*, (Hors-série 31).
- Vignoli, L., Mocaer, I., Luiselli, L., & Bologna, M.A. (2009). Can a large metropolis sustain complex herpetofauna communities? An analysis of the suitability of green space fragments in Rome. *Animal Conservation*, 12, 456-466.
- Weissgerber M., Roturier S., Julliard R., & Guillet F. (2019). Biodiversity offsetting: Certainty of the net loss but uncertainty of the net gain, *Biological conservation*, 237, 200-208.
- Wilson, E. O. (2017). A biologist's manifesto for preserving life on Earth. *Sierra Club Magazine*.
- World Health Organization. (2006). Lignes directrices OMS relatives à la qualité de l'air : particules, ozone, dioxyde d'azote et dioxyde de soufre : mise à jour mondiale 2005 : synthèse de l'évaluation des risques (No. WHO/SDE/PHE/OEH/06.02). Genève : Organisation mondiale de la Santé.
- Yilmaz, D., Peyneau, P. E., Beaudet, L., Cannavo, P., & Sere, G. (2017, April). Assessment of hydraulics properties of technosol constructed with waste material using Beerkan infiltration. In *EGU General Assembly Conference Abstracts* (p. 13958).



LISTE DES SITES CONSULTÉS

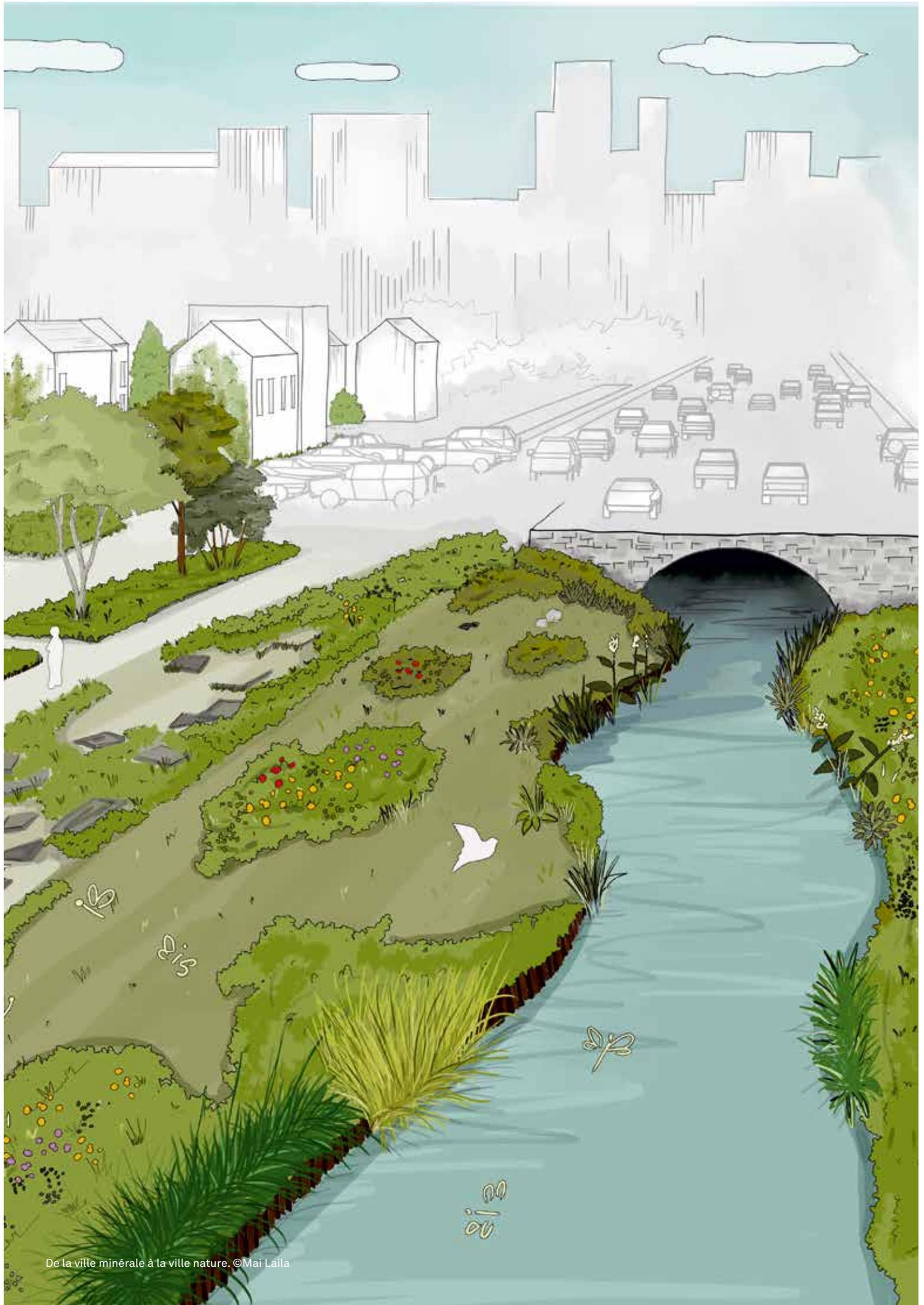
- [1] H2020 REGREEN project : Fostering nature-based solutions for smart, green and healthy urban transitions in Europe and China: <https://www.regreen-project.eu/>
- [2] Vercors Vie Sauvage : <https://aspas-reserves-vie-sauvage.org/les-reserves-de-vie-sauvage/vercors-vie-sauvage/>
- [3] Laisser se reconstituer une forêt primaire en Europe de l'Ouest : <https://www.foretprimaire-francishalle.org/le-projet/>
- [4] Coordination libre évolution : redonnons de la place au vivant : <https://www.coordination-libre-evolution.fr/>
- [5] Méthode de la stratégie de création des aires protégées terrestres – SCAP 2009/2019 : <https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/STRAT%C3%89GIE%20NATIONALE%20POUR%20LES%20AIRES%20PROT%C3%89G%C3%89ES%202030.pdf>
- [6] Réunion d'installation du Comité régional pour la Biodiversité d'Île-de-France : <http://www.driee.ile-de-france.developpement-durable.gouv.fr/seance-d-installation-du-crb-lundi-20-decembre-a4599.html>
- [7] Cartofriches : un inventaire national des friches qui s'appuie sur la connaissance locale : <https://cartofriches.cerema.fr/cartofriches/>
- [8] Outil BENEFRICHES – Évaluer les bénéfices socio-économiques de la reconversion de friches pour lutter contre l'artificialisation : <https://librairie.ademe.fr/urbanisme-et-batiment/3772-evaluer-les-benefices-socio-economiques-de-la-reconversion-de-friches-pour-lutter-contre-l-artificialisation-outil-benefriches.html>
- [9] Préserver ou construire : sur la piste des friches en Île-de-France : <http://atelier-friches.fr/>
- [10] Berlin, métropole naturelle Fiche n° 03bis - mai 2012 Le Naturpark Schöneberg Südgelände (Cerema) : http://paysages-territoires-transitions.cerema.fr/IMG/pdf/fiche_tvb3_berlin_version_courte.pdf
- [11] Urban forests: <https://urban-forests.com/fr/>
- [12] La trame brune : <https://agencelichen.wordpress.com/2016/09/21/trame-brune/>
- [13] Arbre en milieu urbain – Guide de mise en œuvre : https://www.citeverte.com/fileadmin/Citeverte_Ressources/PDF/Publication_Arbre-en-milieu-urbain.pdf
- [14] Trame verte, trame bleue, et toutes ces autres trames dont il faudrait se préoccuper : <https://www.sfecologie.org/regard/r72-mai-2017-r-sordello-corridors-ecologiques/>
- [15] Save Our Soil For Life : <https://www.sos4life.it/en/project/>
- [16] Summary of rules, guidelines, best practices and case studies on limiting land take and on urban resilience to climate change : <https://www.sos4life.it/wp-content/uploads/A1.3-Rules-guidelines-best-practices-and-case-studies-of-land-take-and-urban-resilience.pdf>
- [17] Guidelines for assessing soil ecosystem services in urban environment and their management : <https://www.sos4life.it/wp-content/uploads/B1.3-Guidelines-for-assessing-soil-ecosystem-services.pdf>
- [18] Dix-sept nouveaux parcs urbains en Wallonie : <https://henry.wallonie.be/home/communiqués--actualités/communiqués-de-presse/presses/creation-de-17-nouveaux-espaces-verts-urbains.html>

- [19] Trajectory Pilot Projects Desealing : <https://www.architectureworkroom.eu/en/projects/2820/trajectory-pilot-projects-desealing>
- [20] Potential for the removal of impervious soil coverage 2020 <https://www.berlin.de/umweltatlas/en/soil/removal-of-impervious-soil-coverage/continually-updated/summary/>
- [21] Des solutions pour la désimpermeabilisation des sols du Grand Narbonne : <https://www.cerema.fr/fr/actualites/solutions-desimpermeabilisation-sols-du-grand-narbonne#:~:text=L'objectif%20%3F,touche%20les%20zones%20d%C3%A9j%C3%A0%20urbanis%C3%A9es.>
- [22] Comment identifier un potentiel de renaturation à large échelle ? : <https://www.cerema.fr/fr/actualites/comment-identifier-potentiel-renaturation-large-echelle>
- [23] Désiville, projet de recherche financé par l'ADEME visant à apporter une réponse intégrée à la thématique de désimpermeabilisation des sols urbains : <https://aau.archi.fr/contrat-de-recherche/desiville-outils-daide-a-la-desimpermeabilisation-des-sols-artificialises-developpements-methodologiques-pour-levaluation-du-potentiel-de-desimpermeabilisation-et-catalogue-de-so/>
- [24] Aide à la renaturation des sols imperméabilisés en Loire-Atlantique : https://www.loire-atlantique.fr/44/environnement-energies/aide-a-la-renaturation-des-sols-impermeabilises/c_1305724
- [25] Zéro artificialisation nette en Île-de-France : <https://www.institutparisregion.fr/environnement/zero-artificialisation-nette-en-ile-de-france.html>
- [26] Programme Nature 2050 : <https://www.nature2050.com/>
- [27] Reimagining vacant land: a resource for urban bee conservation : https://ncoh.nl/wp-content/uploads/2021/06/Gardiner-12-Minute-Talk-Science-Cafe-Final-5_25_21_LR.pdf
- [28] Ideas for vacant land re-use in Cleveland : <https://planning.clevelandohio.gov/ftp/8IdeasForVacant-LandReuseCleveland.pdf>
- [29] Florilège : prairie urbaine : <https://www.vigienature.fr/fr/florileges>
- [30] Association Espaces, l'insertion par l'écologie urbaine : <https://www.association-espaces.org/association/>
- [31] Plaines et coteaux de la Seine centrale urbaine : www.seine-centrale-urbaine.org
- [32] Compte rendu des ateliers thématiques de mai-juin 2017 : https://ge21.ch/application/files/8615/0297/3286/synthese_groupes_nos_arbres_1er_tour_20170810.pdf
- [33] Météo France, 2018, L'îlot de chaleur urbain : https://www.apc-paris.com/system/files/file_fields/2018/11/07/icu-brochureapc-mf.pdf
- [34] Agence de l'eau Seine Normandie, janvier 2017, Atelier presse eaux pluviales, http://www.eau-seine-normandie.fr/mediatheque/presse/dossier_de_presse/dossier_de_presse_pluvial_V6.pdf
- [35] Prévention des inondations : une politique partenariale à tous les échelons : https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/19150_plaquette-inondation_light_interactif.pdf
- [36] Gestion des risques d'inondations et restauration des cours d'eau : <https://professionnels.ofb.fr/fr/node/171>

- [37] La réhabilitation des petites rivières urbaines : retours d'expériences sur des projets multi-bénéfiques : <https://www.astee.org/publications/la-rehabilitation-des-petites-rivieres-urbaines-retours-dexperiences-sur-des-projets-multi-benefices/>
- [38] Gestion des eaux pluviales en milieu urbain : https://www.france-libertes.org/wp-content/uploads/save/pdf/gestion_des_eaux_pluviales.pdf
- [39] Aménager avec la nature en ville : des idées préconçues à la caractérisation des effets environnementaux, sanitaire et économiques : <https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/amenager-avec-la-nature-en-ville-8873.pdf>
- [40] Les particules fines : <https://www.airparif.asso.fr/les-particules-fines>
- [41] Impact sanitaire de la pollution de l'air en France : nouvelles données et perspectives : <https://www.santepubliquefrance.fr/presse/2016/impacts-sanitaires-de-la-pollution-de-l-air-en-france-nouvelles-donnees-et-perspectives>
- [42] Ambient (outdoor) air pollution : [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)
- [43] Plante & Cité, 2020, WEBINAIRE Nature en ville et santé état des connaissances : <https://www.youtube.com/watch?v=k6CKJh2KPK8>
- [44] Végétaliser pour réduire localement l'exposition à la pollution de l'air : des solutions basées sur la nature : <https://environnement.brussels/lenvironnement-etat-des-lieux/en-detail/environnement-pour-une-ville-durable/vegetaliser-pour-reduire-localement-l'exposition-la-pollution-de-lair-des-solutions-basees-sur-la-nature>
- [45] Cécile Diguët et Frédérique Prédali, 2021, Chronique de la marche et de l'espace public n° 1, <https://www.institutparisregion.fr/mobilite-et-transport/modes-actifs/chroniques-de-la-marche-et-de-lespace-public/gardons-les-pieds-sur-terre/>
- [46] Services écosystémiques rendus par les arbres, modulés selon l'essence : https://metz.fr/fichiers/2019/12/02/SESAME_Etude_complete.pdf
- [47] Se mobiliser contre l'extinction de l'expérience de nature : <http://www.espaces-naturels.info/se-mobiliser-contre-extinction-experience-nature>
- [48] Site internet de l'association : <http://le-transformateur.fr/>
- [49] Évolution et suivi du bosquito : <http://le-transformateur.fr/tag/bosquito/>
- [50] L'infiltration en question : recommandations pour la faisabilité et la gestion des ouvrages d'infiltration des eaux pluviales en milieu urbain : http://www.graie.org/ecopluiers/delivrables/55729e_guidemodifie_20090203fin6-2.pdf
- [51] Les inondations par remontée de nappes : <https://www.georisques.gouv.fr/articles-risques/inondations/les-inondations-par-remontee-de-nappe>
- [52] Le niveau des nappes souterraines : <https://www.eaufrance.fr/le-niveau-des-nappes-souterraines#:~:text=Cette%20mesure%20s'effectue%20gr%C3%A2ce,aide%20d'un%20flotteur>
- [53] DREIAT : Les affaissements et effondrements liés aux cavités souterraines : <https://www.driea.ile-de-france.developpement-durable.gouv.fr/les-affaissements-et-effondrements-lies-aux-a3773.html>

- [54] Mouvement de terrain (ministère de la transition écologique) : <https://www.ecologie.gouv.fr/mouvements-terrain>
- [55] Aide à la renaturation des sols imperméabilisés : https://www.loire-atlantique.fr/44/environnement-energies/aide-a-la-renaturation-des-sols-impermeabilises/c_1305724
- [56] Des « litter bags » pour évaluer l'action des micro-organismes du sol : https://opera-connaissances.chambres-agriculture.fr/doc_num.php?explnum_id=102038
- [57] Observatoire participatifs des vers de terre : https://ecobiosoil.univ-rennes1.fr/OPVT_accueil.php
- [58] Observatoire participatifs de la biodiversité des sols : <http://ephytia.inra.fr/fr/P/165/jardibiodiv>
- [59] AgrInnov : indicateurs pour évaluer la qualité biologique des sols : https://www.ofsv.org/images/documentations/rapport_agrinov_final_8_juin_2016.pdf
- [60] L'Inventaire historique urbain : anticiper la gestion des sols et favoriser le réemploi des terres excavées au sein d'une OIN : <https://www.banquedesterritoires.fr/dalles-alveoles-ou-vegetalisees-pour-desimpermeabiliser-deux-parkings-de-narbonne-11>
- [61] Les bio-indicateurs de l'état des sols : principes et exemples d'utilisation : https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/bio-indicateurs_010216.pdf
- [62] Démarche disponible sur : <https://www.inrae.fr/actualites/agriculture-urbaine-contamination-demarche-evaluer-gerer-risques-sanitaires>
- [63] Phytodisponibilité des ETM pour les plantes potagères et extrapolations dans la quantification de l'exposition des consommateurs : https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/2017_phytexp_rapport_final.pdf
- [64] Exposition des jardiniers urbains dans un contexte industrialisé – Aspects méthodologiques : <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/environnement-securite-th5/genie-ecologique-en-milieu-urbain-42703210/exposition-des-jardiniers-urbains-dans-un-contexte-industrialise-ge1016/>
- [65] Résultats du plan de surveillance de la pollution du sol des murs à pêches – Observatoire de l'environnement : https://www.montreuil.fr/fileadmin/user_upload/12_Environnement/06_Etat_des_lieux_de_l_environnement/01_L_observatoire_de_l_environnement/ficheS3.pdf
- [66] Jardins de phytoremédiation de Carrières-sous-Poissy – parc PPDH : http://www.hekladonia.com/portfolio_item/jardins-de-phytoremediation-hekladonia-csp/
- [67] Phytoremédiation : exemple du parc départemental du Peuple de l'Herbe à Carrières-sous-Poissy (78) : http://www.ipecc.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/8_jean-louis_ducreux_aeu_21112017.pdf
- [68] Restructurer un sol tassé : bien choisir son outil : <https://www.arvalis-infos.fr/restructurer-un-sol-tasse-bien-choisir-son-outil-@/view-14001-arvarticle.html>
- [69] Enjeux de la reconversion d'une friche et comment évaluer la réhabilitation écologique d'un sol dégradé, Synthèse projet Bio-TUBES : https://www.reconversion-friches.ademe.fr/Ds/Gaia_POOL_PROD_1_ade-me/ConferenceSession/a7c7de68-b1c6-ea11-80f0-005056ae0696/x_DocumentConference/synthese-biotubes-enjeux-reconversion-friche_2020.pdf?DsCode=V3EVT
- [70] Projet de reconstitution de sols fertiles à partir de matériaux recyclés : <https://www.audreymuratet.com/pdf/SolsReconstitues.pdf>

- [71] Désimperméabilisation des Sols, Services Ecosystémique et Résilience des Territoires : DESSERT : https://www.plante-et-cite.fr/projet/fiche/101/desimpermeabilisation_des_sols_services_ecosystemiques_et_resilience_des_territoires_dessert/n:25
- [72] La liste des espèces bénéficiant de la marque ainsi que celle des producteurs sont disponibles sur le site : www.vegetal-local.fr
- [73] Clémentine Coiffait Gombault, Élise Buisson, Thierry Dutoit, « Restaurer la végétation steppique par aspiration et transfert de foin », Espaces naturels, n°29, janvier 2010. Disponible sur : <http://www.espaces-naturels.info/restaurer-vegetation-steppique-aspiration-et-transfert-foin>
- [74] Programme d'étude Plante et Cité sur les mycorhizes : <https://www.jardinsdefrance.org/programme-de-tudes-plante-et-cite-sur-les-mycorhizes/>
- [75] Guide de gestion écologique des espaces collectifs publics et privés : <https://www.arb-idf.fr/nos-travaux/publications/guide-de-gestion-ecologique-des-espaces-collectifs-publics-et-prives/>
- [76] Toutes les ressources du label EcoJardin sont disponibles sur : <https://www.label-ecojardin.fr/fr>
- [77] Définition d'un protocole standardisé : <https://campanule.mnhn.fr/concepts-et-definitions/>
- [78] Intérêt des protocoles standardisés : <https://www.vigienature.fr/fr/programme-vigie-nature-2877>
- [79] Les différents protocoles de sciences participatives : <https://www.vigienature.fr/fr>
- [80] Portail de l'Observatoiresparticipatifs des espèces et de la nature : <https://www.open-sciences-participatives.org/home/>
- [81] Cahier de recommandations OASIS : https://www.ac-paris.fr/portail/upload/docs/application/pdf/2020-11/cahier_de_recommandations_oasis_v5_compressed_2.pdf
- [82] Sous les pavés : <https://souslespaves.ca/>
- [83] Strasbourg ça pousse : <https://www.strasbourgcapousse.eu/>
- [84] Les orientations d'aménagement et de programmation du plan local d'urbanisme – guide de recommandations juridiques : https://www.cohesion-territoires.gouv.fr/sites/default/files/2019-12/Guide_juridique_Orientations_Amenagement_et_Programmation_plu_-_nov_2019.pdf
- [85] Circulaire du 8 février 1973 relative à la politique d'espaces verts : https://www.portedenbas.org/IMG/pdf/note_espaces_verts_circulaire_1973.pdf
- [86] Le phénomène de facilitation : quand les plantes s'aident pour survivre : <https://www.tela-botanica.org/2017/07/article8209/>
- [87] La marque Végétal local® : <https://www.vegetal-local.fr/la-marque>
- [88] Les organismes « ingénieurs de l'écosystème » : https://www.uved.fr/fileadmin/user_upload/Documents/pdf/Transcriptions/MOOC_UVED_IngEco_Abbadie_Organismes-ingenieurs.pdf
- [89] JORF du 18 août 2015 : <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000031047578>



SIGLES ET ACRONYMES UTILISÉS

ADEME	Agence de la transition écologique
ARB ÎdF	Agence régionale de la biodiversité en Île-de-France
BRGM	Bureau de recherches géologiques et minières
CEREMA	Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement
DRIA AF	Direction régionale et interdépartementale de l'alimentation, de l'agriculture et de la forêt
DRIEAT	Direction régionale et interdépartementale de l'Environnement, de l'Aménagement et des Transports
ENS	Espace naturel sensible
EPF	Établissement public foncier
ERC	Éviter, réduire, compenser
ETM	Éléments traces métalliques
ICU	Îlot de chaleur urbain
INRAE	Institut national de la recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement
INSEE	Institut national de la statistique et des études économiques
MOS	Mode d'occupation du sol
OAP	Orientation d'aménagement et de programmation
OMS	Organisation mondiale de la santé
ORE	Obligation réelle environnementale
PLU/i	Plan local d'urbanisme communal ou intercommunal
SCoT	Schéma de cohérence territoriale
SDRIF	Schéma directeur de la région Île-de-France
SFN	Solutions fondées sur la nature
SRADDET	Schéma régional d'aménagement, de développement durable et d'égalité des territoires
TVB	Trame verte et bleue
UNESCO	Organisation des Nations unies pour l'éducation, la science et la culture
ZAC	Zone d'aménagement concerté
ZAN	Zéro artificialisation nette

RENATURER LES VILLES

Méthode, exemples et préconisations

La renaturation des milieux urbains représente un défi majeur, que ce soit pour mettre en œuvre une stratégie zéro artificialisation nette sur son territoire ou rendre nos villes plus perméables au vivant, plus végétalisées et plus agréables à vivre. La méthode présentée dans ce guide a pour objectif d'aider les collectivités à identifier des zones de renaturation prioritaires en s'appuyant sur un triple objectif de reconquête de la biodiversité, d'adaptation au changement climatique et d'amélioration de la santé et du cadre de vie. Les lecteurs y trouveront de nombreux retours d'expérience ainsi que des clés de lecture pour mettre en œuvre leur projet de renaturation sur des bases scientifiques.



15, rue Falguière
75740 Paris cedex 15
Tél. : 01 77 49 76 03
contact.arb@institutparisregion.fr
www.arb-idf.fr

