

# Sols vivants

Alternatives à l'artificialisation des sols  
et réhabilitation des sols dégradés

Guide technique  
Restitution des travaux du groupe de travail  
« Sols vivants » du Club U2B  
Octobre 2022



Nature  
en ville

## Préface

Chaque jour, le béton et l'asphalte gagnent du terrain sur les espaces naturels et les terres agricoles. En parallèle, les scientifiques de l'IPBES nous alertent sur les conséquences écologiques désastreuses de cette artificialisation effrénée. Les projets d'aménagement du territoire ne prennent pas suffisamment en compte l'importance des sols et de la biodiversité qu'ils accueillent en surface comme en profondeur. Ces écosystèmes jouent pourtant un rôle crucial dans le cycle de l'eau, l'absorption du carbone ou la survie d'un grand nombre d'espèces sauvages.

La Loi Climat et Résilience de 2021 a fixé un objectif de Zéro Artificialisation Nette pour 2050. Des réflexions sont aujourd'hui menées afin de limiter les impacts des nouvelles constructions. Des actions de réhabilitation seront également nécessaires pour restaurer les fonctions des sols dans les villes et rendre ces dernières plus résilientes aux changements climatiques. Avec ce guide, la LPO vise à sensibiliser et mobiliser l'ensemble des acteurs de l'aménagement urbain (collectivités, urbanistes, architectes, paysagistes, constructeurs, aménageurs) grâce à des conseils pratiques, des éclairages réglementaires et des solutions techniques, afin que chacun puisse contribuer à la préservation du vivant. Il y a urgence à agir.

Bien sincèrement,

**Allain Bougrain Dubourg**

*Président de la LPO*



# SOMMAIRE

## 2/Préface

## 3/Sommaire

## 4/Introduction

## 8/Chapitre 1 : Comment éviter l'artificialisation des sols pour préserver les Espaces Naturels Agricoles et Forestiers (ENAF) et favoriser la biodiversité au sein des villes ?

### 9/Fiche 1 : L'importance des sols dans la préservation de la biodiversité

9/Qu'est-ce qu'un sol ?

10/Sols et biodiversité

13/Préserver les sols vivants dans l'aménagement urbain : une nécessité

### 15/Fiche 2 : La protection juridique des sols pour préserver les ENAF et favoriser la biodiversité au sein des villes

15/Une protection juridique perfectible

17/L'Obligation réelle environnementale (ORE) au service de la protection des sols vivants

### 18/Fiche 3 : La préservation des sols à l'échelle du territoire

18/La déclinaison du ZAN à l'échelle territoriale

20/Les outils applicables à l'urbanisme

24/Un concept de trame brune très peu mobilisé

25/Conjuguer densité et biodiversité

### 26/Fiche 4 : La préservation des sols dans le cadre d'un projet d'aménagement

26/La phase de diagnostic du projet

29/Les solutions techniques pour réduire les impacts sur les sols

## 34/Chapitre 2 : Comment remettre en état les sols dégradés ?

### 35/Fiche 5 : Comment permettre aux sols dégradés de retrouver certaines fonctions ?

35/Les solutions fondées sur la nature

37/Réhabilitation des friches à risque de pollution

39/Reconstruction de sols fertiles et gestion des terres

42/Des études menées sur la restauration des fonctions des sols

### 44/Fiche 6 : Quelle végétation implanter sur des sols réhabilités ?

46/La nature des sols réhabilités et les contraintes qui en découlent

46/La végétation adaptée

### 47/Fiche 7 : Le cas particulier des friches : reconverter sans évincer la biodiversité

47/La biodiversité (extra)ordinaire des friches

50/Le traitement des friches par des opérations de végétalisation

51/Projet de parc urbain : reconverter les friches en préservant leur biodiversité, exemple du parc Péro à Aubry

52/Outils et subventions pour le recyclage des friches

### 53/Fiche 8 : Quels bénéfices pour la biodiversité ?

53/Comment mesurer les bénéfices pour la biodiversité des sols ?

54/Renaturation de site et création de nouveaux habitats

### 56/Fiche 9 : Des ressources pour aller plus loin

## 58/Glossaire

# INTRODUCTION

Les sols constituent des écosystèmes à part entière peu visibles et donc méconnus. Leur diversité est pourtant importante. Avec 33 grandes familles de types de sols identifiées en France métropolitaine (comme les fluvisols, calcisols, brunisols, etc.)<sup>1</sup>, ils servent d'habitat ponctuel ou permanent à un grand nombre d'organismes vivants : des bactéries, des végétaux, des champignons, des invertébrés, voire des mammifères. Cette biodiversité assure des fonctions qui permettent le maintien de la vie sur Terre. Le sol est présent en quantité limitée, et n'est pas un système renouvelable à l'échelle humaine. Le sol

peut ainsi être détruit en quelques minutes, alors qu'il a pu mettre des milliers d'années à se former.

Ces sols vivants, essentiels, sont depuis de nombreuses années victimes de l'artificialisation et de l'étalement urbain. Chaque année, entre 20 000 et 30 000 ha d'espaces naturels, agricoles et forestiers (ENAF) disparaissent ainsi en France (source : Observatoire de l'artificialisation des sols). Cette consommation d'espace n'est pas uniquement liée à la croissance démographique puisque l'artificialisation des sols progresse 4 fois plus vite.



Visualisation de la consommation d'espace pour la période de 2009 à 2021, Observatoire de l'artificialisation



*Sol d'une friche comportant des matériaux d'origine anthropique © Guillaume Lemoine*

Les impacts sur la biodiversité sont multiples : destruction de certains habitats, disparition progressive d'espèces parfois protégées, fragmentation des milieux entravant ou empêchant le déplacement des espèces... Le changement d'usage des terres est un des 5 facteurs responsables du déclin de la biodiversité identifiés dans le rapport de l'IPBES<sup>2</sup>. L'artificialisation des sols a également un impact significatif sur les êtres humains, notamment dans un contexte de changement climatique. Les surfaces minérales en ville sont à l'origine des îlots de chaleur urbains : des observations ont démontré que les températures des centres urbains sont en moyenne supérieures de 4°C et peuvent atteindre jusqu'à 12°C de plus que les territoires limitrophes. Les sols imperméabilisés ne permettent pas l'infiltration des eaux et amplifient le risque inondation. Le carbone ne peut être stocké, ce qui impacte le bilan des gaz à effet de serre et a un effet sur le changement climatique. Bien d'autres services écosystémiques offerts par les sols vivants sont supprimés par leur urbanisation. L'agriculture, intensive

notamment, a également un impact négatif sur les sols et leur biodiversité (pollution, érosion,...). Le sujet ne sera toutefois pas abordé dans ce guide.

Conscient de l'enjeu, l'Etat souhaite faire aujourd'hui de la lutte contre l'artificialisation des sols une action prioritaire. Pour limiter cette consommation d'espaces, le plan Biodiversité de 2018 comporte un objectif de « Zéro artificialisation nette » qui est précisé au sein de la Loi Climat et Résilience de 2021 et doit être atteint pour 2050. L'étalement urbain doit être désormais évité et des réflexions sont à mener pour trouver des alternatives à l'artificialisation des espaces naturels, agricoles et forestiers : renouvellement urbain, densification, réhabilitation des friches et des bâtiments vacants, etc.

Qu'en est-il pour la biodiversité et les sols urbains ? La ville ne se limite pas à un milieu minéral et abrite des espèces ordinaires et protégées. Des solutions existent pour préserver et renforcer la présence de la nature en ville en conjuguant densité et biodiversité, telles que la

surélévation, les constructions sur pilotis, la réhabilitation de sols dégradés (le génie pédologique et écologique permet à ces sols de retrouver certaines fonctions). Les sols urbains et les sols industriels ont le plus souvent subi des perturbations liés aux activités humaines (présence de remblais, béton, briques ou autres déchets inertes etc.) avec un historique parfois complexe. Ils présentent une hétérogénéité spatiale et peuvent présenter une contamination des sols. Dans ce cas, la gestion des sols pollués nécessite une identification de l'origine et de l'étendue de la pollution ainsi que des mesures dans les milieux d'exposition. La gestion d'un site pollué repose sur la gestion des risques sanitaires et environnementaux en fonction de l'usage des milieux (sol, eau, air).

La séquence ERC (Eviter, Réduire, compenser) est à appliquer au sein de tout projet, en privilégiant l'évitement. Il est possible de préserver l'existant en prenant en compte les sols et la biodiversité dès les phases de conception. Cela demande de travailler différemment et de faire de la biodiversité la ligne conductrice d'un projet et non la variable d'ajustement. C'est notamment le cas dans le cadre de la reconversion des friches. Ces espaces délaissés pendant plusieurs mois ou années sont souvent devenus des refuges pour les espèces. La richesse de ces zones est alors à prendre en compte dans le projet, en premier lieu lors de la dépollution ou la mise en sécurité du site si nécessaire. En présence d'espèces protégées, il s'agit d'une obligation réglementaire.



Organismes du sol © Elie Bardon

<sup>1</sup> Représentation des différents types de sols dominants en France métropolitaine. <https://www.geoportail.gouv.fr/donnees/carte-des-sols>

<sup>2</sup> 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 E.S., 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.

<sup>3</sup> Ademe, Guide de recommandation pour lutter contre l'effet d'îlot de chaleur urbain à destination des collectivités territoriales, 2012

# Ce guide vous propose au travers de 9 fiches de trouver des réponses aux deux questions suivantes :

## **Chapitre 1 : Comment éviter l'artificialisation des sols pour préserver les Espaces Naturels Agricoles et Forestiers (ENAF) et favoriser la biodiversité au sein des villes ?**

Face au déclin de la biodiversité, il est nécessaire de préserver les sols des ENAF et de privilégier le renouvellement urbain et la réhabilitation. Cela implique également de conjuguer densité et biodiversité urbaine en préservant et renforçant les continuités écologiques au sein du tissu urbain lors des projets d'aménagement.

Les fiches suivantes présenteront les enjeux des sols, les outils et les solutions techniques permettant de préserver les sols vivants.

- **Fiche 1 : L'importance de sols dans la préservation de la biodiversité**
- **Fiche 2 : La protection juridique des sols pour préserver les ENAF et favoriser la biodiversité au sein des villes**
- **Fiche 3 : La préservation des sols à l'échelle du territoire**
- **Fiche 4 : La préservation des sols dans le cadre d'un projet d'aménagement**

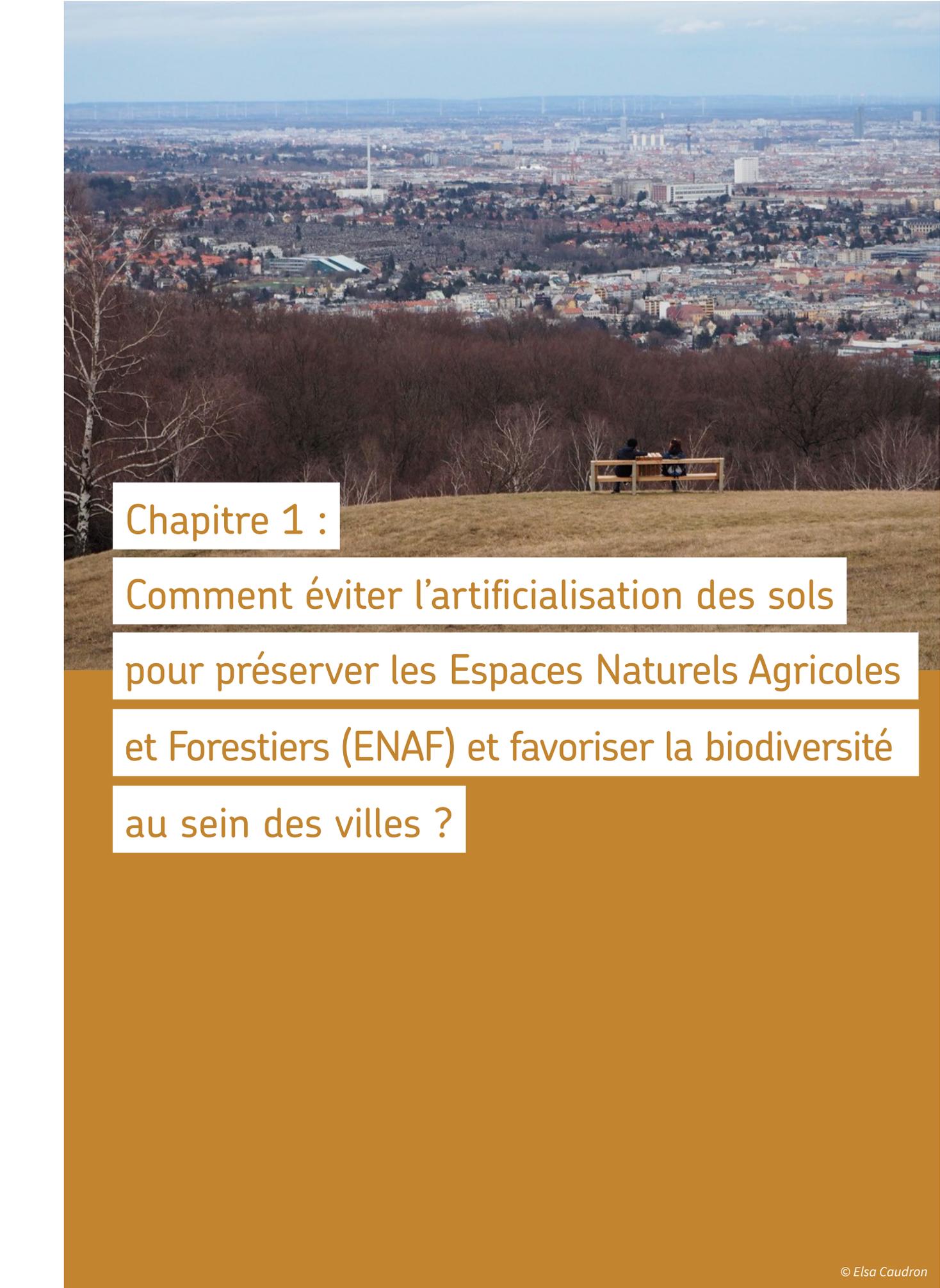
## **Chapitre 2 : Comment remettre en état les sols dégradés ?**

Il est possible de réhabiliter certains sites pollués avec des techniques peu impactantes pour les sols et leur biodiversité, ou bien de permettre à un sol de retrouver une certaine fertilité via un simple amendement organique. Cependant, il est parfois nécessaire de reconstruire le sol lorsqu'il a été fortement dégradé par les activités humaines (fortes teneurs en polluants, compaction, imperméabilisation, présence de très nombreux éléments grossiers), afin de pouvoir à nouveau être colonisé par la faune, la flore et la fonge\*. La formation des sols est un processus long. Les actions mises en œuvre ne permettront pas à un sol dégradé de revenir à son état d'origine mais il sera à nouveau capable d'assurer certaines fonctions.

Les fiches suivantes s'intéressent aux techniques permettant aux sols pollués d'être gérés par des méthodes ayant un moindre impact sur les sols et la biodiversité existante et/ou de recomposer des sols fonctionnels et végétalisés pouvant accueillir les espèces sauvages. Parfois, ne pas agir est aussi une solution pour préserver la biodiversité des friches et espaces délaissés.

- **Fiche 5 : Comment permettre aux sols dégradés de retrouver certaines fonctions ?**
- **Fiche 6 : Quelle végétation implanter sur des sols réhabilités ?**
- **Fiche 7 : Le cas particulier des friches : Reconvertir sans évincer la biodiversité**
- **Fiche 8 : Quels bénéfices pour la biodiversité ?**

**La fiche 9 est consacrée aux ressources consultables pour approfondir les thématiques abordées.**



## Chapitre 1 :

Comment éviter l'artificialisation des sols  
pour préserver les Espaces Naturels Agricoles  
et Forestiers (ENAF) et favoriser la biodiversité  
au sein des villes ?

# Fiche 1 :

## L'importance des sols dans la préservation de la biodiversité

Souvent perçus comme une surface en deux dimensions sur laquelle nous nous déplaçons, les sols sont en réalité des écosystèmes en trois dimensions. Ils sont peuplés d'une multitude d'organismes vivants souvent méconnus et nous apportent de nombreux services écosystémiques.

### Qu'est-ce qu'un sol ?

#### Définition officielle

La définition officielle du sol a été formulée par l'Association Française pour l'Etude des Sols :

« Le sol est un volume qui s'étend depuis la surface de la Terre jusqu'à une profondeur marquée par l'apparition d'une roche dure ou meuble, peu altérée, ou peu marquée par la pédogenèse. L'épaisseur du sol peut varier de quelques centimètres à quelques dizaines de mètres, ou plus. Il constitue, localement, une partie de la couverture

*pédologique qui s'étend à l'ensemble de la surface de la Terre. Il comporte le plus souvent plusieurs horizons correspondant à une organisation des constituants organiques et/ou minéraux (la terre). Cette organisation est le résultat de la pédogenèse et de l'altération du matériau parental. Il est le lieu d'une intense activité biologique (racines, faune et micro-organismes). »*

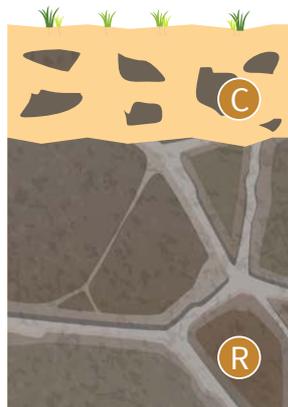
#### Des sols issus d'un processus long

Les sols sont issus d'un processus de formation appelé la pédogenèse. La roche mère, qui est la couche minérale superficielle de la croûte terrestre, subit des altérations physiques et chimiques. L'action du gel, du vent et des pluies va fractionner la roche-mère. Sur le substrat ainsi formé, vont se développer des végétaux pionniers. Des micro-organismes et une faune du sol, appelée pédofaune, vont également s'installer, permettant la décomposition de la matière organique et la création d'un horizon humifère. C'est le phénomène de lixiviation, lorsque les éléments

chimiques solubles dans l'eau vont être entraînés plus en profondeur, qui va ensuite générer les différents horizons. En France, la profondeur des sols, c'est-à-dire de la surface jusqu'à l'apparition de la roche-mère non altérée, peut varier de quelques mètres à quelques centimètres. Sous nos climats européens, les sols mettent en moyenne 10 000 ans pour se former. Les sols ne se régénèrent pas rapidement une fois décapés, ils constituent une ressource non renouvelable à l'échelle humaine. Il est donc essentiel de les préserver.



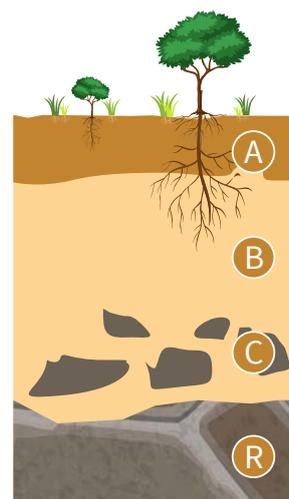
**Roche mère (R)**  
colonisée par des végétaux pionniers



**Formation d'un horizon d'altération (C)**  
et développement de la végétation



**Formation d'un horizon humifère (A)**  
proche de la surface



**Formation de nouveaux horizons (B)**  
et approfondissement

≈ 10 000 ans

A : Horizon Humifère • B : Nouveaux horizons • C : Horizon d'altération • R : Roche mère

Le processus de pédogenèse



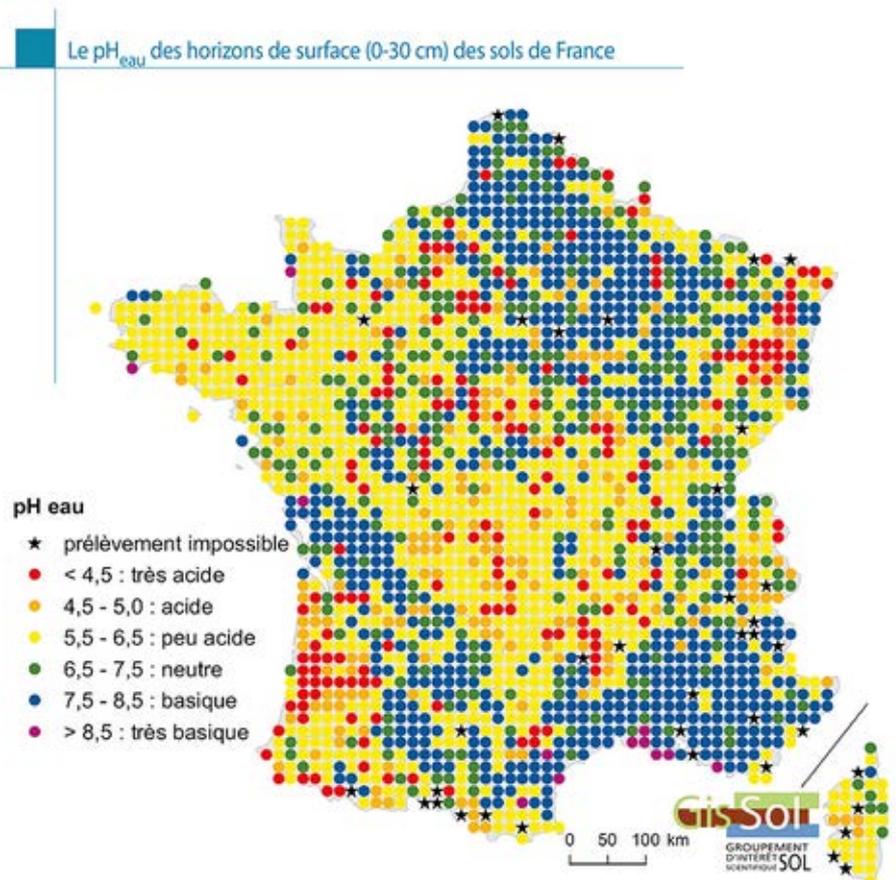
Fosse pédologique permettant de voir les différents horizons du sol

## Sols et biodiversité

### Caractéristiques des sols et végétation

Le climat est le principal déterminant de la distribution des communautés végétales. Cependant à l'échelle locale, ce sont les sols qui, en fonction de leurs caractéristiques, vont jouer un rôle sur le développement de certaines espèces végétales plutôt que d'autres. Ces caractéristiques peuvent être notamment :

- Le pH : les sols sont plutôt acides, neutres ou basiques, ce qui dépend en premier lieu des caractéristiques de la roche mère (la végétation peut également impacter le pH des sols). Par exemple, les pelouses calcicoles (composées d'espèces telles que le Polygale du calcaire ou l'Ophrys mouche) se développent sur des sols issus d'une roche-mère calcaire et qui sont de fait basiques. Dans les Vosges, la présence de granit génère des sols acides propices aux landes acidiphiles (composées d'espèces telles que la Myrtille ou la Callune vulgaire). Dans le sud de la France, sur le pourtour méditerranéen, deux formations végétales sont observables : le maquis, qui se forme sur sols acides, et la garrigue, qui pousse sur sols calcaires.



Source : Gis Sol, RMQS, 2011.

- L'hydromorphie : elle correspond à la qualité d'un sol qui montre des marques physiques de saturation régulière en eau. En effet, l'eau peut être présente dans les sols de façon temporaire ou permanente, formant alors des milieux humides avec des espèces végétales hygrophiles comme le Jonc diffus. Au contraire, les sols sont parfois drainants et très secs. Ce sont des espèces dites xérophytes, adaptées au manque d'eau qui se développent, comme par exemple le Nombriil de Vénus.



Prairie colonisée par des joncs traduisant la présence d'une zone humide © Maëva Felten



Sol calcaire et sec sur lequel se développe une garrigue comportant des espèces rares comme le Genêt de Villars (*Genista pulchella villarsii*) © Maëva Felten

- La texture : Il s'agit de la répartition granulométrique des constituants d'un sol, soit la proportion entre les petites particules, les argiles, les particules de taille moyenne, les limons et celles de grande taille, les sables. La texture d'un sol (et ce qu'elle implique, sol drainant ou imperméable par exemple) sélectionne également une flore particulière. Par exemple, les dunes sont formées de sols sableux qui sont érosifs. L'ancrage des plantes y est plus difficile. L'Oyat présente un ensemble racinaire pivotant très profond qui lui permet de s'ancrer dans le substrat sableux.

Les sols et leurs communautés végétales spécifiques constituent des habitats. Ils abritent une faune, voire une fonge, qui leur sont associées. Un sol qui paraît peu épais et pauvre peut accueillir des espèces rares caractéristiques de milieux très contraints. **La diversité des sols avec leurs caractéristiques propres est une richesse à préserver.**

## Une biodiversité des sols méconnue

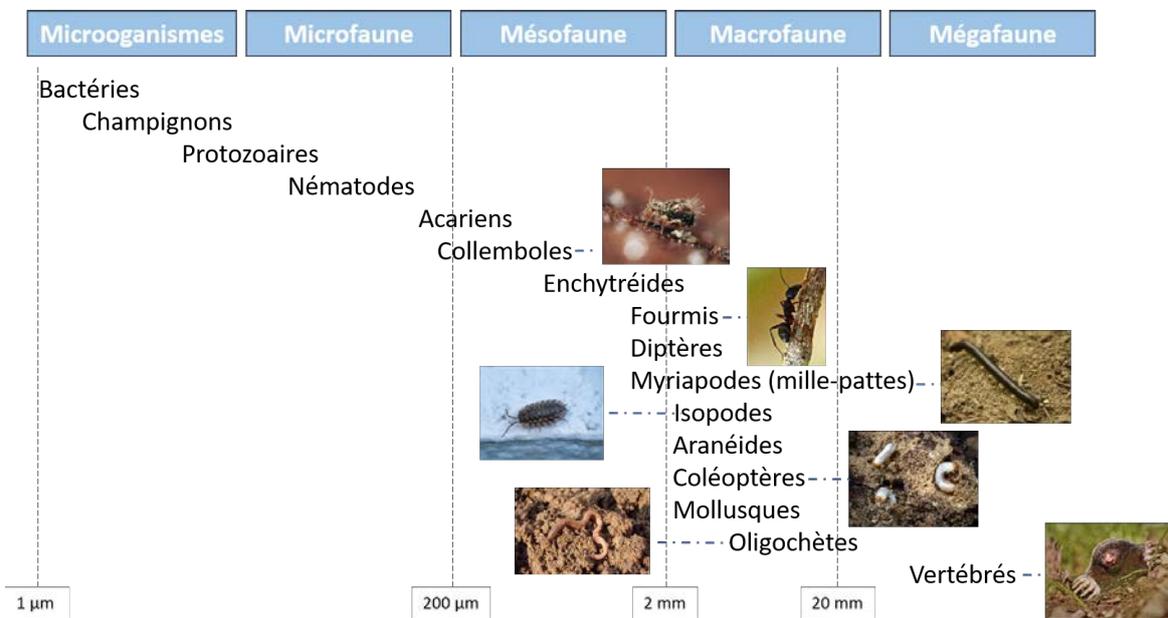
Les sols accueillent une biodiversité bien visible avec la flore, la faune et la fonge terrestres observables à leurs surfaces mais ils abritent également en profondeur (principalement dans les 20 premiers centimètres) des êtres vivants méconnus mais indispensables. La biodiversité des sols représente 26% des espèces vivantes connues (contre 13% pour les océans), sans compter les organismes qui se développent en partie au-dessus, comme les plantes<sup>4</sup>. Les sols et leurs surfaces sont colonisés par des bactéries, des champignons et une faune spécifique appelée pédofaune (des invertébrés mais pas uniquement). Ces êtres vivants peuvent être visibles ou non à l'œil nu, allant de quelques micromètres pour les microorganismes, comme les bactéries, à plusieurs millimètres pour la macrofaune (par exemple : des collemboles, des acariens...) voire plusieurs centimètres pour la mégafaune (par exemple : vers de terre, taupe...).

Certains organismes sont présents à la surface du sol, dans la litière en décomposition, comme les collemboles, le cloporte (un crustacé terrestre) ou bien le carabe qui est un coléoptère. D'autres invertébrés se déplacent entre la surface et les premiers horizons, comme certaines espèces de vers de terre (les anéciques\*), quand d'autres restent dans les profondeurs. Des espèces réalisent une partie de leur cycle biologique dans le sol. C'est le cas, par exemple, du Hanneton des jardins, des tipules (les cousins) ou bien de certains papillons comme l'Azuré du serpolet.

<sup>4</sup>Selosse, M.A., *L'origine du monde, une histoire naturelle du sol à l'intention de ceux qui le piétinent*, 2021

### Quelques chiffres :

- De 10 millions à 10 milliards de bactéries dans 1 g de sol (source : LAMS)
- 260 millions d'individus par m<sup>2</sup> en prairie (source : Daniel Cluzeau/CNRS)
- Biomasse des organismes du sol estimée à 1,5 tonne par ha de prairie (source : Daniel Cluzeau/CNRS)

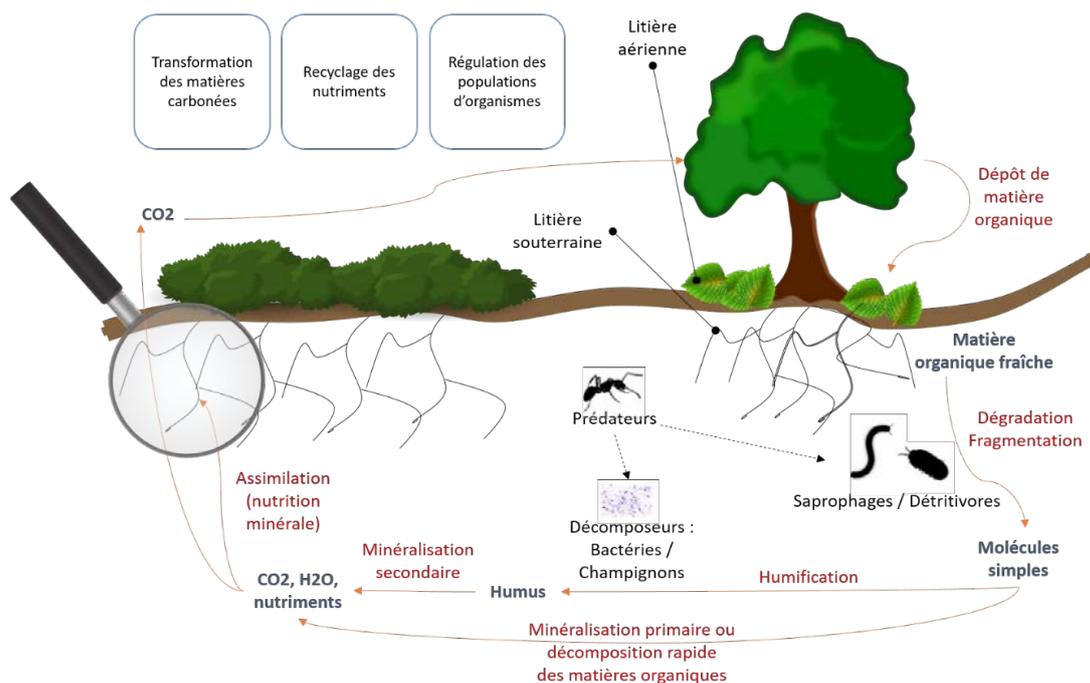


## Réalisation de fonctions écologiques essentielles

La biodiversité du sol joue des rôles fondamentaux pour le maintien des écosystèmes. Elle assure notamment 4 fonctions écologiques essentielles<sup>5</sup> :

- La transformation des matières carbonées : Les organismes des sols sont responsables des différentes étapes de transformation et de l'enfouissement des matières carbonées dans les horizons organo-minéraux et de la formation d'humus<sup>6</sup> ;
- Le recyclage des nutriments : les organismes des sols jouent un rôle dans le recyclage et la disponibilité des éléments nutritifs. Ce sont les multiples interactions entre les organismes des sols qui favorisent le recyclage des biomasses végétales et animales restituées au sol ;
- La régulation des populations d'organismes, il peut s'agir :
  - > de stimulation : par exemple, la métaphore des belles au bois dormant est utilisée lorsque le ver de terre ingère des bactéries et les active lors de leur passage dans le tube digestif, améliorant la décomposition de la matière organique<sup>7</sup> ;
  - > de prédation : les carabes régulent les populations d'invertébrés, certains collembolés consomment des bactéries et des champignons...
- Le maintien de la structure des sols : Certains organismes sont de véritables ingénieurs du sol. Par exemple, les vers de terre forment des agrégats\* et permettent le transport et la redistribution de la matière organique à travers les horizons minéraux du sol. Ils créent des galeries, décompactent les sols et permettent ainsi la circulation de l'eau.

Les organismes du sol réalisent donc des fonctions écologiques essentielles à la vie sur terre.



<sup>5</sup> Kibblewhite M.G., Ritz K., Swift M.J., 2008 - Soil health in agricultural systems. *Philosophical Transactions of the Royal Society B-Biological Sciences*, 363, pp. 685-701.

<sup>6</sup> Blanchart E. et Jean Trap J. - 2020 - Intensifier les fonctions écologiques du sol pour fournir durablement des services écosystémiques en agriculture, *Etude et Gestion des Sols*, 27, 121-134, <sup>7</sup>Lavelle P. (1996) Diversity of soil fauna and ecosystem function. *Biology International*, 33,3-16

# Préserver les sols vivants dans l'aménagement urbain : une nécessité

## Des services écosystémiques rendus par les sols vivants

Les écosystèmes, via les organismes et l'environnement qui les composent ainsi que leurs interactions, assurent la réalisation de fonctions écologiques. Celles-ci sont à l'origine de services écosystémiques, c'est-à-dire de bénéfices pour les êtres humains. Les sols vivants participent ainsi :

- Au recyclage des matières organiques ;
- A la régulation du climat par le stockage du carbone ;
- A la régulation de l'effet d'îlot de chaleur urbain en permettant la croissance des plantes et donc les phénomènes d'ombrage et d'évapo-transpiration ;
- A la régulation des inondations en permettant à l'eau de s'infiltrer ou bien d'être stockée ;
- A la production d'eau potable en permettant à l'eau d'alimenter les aquifères\* ;
- A l'épuration des eaux par filtration des contaminants et leur traitement par les plantes et les organismes des sols ;
- A la production de biomasse, de nourriture ou de matériaux ;
- A la production de composants pharmaceutiques.

## Une artificialisation préjudiciable pour la biodiversité (êtres humains compris)

Les sols vivants sont victimes de l'urbanisation et de l'artificialisation progressive des sols naturels, agricoles et forestiers. Chaque année, ce sont entre 20 000 et 30 000 ha qui sont artificialisés. D'après la Loi Climat et Résilience du 22 août 2021, « l'artificialisation d'un sol correspond à une 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. » (Article L. 101-2-1 du Code de l'Urbanisme). L'état d'un sol dégradé (minéralisé, constitué de remblais, pollué, etc.), peut être amélioré parfois en apportant simplement un amendement organique. Dans d'autres cas, des actions de génie pédologique et de dépollution seront nécessaires pour que le sol récupère certaines de ces fonctions écologiques. Ces opérations représentent un coût conséquent. Dans le cadre de projets d'aménagement urbain futurs, un sol fonctionnel préservé est un sol qui ne sera pas à réhabiliter pour lutter contre les effets du changement climatique (ruissellement, îlot de chaleur urbain, etc.).

L'urbanisation génère une anthropisation (degré de modifications causées par des actions anthropiques) plus ou moins forte des sols naturels en place. Les sols peuvent par exemple être décapés, remblayés, compactés voire imperméabilisés sur de grandes surfaces, impactant ainsi les habitats et les espèces. L'urbanisation génère également une fragmentation des milieux naturels. Le bâti, les infrastructures de transport, les surfaces minéralisées constituent autant d'obstacles plus ou moins franchissables pour la faune et la flore, isolant plus ou



*Des sols fortement modifiés sous les enrobés © Maëva Felten*

moins fortement les habitats les uns des autres. Or, les espèces ont besoin de se déplacer pour réaliser l'ensemble de leur cycle de vie, pour trouver des zones d'alimentation et de repos mais aussi pour se reproduire. Le brassage génétique entre populations est nécessaire pour générer de la diversité et assurer la pérennité d'une espèce. Qu'en est-il pour les organismes du sol qui se déplacent uniquement dans cet écosystème, qui ne possèdent pas d'ailes une fois adulte ou bien dont les appendices sont absents ou très réduits ? Deux facteurs sont susceptibles d'impacter la

biodiversité des sols : l'anthropisation et l'isolement des sols. Par exemple, il a été démontré<sup>5</sup> que les communautés lombriciennes réagissent significativement au degré d'anthropisation causé par les pratiques d'ingénierie pédologique, en interaction avec le degré d'isolement des sols par rapport à un potentiel réservoir (voir fiche 7). Notamment, l'abondance en vers de terre et la richesse spécifique est plus faible au sein de sols fortement anthropisés (Anthroposols\* reconstitués sur 1,50 m de profondeur) en situation d'isolement total (entre deux routes) qu'en situation d'isolement partiel (connexion avec un sol naturel réservoir).

En impactant l'écosystème sol, l'artificialisation nuit également aux êtres humains puisque les fonctions écologiques sont altérées et les services écosystémiques ne peuvent plus être rendus correctement, notamment :

- Le carbone ne peut être stocké dans le sol ce qui a un effet sur le bilan des gaz à effet de serre et donc sur le

changement climatique. Par ailleurs, lorsque des sols sont artificialisés, le processus de décapage, soit le fait d'enlever les premières couches du sol, implique un fort déstockage ;

- Les risques inondation sont amplifiés : les surfaces imperméables engendrent des phénomènes de ruissellement et d'inondation ;
- Les risques de pollution des eaux sont également amplifiés : les eaux de pluie ruisselant sur les surfaces imperméabilisées peuvent se charger en polluants ;
- Les surfaces minéralisées créent des îlots de chaleur urbain.

La réduction progressive des sols vivants a donc un fort impact négatif sur la biodiversité, sur le climat et sur la vie terrestre.



Racines et organismes du sol © Adobe Stock

<sup>5</sup> Maréchal, J. 2022. « Sols fertiles et Trame Brune en milieu urbain : Impacts de l'ingénierie pédologique sur les sols et les communautés lombriciennes ». Thèse CIFRE (Université de Rennes 1 / Sol Paysage) spécialité écologie.

## Fiche 2 :

# La protection juridique des sols pour préserver les ENAF et favoriser la biodiversité au sein des villes

La protection juridique peut représenter un levier important pour éviter l'artificialisation des sols, et notamment des Espaces Naturels, Agricoles et Forestiers (ENAF), et favoriser ainsi la biodiversité au sein des villes. Cependant, cette protection juridique semble encore perfectible, même si certains outils existants pourraient être utilisés de manière plus affirmée pour protéger les ENAF et les espaces de nature en ville (parcs et jardins notamment) de l'artificialisation.

## Une protection juridique perfectible

En droit français, le sol est connu depuis longtemps à travers de multiples approches quantitatives, sans pour autant lui reconnaître une existence comme milieu physique naturel au même titre que l'eau (articles L.210-1 du Code de l'Environnement) ou que l'atmosphère (articles L.220-1 à L.229-69 du Code de l'Environnement). Ces approches quantitatives se traduisent par différentes notions du sol :

- Le sol support de construction dans le droit de l'urbanisme,
- Le sol support agronomique dans le droit rural,
- Le sol pollué source d'atteinte à la santé de l'être humain dans le droit de l'environnement.

C'est à partir de ces conceptions du sol que la protection des espaces et de la biodiversité a été développée. Ainsi, il existe, à travers la législation, différents mécanismes de protection des sols (réserves et parcs naturels, sites classés et inscrits, arrêtés de protection de biotope ou encore les espaces naturels sensibles pour en citer quelques-uns). Toutefois, cette multitude d'outils n'a réussi qu'à protéger 30% des espaces naturels sur le territoire métropolitain. La loi n° 2021-1104 du 22 août 2021, dite loi Climat et résilience, apporte deux éléments conséquents en matière de protection des sols :

- La proclamation du ZAN (voir fiche 3)
- Une nouvelle approche juridique du sol qui pourrait tendre vers une protection plus effective des sols.

Cette loi introduit une nouvelle approche juridique du sol, à mi-chemin entre :

- Le quantitatif : « L'artificialisation nette des sols est définie comme le solde de l'artificialisation et de la renaturation des sols



Sols, support de construction © Pixabay

constatées sur un périmètre et sur une période donnés. » (article L.101-2-1 du Code de l'urbanisme). Cette approche est donc une approche « mathématique » de la préservation des sols.

### Et

- Le qualitatif : « L'artificialisation est définie comme 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. » (article L.101-2-1 du Code de l'urbanisme)

« La renaturation d'un sol, ou désartificialisation, consiste en des 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. » (article L.101-2-1 du Code de l'urbanisme)

C'est la première fois que le droit aborde le sol sous l'angle de ses fonctions écologiques et donc de sa qualité.

<sup>5</sup> INPN, « Synthèse de données pour les espaces protégés », en ligne : <https://inpn.mnhn.fr/espace/protege/stats>

La reconnaissance de la multifonctionnalité des sols se décline dans un certain nombre de dispositifs qui visent à limiter leur artificialisation : objectifs chiffrés de réduction dans les documents de planification, étude de densité en amont des projets, élargissement de l'obligation de coefficient de biotope, interdiction de nouvelles zones commerciales. Chacun de ces dispositifs comporte toutefois des limites. Ainsi, la Loi Climat dispose un nouveau principe législatif : toute autorisation d'exploitation commerciale (implantation ou extension d'une surface de vente) engendrant une artificialisation des sols ne pourra être délivrée. Cette disposition, qui ne s'applique

pas de la même manière selon l'ampleur des projets, pose une interdiction de principe forte. Cependant, elle est assortie de nombreuses exclusions qui en affaiblissent sa portée, notamment l'exclusion des entrepôts de stockage de marchandises puisqu'ils ne possèdent pas de surface de vente. Or, les entrepôts ou plateformes logistiques d'au moins 5 000m<sup>2</sup> représentent 78 millions de m<sup>2</sup>, soit la superficie de la ville de Strasbourg, sur l'ensemble du territoire français (Statistiques du MTE, 2018).



Sols, support d'agriculture © Pixabay



Sol pollué © Pixabay

## L'Obligation réelle environnementale (ORE) au service de la protection des sols vivants

La loi pour la reconquête de la biodiversité, de la nature et des paysages (août 2016) a créé un nouvel outil juridique, permettant aux propriétaires fonciers de faire naître sur leur terrain des obligations durables de protection de l'environnement. Codifiées à l'article L. 132-3 du code de l'environnement, les obligations réelles environnementales (ORE) sont inscrites dans un contrat au terme duquel le propriétaire d'un bien immobilier met en place une protection environnementale attachée à son bien, pour une durée pouvant aller jusqu'à 99 ans. L'ORE est conclue entre le propriétaire du bien et 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. Les obligations étant attachées au bien, elles perdurent même en cas de changement de propriétaire. La finalité du contrat doit être le maintien, la conservation, la gestion ou la restauration d'éléments de la biodiversité ou de services écosystémiques. A la lecture de la finalité de l'ORE, il apparaît que l'approche du sol par le biais de ses fonctions écologiques, dont découlent les services écosystémiques, pourrait permettre d'utiliser l'ORE pour inscrire une obligation de préservation des « sols vivants » sur une parcelle. Cette obligation contractuelle pourrait aussi être étendue à l'obligation de recréer des « sols vivants » sur la parcelle.

### Retour d'expérience : ORE avec le CEN Rhône Alpes

En septembre 2020, le Conservatoire d'Espaces Naturels Rhône-Alpes a conclu une ORE avec un couple de propriétaires privés à Saint-Cyr-sur-le-Rhône (69). L'établissement de cette ORE permet notamment la protection d'une prairie sèche, habitat naturel remarquable. Le CEN réalisera, dans le cadre de cette ORE, toutes les mesures de conservation de la biodiversité. En contrepartie, les propriétaires s'engagent à ne pas modifier les caractéristiques naturelles du terrain et porter atteinte aux espèces.



Pelouse sèche © Lola Boile

## Fiche 3 :

# La préservation des sols à l'échelle du territoire

Depuis la loi relative à la solidarité et au renouvellement urbain (SRU) de décembre 2000, la maîtrise du développement urbain et son renouvellement est devenu un des axes principaux de la politique d'urbanisme française. Ce principe a véritablement été renforcé en 2021 avec la promotion par la loi Climat et résilience de l'objectif Zéro Artificialisation Nette (ZAN). Avec une consommation alarmante des ENAF, l'échelle la plus pertinente pour limiter voire stopper ce phénomène s'avère être celle des territoires. Ainsi, les élus locaux vont jouer un rôle clé dans l'application de cette nouvelle stratégie notamment grâce aux outils disponibles en matière d'urbanisme et de planification.

## La déclinaison du ZAN à l'échelle territoriale

Objectif affirmé dès 2018, le ZAN a reçu une consécration législative avec la loi Climat et résilience. Cet objectif ZAN vise l'atteinte d'un équilibre entre surfaces artificialisées et surfaces renaturées en 2050 sur tout le territoire français. Autrement dit, si on artificialise, on renature en compensation. Pour ce faire, le législateur vise un objectif, pour l'horizon 2031, d'une réduction par deux de la consommation d'espaces naturels, agricoles et forestiers par rapport aux dix dernières années (2011-2021). Pour l'atteindre, l'échelle territoriale est la plus

pertinente du fait des compétences des collectivités territoriales en matière de politique d'aménagement. Le législateur a reconnu le rôle conséquent des élus locaux à travers une logique d'entonnoir à trois échelons avec l'établissement d'une stratégie ZAN à l'échelle régionale, déclinée à l'échelle d'un territoire couvert par un SCOT et mise en œuvre par la collectivité compétente en matière d'urbanisme.

### Une stratégie développée à l'échelle régionale

Etablie cheffe de file pour développer une stratégie d'aménagement territorial depuis 2014, la Région va jouer un rôle premier en matière de déclinaison de l'objectif ZAN. Effectivement, les régions doivent élaborer un schéma régional d'aménagement, de développement durable et d'égalité des territoires (SRADDET). Dans ce schéma, vont devoir être fixés des objectifs de moyen et long terme en matière d'artificialisation des sols (article L4251-1 du code général des collectivités territoriales, CGCT). Ces objectifs seront d'abord traduits à travers une trajectoire, définie pour le territoire, pour aboutir à l'absence d'artificialisation des sols. Puis par tranches de dix ans, un objectif de réduction du rythme de l'artificialisation devra être fixé. L'objectif de première tranche doit se baser sur l'objectif légal soit une réduction

par deux de l'artificialisation par rapport à celle observée sur les dix dernières années (de 2011 à 2021). La définition des objectifs passe par un dialogue entre élus régionaux et élus locaux lors de la conférence des schémas de cohérence territoriale (organe de dialogue créé par la loi). La définition de la stratégie ZAN est aussi prévue dans les documents de planification des régions à statut particulier (Ile de France, Corse, Outre-Mer). La définition de la stratégie ZAN au niveau régional doit être réalisée au plus tard au 24 février 2024. Afin d'être atteint, les objectifs fixés par le SRADDET doivent faire l'objet de mesures de suivi et d'observation. Une fois inscrits, ces objectifs par tranche de réduction de l'artificialisation des sols doivent être déclinés à l'échelle infrarégionale.



## Une déclinaison à l'échelle d'un territoire couvert par un SCOT

Au niveau du territoire, la stratégie est déclinée sur un territoire de projet ou un bassin de vie avec une inscription du ZAN dans les SCOT au plus tard au 22 août 2026. Le projet d'aménagement et de développement durable (PADD), document programmatique du SCOT, doit comporter une déclinaison adaptée au territoire couvert par le SCOT des objectifs fixés à l'échelle régionale. Cette déclinaison s'appuie sur la synthèse du diagnostic territorial prévue pour la réalisation du PADD (article L141-3 du code de l'urbanisme). Ces objectifs, fixés pour le territoire, peuvent être aussi adaptés et répartis par secteurs géographiques dans la partie réglementaire du SCOT, dénommée le document d'orientation et d'objectifs (DOO). Ainsi, une ou plusieurs communes peuvent avoir un objectif de réduction de l'artificialisation différents d'autres parties du territoire en fonction notamment des besoins du territoire en matière de logement et

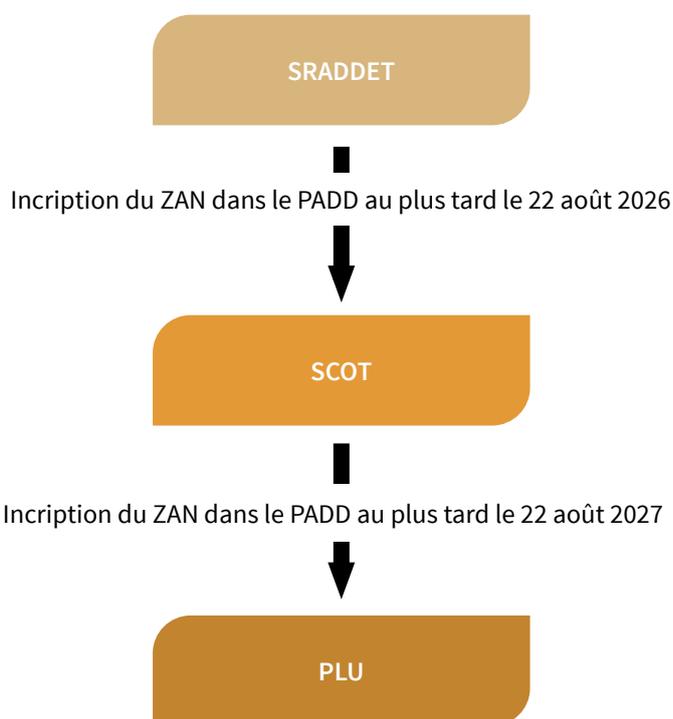
d'implantation d'activités économiques, du potentiel foncier mobilisable dans les espaces déjà artificialisés ou encore des efforts déjà réalisés en matière de gestion économe de l'espace. Afin d'atteindre l'objectif ZAN sur le territoire couvert par le SCOT, il doit aussi être défini dans le DOO :

- Les orientations en matière de préservation des paysages, des ENAF ainsi que des espaces urbains,
- Les conditions de protection d'espaces nécessaires au maintien de la biodiversité avec la possibilité d'identification de zones préférentielles à renaturer (voir fiche 2).

Une fois la stratégie fixée, les collectivités compétentes en matière de PLU vont assurer sa mise en œuvre.

## Une mise en œuvre par la collectivité compétente en matière d'urbanisme

La mise en œuvre de la stratégie ZAN définie pour le territoire va véritablement être mise en œuvre à travers la planification de l'urbanisme au niveau local. Effectivement, le rapport de présentation du PLU doit obligatoirement analyser la consommation des ENAF au cours des dix dernières années précédant l'arrêt du projet de PLU ou depuis sa dernière révision. Il doit exposer le dispositif prévu pour lutter contre l'artificialisation et justifier les objectifs chiffrés prévus dans le PADD. A ce titre, le PADD du PLU qu'il soit communal ou intercommunal doit comporter, au plus tard au 22 août 2027, des objectifs chiffrés de modération de la consommation de l'espace et de lutte contre l'étalement urbain (article L.151-5 du code de l'urbanisme). Dans le cas d'une commune seulement couverte par une carte communale, celle-ci doit permettre d'atteindre les objectifs de réduction de l'artificialisation des sols déterminés par le SCOT ou le cas échéant à l'échelle régionale. Pour assurer la réalisation des objectifs fixés, le maire (en cas de PLU) ou le président de l'intercommunalité (en cas de PLUi) devra, tous les trois ans, présenter à l'assemblée délibérante un rapport relatif à l'artificialisation des sols et sa diminution. Ce rapport fera ensuite l'objet d'un débat et d'un vote. Afin d'atteindre les objectifs ZAN, l'échelon local pourra aussi intervenir grâce aux outils généraux du droit de l'urbanisme et aux mécanismes spécifiques introduits par la loi Climat Résilience.



# Les outils applicables à l'urbanisme

L'échelon local dispose d'un rôle central en tant qu'autorité compétente en matière d'autorisation d'urbanisme et premier acteur de la politique d'aménagement d'un territoire. Dans le cadre de l'objectif ZAN, les élus locaux peuvent utiliser une multitude d'outils à leur disposition.

## Les outils classiques de l'urbanisme

La planification joue un rôle essentiel dans l'aménagement et le développement du territoire. Son implication dans la réduction de l'artificialisation est donc plus qu'évidente.

La collectivité territoriale compétente en matière de PLU(i) dispose de plusieurs leviers pour lutter contre l'artificialisation (affectation des sols, caractéristiques du bâti et densité).

Un PLU(i) se compose de plusieurs pièces :

- Le rapport de présentation qui comporte le diagnostic du territoire, l'état initial de l'environnement et la justification des choix ;
- Le Projet d'Aménagement et de Développement Durable (PADD) qui présente les orientations en termes

de développement urbanistique, mais aussi économique, social et environnemental pour la collectivité sur les années à venir ;

- Les Orientations d'Aménagement et de Programmation (OAP) qui expriment de manière qualitative les ambitions et la stratégie d'une collectivité territoriale en termes d'aménagement ;
- Le Règlement, partie réglementaire du PLU(i), définit les règles d'urbanisation notamment à travers le plan de zonage et sa représentation graphique ;
- Les annexes reprennent les éléments à prendre en compte en matière d'aménagement.



Zone humide dans un quartier © Adobe Stock

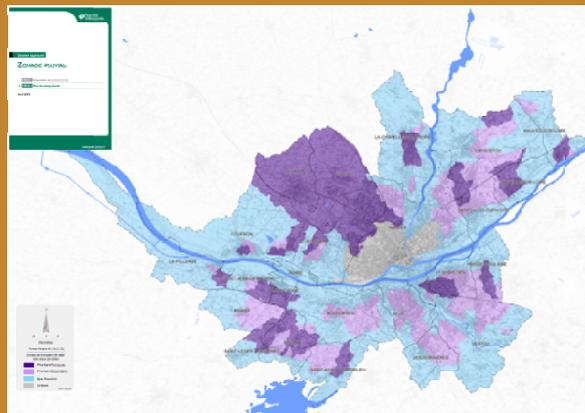
## Limiter l'urbanisation par l'affectation des sols

C'est d'abord à travers l'affectation des sols que la planification urbaine vient limiter l'artificialisation. Il est donc important que les élus fassent de la préservation des ENAF une priorité du mandat et n'acceptent pas de déclassement de zones naturelles, agricoles ou forestières. Pour cela, le renouvellement urbain et la densification sont à privilégier. Le droit de préemption urbain peut d'ailleurs être utilisé en matière de renouvellement urbain. Les élus locaux devront donc trouver l'équilibre entre une urbanisation des dents creuses (espace non bâti de surface réduite entouré de parcelles urbanisées) et la préservation d'ENAF au sein du territoire. Pour autant, dans le règlement du PLU(i), les ENAF doivent être strictement protégés afin de limiter toute extension urbaine. Si les terrains agricoles, naturels et forestiers sont par principe inconstructibles, le PLU(i) peut instaurer des secteurs de taille et de capacité limités (STECAL) afin d'autoriser des constructions à usage d'habitation par exemple sur une partie limitée du terrain. A ce titre, le règlement du PLU(i) peut totalement interdire ce genre d'opération pour préserver les espaces classés en N, A ou F. S'il est de la volonté de l'organe délibérant d'en instituer, il est alors possible de limiter les STECAL sur les espaces déjà urbanisés afin de faire du renouvellement urbain.

Afin de limiter l'artificialisation des sols, les espaces boisés (bois, forêts, haies, arbres d'alignements) en ville doivent être protégés. Pour cela, le PLU(i) peut identifier des espaces boisés classés. Grâce à ce classement, ces éléments de végétation seront strictement protégés et ne pourront être détruits. Les prescriptions d'urbanisme permettent également d'identifier graphiquement d'autres éléments de nature et d'y associer un règlement afin de les préserver comme : les zones humides potentielles et avérées, les cœurs d'îlot, les parcs et jardins, les franges agricoles et paysagères, etc. En outre, l'outil des trames vertes et bleues peut être utilisé afin de préserver les continuités écologiques. Le PLU(i) peut identifier et protéger tout espace non bâti et éléments de paysages assurant ces continuités (réservoirs et corridors). Ces espaces pourront être définis comme inconstructibles. Les OAP thématiques pour la trame verte et bleue permettent d'édicter des principes applicables sur l'ensemble du territoire et des autorisations d'urbanisme. Il est alors possible de donner des orientations afin de préserver les sols vivants.

Les collectivités disposent d'un autre outil pertinent en matière d'affectation des sols, l'emplacement réservé. Effectivement, il peut être instauré, dans le PLU(i), un ou plusieurs emplacements réservés en vue de préserver des espaces verts ou les continuités écologiques. Cet

## Retour d'expérience : la métropole de Nantes (44)



© Zonage pluvial, PLU métropolitain Nantes Métropole

Dans son PLU métropolitain, Nantes a fait de la préservation des ENAF une priorité afin de préserver une biodiversité très riche et une agriculture très ancrée.

Pour ce faire, le PLU métropolitain ne prévoit aucun secteur de taille et de capacité limitée. Tout espace boisé, bois, forêts, haies, alignements d'arbres et parcs à protéger sont classés en espace boisé classé. Le zonage pluvial a été aussi utilisé pour réduire l'imperméabilisation des sols et pour préserver les milieux aquatiques.

outil permet, pour la collectivité, d'instaurer une servitude limitant la constructibilité de la zone et ainsi de limiter une artificialisation des sols. Les élus locaux peuvent aussi agir à travers le zonage pluvial. Intégré au PLU, ce zonage permet notamment de délimiter des zones où des mesures doivent être prises pour limiter l'imperméabilisation des sols. Enfin, créé en 2014 par la loi Alur, le coefficient de biotope par surface (CBS) permet aux collectivités d'imposer dans le règlement de leur PLU(i) une proportion de surface favorable à la biodiversité (surfaces dites éco-aménageables). Toutefois, ce coefficient de biotope par surface ne permet pas en l'état de valoriser la préservation des sols vivants. En revanche, le coefficient de pleine terre, même si la définition de cette dernière est variable en fonction des PLU(i), est un outil du règlement imposant de conserver un certain pourcentage de surface non minéralisée.

Le projet MUSE, piloté par le Cerema et financé par l'ADEME, propose une démarche pour renseigner et cartographier à l'échelle du PLU(i) la multifonctionnalité potentielle des sols, pour les zones non urbaines, et la

capacité potentielle d'un sol à exercer des fonctions, pour les zones urbaines<sup>1</sup>. Cette approche fournit un porter à connaissance qui permet aux collectivités de questionner leur projet aux différentes étapes d'élaboration d'un PLUi. La méthode MUSE permet d'intégrer la qualité des sols par la prise en compte de quatre fonctions du sol (source de biomasse, régulation du cycle de l'eau, réservoir de carbone, réservoir de biodiversité) dans les démarches de PLUi mais aussi dans les SCoT.

### **Limiter l'urbanisation en réglementant le bâti et sa densité**

Pour atteindre l'objectif ZAN, réglementer les dimensions du bâti peut être judicieux. Dans un contexte de reconstruction de la ville sur la ville, les règles de dimensions fixées dans le règlement du PLU(i) sont à revoir à la hausse. A ce titre, augmenter la hauteur des bâtiments afin d'éviter de nouvelles constructions sur des espaces non urbanisés est nécessaire. Pour ce faire, il peut être prévu dans le PLU(i) une hauteur minimale des futures constructions (article L.151-18 et R151-9 du code de l'urbanisme). Cette règle peut d'ailleurs être sectorisée sur la base du mécanisme prévu à l'article L151-28 du code de l'urbanisme. Pour des secteurs en zone urbaine où des constructions d'habitations sont prévues, le PLU(i) peut prévoir un dépassement des règles de hauteur des constructions. Ce dépassement

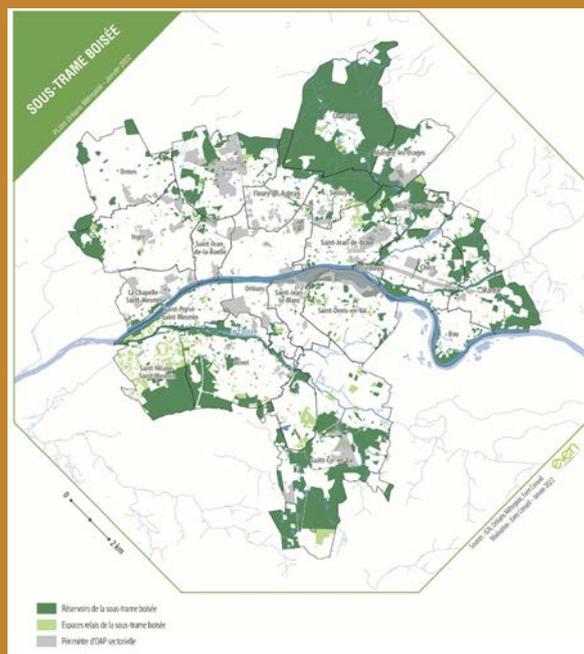
## Retour d'expérience : Le futur PLU bioclimatique de la ville de Paris (75)

Prescrite en décembre 2020, la révision du PLU de la ville de Paris prévoit des règles pour inciter à la végétalisation, la réutilisation de l'existant et une dérogation aux règles de hauteur.

dérogatoire peut aller jusqu'à 20% des règles de hauteur générales prévues. Réglementer la densité est aussi absolument nécessaire pour atteindre les objectifs ZAN. Pour cela, le PLU(i) peut prévoir une densité minimale des constructions dans des secteurs délimités desservis par des transports collectifs. L'imposition d'une densité minimale est aussi possible dans le cas de zone d'aménagement concertée (ZAC) que ce soit à l'échelle de l'ensemble de la ZAC ou par secteurs de celle-ci.

<sup>11</sup> <https://www.cerema.fr/fr/actualites/prendre-compte-multifonctionnalite-sols-amenagement>

## Retour d'expérience : Orléans métropole (45)



© OAP TVB, Atlas TVB, Orléans métropole

Orléans Métropole a inclus dans son PLU métropolitain des prescriptions graphiques limitant la constructibilité et réglementant l'abattage des arbres au sein d'éléments de nature (cœurs d'îlot, jardins partagés, boisements urbains, etc.). La trame verte et bleue du territoire identifie les réservoirs de plusieurs sous-trames, les espaces relais ainsi que les corridors écologiques. Une OAP TVB définit des orientations pour préserver les sols et la biodiversité.

### **L'impact du ZAN sur les outils de l'urbanisme**

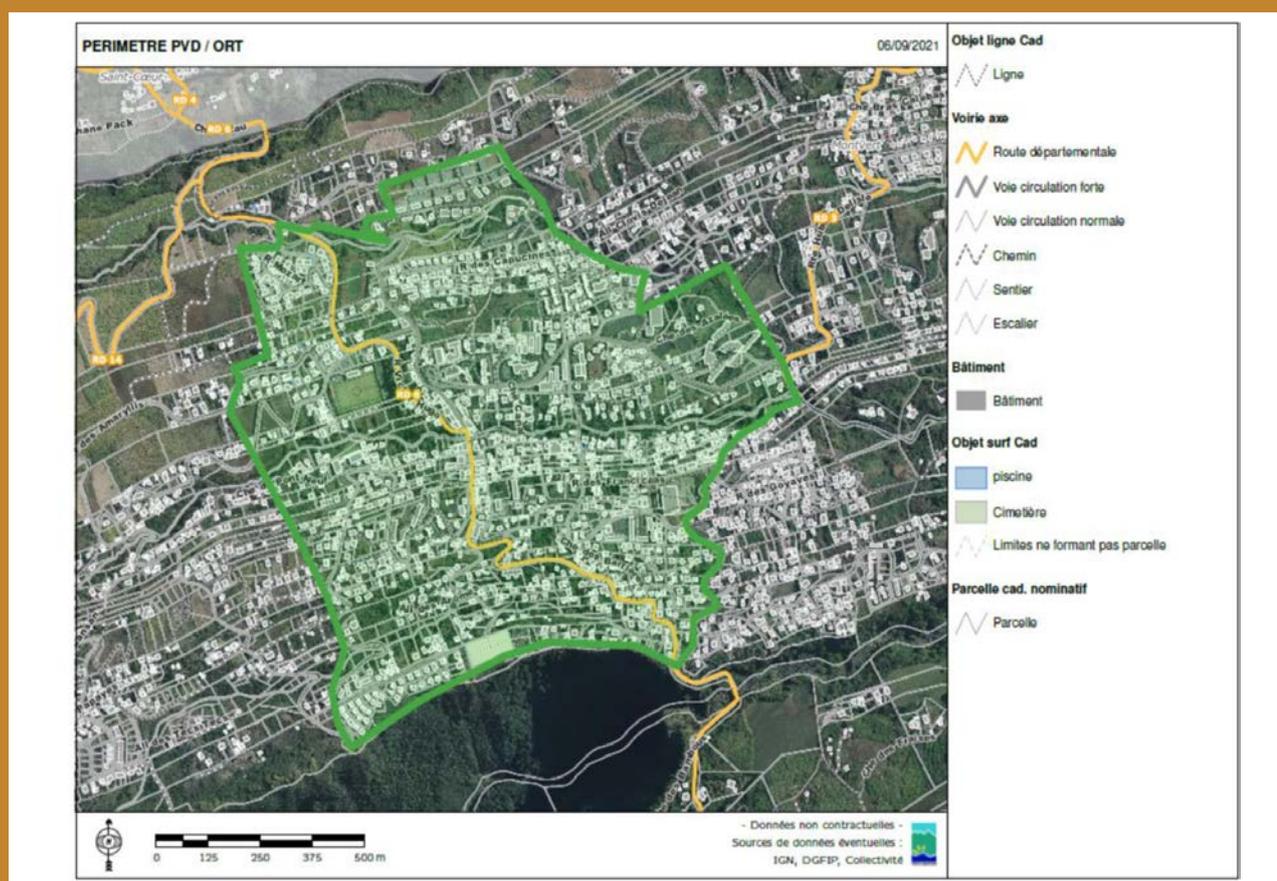
La loi Climat et Résilience a permis l'évolution de certains outils pour la prise en compte du ZAN. Ainsi, le PADD du PLU(i) ne peut prévoir l'ouverture à l'urbanisation des ENAF sans que ce soit justifié par une étude de densification des espaces urbanisés. Cette étude doit tenir compte des logements vacants mobilisables et des friches et espaces déjà urbanisés. Autre composante du PLU(i), les orientations d'aménagement et de programmation (OAP) peuvent désormais définir des actions et opérations nécessaires pour protéger les franges urbaines et rurales. De ce fait, elles peuvent définir comment un espace végétalisé non artificialisé peut être protégé et intégré dans le cas de projets de constructions en limite d'un espace agricole. Comme vu dans la fiche précédente, les orientations d'aménagement et de programmation peuvent aussi définir les quartiers à renaturer. Le coefficient de biotope

par surface a fait l'objet d'un changement conséquent puisqu'il devient obligatoire pour les communes appartenant à une zone d'urbanisation continue de plus de 50 000 habitants et dans les communes de plus de 15 000 habitants (article L151-22 du code de l'urbanisme). Concernant la création de nouvelles zones commerciales, celles entraînant une artificialisation des sols ne pourront être autorisées sauf exception. Effectivement, les zones commerciales inférieures à 10 000 m<sup>2</sup> peuvent bénéficier d'une dérogation sous conditions (insertion du projet dans des secteurs d'urbanisation ou de revitalisation du territoire ou opérations d'aménagement au sein d'un espace déjà urbanisé, ou encore compensation par la transformation d'un sol artificialisé en sol non artificialisé). Toutefois, les élus disposent d'une représentation aux commissions départementales d'aménagement commercial pour s'opposer aux dérogations. La création de nouvelles zones commerciales devant être aussi inscrites dans le PLU(i), le conseil municipal ou communautaire suivant le cas peut s'y opposer.

## Les outils contractuels

En complément, il existe des outils contractuels permettant d'établir sa politique d'aménagement tout en intégrant l'objectif ZAN. A cet effet, le contrat de ville, convention conclue entre l'Etat et les collectivités territoriales, permet entre autres de programmer des opérations de renouvellement urbain. Sur le même principe, les contrats de relance et de transition écologiques (CRTE) comprennent des objectifs et des opérations projetées en matière de lutte contre l'artificialisation des sols. La convention d'opération de revitalisation du territoire (ORT), bien que visant d'abord la revitalisation des centres-villes, peut être aussi pertinente. Cette convention permet de définir un projet territorial sur la base d'opérations de renouvellement du bâti et permet de mieux maîtriser le foncier car elle permet l'utilisation du droit de préemption urbain renforcé.

## Retour d'expérience : Opération de Revitalisation du Territoire en cours



© convention ORT de la communauté d'agglomération du territoire de la Côte Ouest (La Réunion)

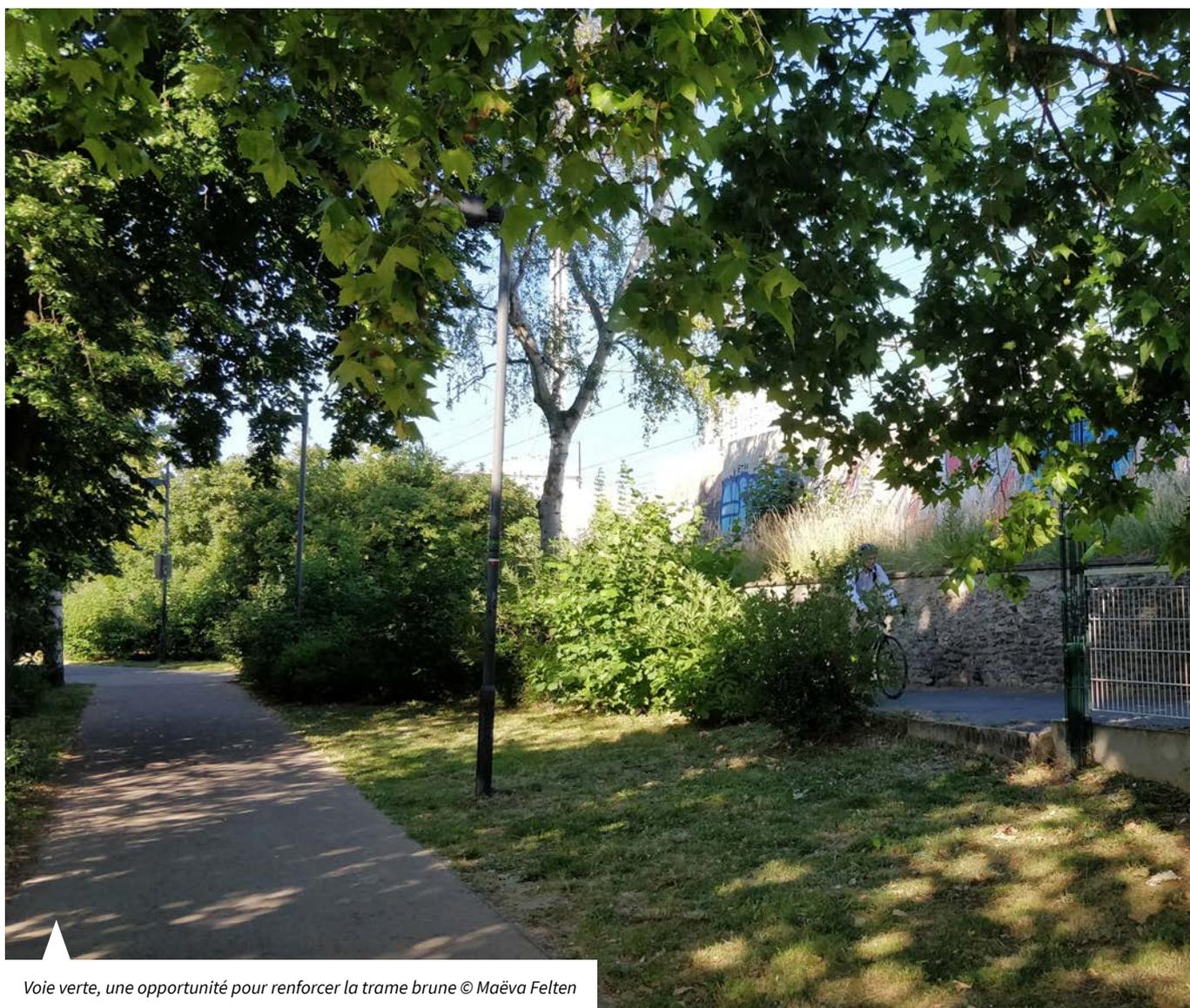
Dans le cadre d'une opération de revitalisation du territoire, la commune de Vannes (56) a établi comme axe prioritaire le renouvellement urbain et la réhabilitation du bâti en centre-ville.

A la Réunion, Le Port, Saint-André, Saint-Joseph et Saint-Pierre ont conclu des ORT qui leur permettront de réhabiliter leur tissu urbain en 2022 notamment à travers la reconversion de friches urbaines.

## Un concept de trame brune très peu mobilisé

Le concept de Trame Brune est encore mal identifié dans les paysages urbains et la littérature scientifique internationale. Actuellement décrite comme l'équivalent pour les sols de la Trame Verte pour la végétation urbaine dans la fourniture de services écosystémiques, son rôle écologique reste à définir. En tant que réseau écologique, la Trame Brune est constituée de réservoirs et de corridors pédologiques permettant d'assurer d'une part les conditions abiotiques\* et biotiques\* les plus favorables au maintien, au développement et/ou à la restauration d'un maximum d'espèces vivant dans le sol. Elle permettrait d'autre part le déplacement et les échanges de gènes d'un réservoir à l'autre d'espèces vivant toutes leurs étapes de vie dans le sol et ayant des capacités de dispersion limitées telles que les vers de terre. En contexte urbain, la Trame Brune serait donc soumise à la fois à des contraintes d'anthropisation des sols (par exemple : décapage, compaction, pollution) et d'isolement des sols (séparés d'un milieu réservoir par un chemin, une piste cyclable, une route).

A l'heure actuelle, seule la Trame Verte et Bleue est prise en compte dans les documents d'urbanisme tandis que le pendant opérationnel de la Trame Brune reste à élaborer. L'absence d'outils juridiques et techniques permettant de prendre en compte les sols constitue aujourd'hui un frein majeur à l'atteinte d'importants objectifs de politique publique (Zéro Artificialisation Nette, préservation de la biodiversité...). L'appropriation du concept de Trame Brune par les élus et les acteurs de l'aménagement pourrait pourtant permettre à terme une compréhension plus fonctionnelle de la biodiversité des sols sur les territoires. Ainsi, elle pourrait constituer un outil au service de la planification urbaine permettant d'orienter les aménagements vers des solutions de préservation ou de restauration des conditions biotiques et abiotiques des sols ainsi que des continuités écologiques au sein de la pédosphère.



Voie verte, une opportunité pour renforcer la trame brune © Maëva Felten

## Conjuguer densité et biodiversité

D'après la publication de Morgane Fléreau, « Formes urbaines et biodiversité un état des connaissances » (2020), les liens entre biodiversité et formes urbaines sont très peu étudiés que ce soit sur le plan scientifique ou opérationnel. Toutefois, au sein du corpus analysé, diversité et connectivité sont les deux maîtres mots identifiés pour aboutir à des formes urbaines favorables à la biodiversité. Afin que cette dernière soit véritablement prise en compte dans le cadre d'un projet d'aménagement, il est nécessaire de l'intégrer dès la phase de conception et d'en faire un axe prioritaire. La localisation géographique, la structure et le fonctionnement écologique du site, et notamment les connexions aux corridors écologiques, sont à prendre en compte. Que ce soit dans le cas d'un projet de densification ou de renouvellement urbain, les configurations spatiales doivent être étudiées en amont. A l'échelle de la parcelle, cela demande de mener une réflexion autour de la position des entités bâties, afin de favoriser les connectivités écologiques avec les terrains attenants. La richesse en espèces ne peut être garantie à l'échelle du quartier qu'en diversifiant les habitats. La diversité des espèces végétales adaptées au contexte local et nourricières, la présence des différentes strates de végétation (muscinale, herbacée, arbustive et arborée) et la mise en place d'une gestion écologique permettront l'accueil d'une faune plus riche au sein des espaces végétalisés. La conservation de l'existant,

des sols vivants, de la végétation permettra d'assurer la préservation de la biodiversité déjà présente. Le sujet de la biodiversité des sols urbains était très peu traité au sein du corpus. La connectivité des espaces végétalisés publics ou privés permettra aux espèces de se déplacer entre les réservoirs de biodiversité et espaces relais. La perméabilité des clôtures entre les parcelles est à assurer pour permettre le déplacement de la faune non volante. L'absence de bordure, même au niveau des fosses d'arbres, facilitera la circulation des organismes du sol.

Le programme de recherche BAUM (Biodiversité, Aménagement Urbain et Morphologie), a été initié par le Plan Urbanisme, Construction Architecture, en janvier 2019, en lien avec l'OFB et le MNHN. Six équipes associant chercheurs et acteurs de l'aménagement ont été sélectionnées à l'issue d'un appel à projets de recherche lancé en 2020. Leurs travaux en cours contribuent à favoriser la compréhension de l'impact de la forme urbaine sur la biodiversité, à l'échelle de nos villes occidentales et à répondre à la question suivante « comment concilier densification du bâti, organisation des constructions, et déploiement dans la matrice construite de la ville d'un réseau d'espaces à caractère naturel, propice à l'accueil et au maintien de la biodiversité la plus riche possible ? ».



Prairie préservée et gérée écologiquement au sein d'une zone urbaine dense à Bagneux © Maëva Felten

Les sols sont encore peu pris en compte dans le cadre d'un projet d'aménagement. La préservation de l'existant doit, aujourd'hui, devenir une ligne directrice lors de la conception, en commençant par la réalisation d'un diagnostic. Le projet pourra ainsi prendre en compte les caractéristiques des sols et la biodiversité présente. Dans le cadre de projet d'aménagement concernant des friches ou de projet de renouvellement urbain, les nouvelles constructions doivent être réalisées sur les espaces déjà minéralisés. Il existe également des solutions techniques qui permettent de limiter les impacts sur les sols et la biodiversité.

## La phase de diagnostic du projet

Les études portant sur les sols urbains sont relativement récentes dans le domaine de la pédologie. Longtemps considéré comme une zone de « non-sol », les pédologues ne s'intéressent au milieu urbain qu'à partir du milieu des années 90. Ce milieu concentre pourtant une très grande diversité de sols formant une véritable mosaïque urbaine, constituée aussi bien de sols naturels préservés, plus ou moins enclavés, que de sols artificiels, scellés ou non, ayant été fortement anthropisés. Ainsi, les sols urbains peuvent contenir selon leur degré d'anthropisation (degré de perturbation causée des activités humaines) des horizons naturels ou des couches anthropisées caractérisés par des propriétés physiques, chimiques et biologiques à partir desquelles le sol réalise des fonctions (comme la transformation des nutriments, le stockage de l'eau). De ces fonctions réalisées par l'écosystème sol, les populations humaines tirent, directement ou indirectement, des bénéfices appelés services écosystémiques, comme l'approvisionnement en nourriture ou encore la régulation de l'eau.

Dans le cadre d'un projet d'aménagement, la caractérisation agropédologique des sols de l'emprise du projet est une étape indispensable à l'identification et à la localisation des sols les plus fonctionnels (fournissant un habitat pour de nombreuses espèces, assurant l'infiltration des eaux pluviales, etc.) comme des sols les plus dégradés susceptibles d'être renaturés par l'ingénierie pédologique. La première étape du diagnostic agropédologique consiste en l'implantation de points d'observation clés grâce à une étude bibliographique préalable du contexte géologique, pédologique et historique du secteur d'étude. La compréhension de la diversité des sols passe ensuite par l'observation et la description de profils pédologiques. Les données recueillies sont capitalisées à travers la réalisation systématique de fiches d'observations de terrain détaillant les propriétés du sol (profondeur des horizons, texture, structure, compacité...) et illustrées de photos.



Diversité de profils de sols urbains © Sol Paysage

Date d'observation : 14/11/2020 Observateur(s) : Tanguy Sorre  
Date dernière mise à jour : 11/12/2019 Rédacteur : Timothée Bertrand

**LOCALISATION ET DESCRIPTION GLOBALE**  
 Coordonnées GPS Latitude Nord : 48.51414 Longitude Est : 2.17726  
 Système de coordonnées : WGS84 (degré minutes)  
 Pente 0%  
 Zone Champs de Mars  
 Couvert végétal Pelouse  
 Aspect de surface Quelques feuilles mortes

**Description générale** Anthroisol reconstitué sur remblais très caillouteux assez compact (-50 à -80 cm plus compact)

Description par horizon										
N	PROF-CM	TEXTURE	HUMIDITE	COULEUR	HYDRO-MORPHIE	TEST HCL	STRUCTURE	POROSITE	COMP.	COMMENTAIRE
H1	0-15	La	frais	brun foncé	0 : aucune tache(s) d'oxydation ; aucune tache(s) de réduction ; aucun nodule(s)	2	GRUM	3 - BIO	PC	MO > 3% ; 90% de déjections, présence de galeries ; plusieurs racines (1 mm à 1 cm) ; aucun EG naturels ; rares EG anthropiques (plastique)
H2	15-40	La	frais	brun	g : quelques tache(s) d'oxydation ; aucune tache(s) de réduction ; aucun nodule(s)	2	POLY	3 - BIO	PC	1% < MO < 3% ; 90% de déjections, présence de galeries ; quelques racines (1 mm à 1 cm) ; rares EG naturels ; graviers ; aucun EG anthropiques
H3	40-120	Lsg	frais	hétérogène	0 : rares tache(s) d'oxydation ; aucune tache(s) de réduction ; aucun nodule(s)	4	PART	2 - EG	AC	MO < 1% ; rares racines (< 1 mm) ; très nombreux EG naturels ; graviers, cailloux, pierres ; rares EG anthropiques (briques et résidus d'incinération) ; Entre -50 et -80 cm : plus compact



P36 : Localisation



P36 : Ensemble du profil



P36 : Horizon H1



P36 : Horizon H2



P36 : Horizon H3

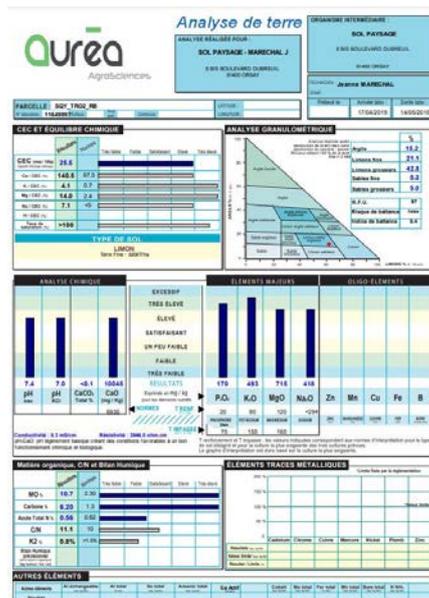


P36 : Détail des matériaux composant les horizons

Exemple de fiche d'observation de profil © Sol Paysage

L'évaluation des fonctions du sol est quant à elle réalisée grâce à des indicateurs de fonction construits à partir de paramètres physiques, chimiques et biologiques mesurés ou observés dans les sols. Un indicateur de fonctionnalité correspond soit à un paramètre ou à une combinaison de paramètres caractérisant le sol. Ces paramètres sont qualifiés directement lors de l'observation des profils de sols ou bien ils sont mesurés en laboratoire à partir d'échantillons prélevés sur le terrain. La sélection des paramètres s'établit entre autres sur une méthode de mesure fiable, précise et standardisée ainsi que l'existence d'un référentiel d'interprétation. Par exemple, l'analyse granulométrique

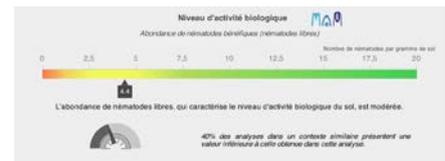
décrivant les pourcentages de sable, limon et argile, ainsi que la mesure au cylindre de la densité apparente sont utilisés pour qualifier l'état physique du sol plus ou moins favorable au développement de la végétation (sols sableux drainants, sols très compacts...). Les paramètres chimiques tels que les teneurs en matières organiques, azote, phosphore ou cations échangeables permettent de qualifier les ressources nutritives disponibles pour les plantes et les organismes du sol. Enfin, les paramètres biologiques tels que la biomasse microbienne, l'abondance de nématodes et l'abondance lombricienne permettent de qualifier l'activité biologique dans les sols ou encore la qualité des réseaux trophiques\*.



Granulométrie, teneur en carbone, teneurs en cations échangeables...



Abondance lombricienne



Abondance de nématodes



% de bioturbations lombriciennes



Perméabilité



Densité apparente

Exemples d'indicateurs de fonctionnalité (© : Sol Paysage, Auréa, Elisol Environnement)

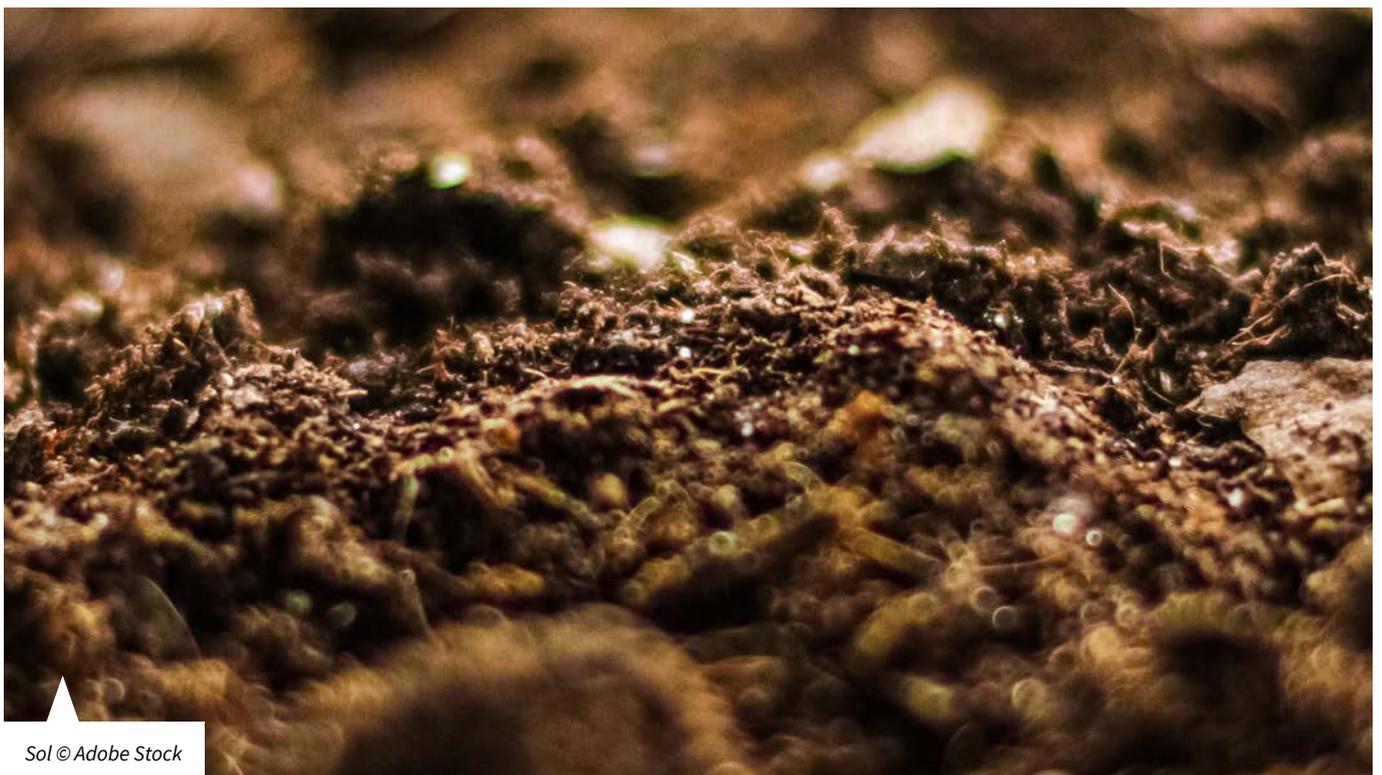
La description fine des profils de sol réalisée sur le terrain permet de réaliser des cartes de profils détaillant les horizons et matériaux observés. Le passage à une représentation surfacique est ensuite réalisé grâce à la combinaison de la connaissance bibliographique et des observations du secteur d'étude. Enfin, en cohérence avec les types de sols observés et les mesures d'indicateurs fonctionnels, des cartes thématiques de fonctionnalité peuvent être réalisées.



Exemples de cartes réalisées à partir d'observations de profils pédologiques (© Sol Paysage)

A l'heure actuelle, bien que le sol soit mentionné explicitement dans le contenu des études d'impact (art R122-5 du code de l'environnement), en pratique, leur volet pédologique n'est pas réalisé. Ainsi, à ce jour, le sol est le grand oublié du processus réglementaire d'évaluation environnementale. Cela limite les possibilités de préserver les sols en place les plus fonctionnels et de réutiliser des matériaux pédologiques de bonne qualité excavés lors des phases de travaux. Or, pour répondre au volet aménagement de la stratégie ZAN, la connaissance du

degré d'artificialisation des sols (i.e., altération durable de tout ou partie des fonctions écologiques des sols naturels ; article L.101-2-1 du code de l'urbanisme) sera indispensable à la réalisation d'un projet économe en ressource. Ainsi, le diagnostic agropédologique se propose comme outil incontournable (au sein d'un diagnostic écologique) de la connaissance des sols et de leurs fonctionnalités pour les prendre en compte en amont de la conception des aménagements.



Sol © Adobe Stock

# Les solutions techniques pour réduire les impacts sur les sols

Dans la continuité du diagnostic agropédologique et afin de préserver les sols, différentes solutions techniques, intégrées dans un concept d'urbanisme circulaire, existent à l'échelle d'un projet comme la surélévation du bâti existant, la construction sur pilotis ou encore la réalisation de parking végétalisés.

## Surélévation

Dans le respect des règles fixées dans le règlement du PLU(i) (voir Fiche 3), le bâti existant peut être surélevé sur la parcelle afin d'éviter l'étalement urbain et une artificialisation des sols. La surélévation peut permettre d'étendre le bâtiment tout en gardant sa destination actuelle. Il s'agit de projets souvent à bas coût, permettant une livraison rapide des logements, bureaux ou autre. C'est également une opportunité pour étudier la possibilité de réaliser une toiture végétalisée favorable à la biodiversité. Le projet « Greenbox on the roof » à Bron (69), réalisé en 2019, consistait en la surélévation d'un

immeuble de bureaux par l'ajout d'un étage en ossature bois à haute performance environnementale. Des jardins végétalisés ont été créés en toiture. Dans d'autres cas, la surélévation permet de mobiliser des bâtiments vacants en changeant leur destination pour répondre à une demande particulière. De nombreux projets de ce type ont vu le jour en Ile de France notamment à Paris comme la surélévation et reconversion d'un immeuble de bureaux en 38 logements au 44 rue Planchat dans le 20ème arrondissement.



Greenbox on the roof à Bron © Marc Campesi et Sophie Sturlese Atelier d'architecture et d'ingénierie

## Construction sur pilotis

Technique de construction ancestrale, la construction sur pilotis permet de préserver la biodiversité et les sols. Effectivement, cette technique nécessite peu d'excavation pour la création de fondations, ni de minéralisation, et donc aura un impact moins important sur les sols et leur biodiversité. En outre, les constructions sur pilotis permettent aux espèces faunistiques présentes de se déplacer sous le bâti, l'infiltration des eaux pluviales et une meilleure intégration dans l'environnement. Toutefois, afin de préserver les sols, les pilotis doivent être directement fixés sur des pieux enfoncés dans le sol et non pas reposer

sur une surface artificielle (dalle ou socle de béton par exemple). Cette méthode est de plus en plus utilisée dans le cadre de logements individuels mais commence aussi à se développer à plus grande échelle. De cette manière, afin de valoriser la Loire, ses activités et la biodiversité, le centre de découverte Terre d'Estuaire a été construit sur pilotis à Cordemais. C'est un projet démonstrateur du « construire autrement » en limitant l'artificialisation des sols.

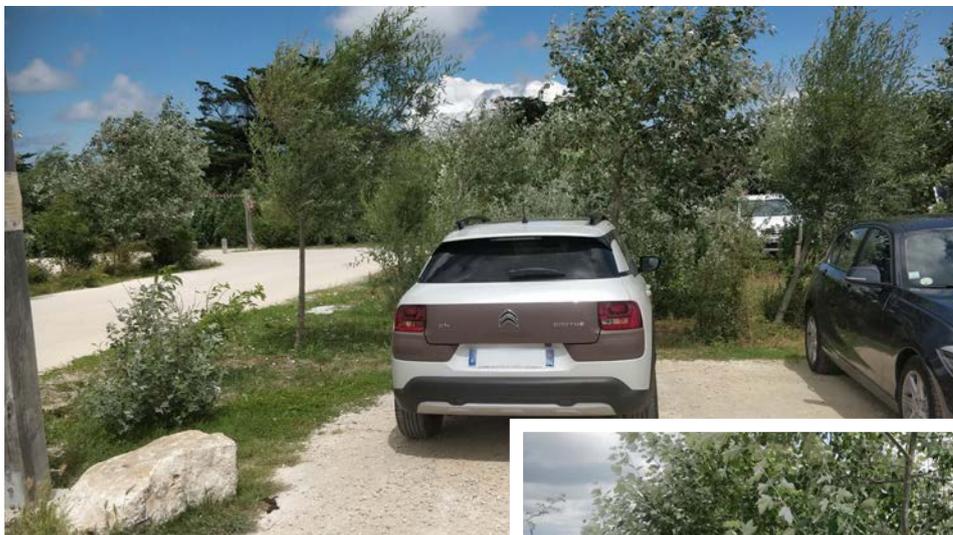


Centre de découverte Terre d'Estuaire à Cordemais © Hadrien Brunner

## Parking végétalisé et perméable

Les parkings représentent des surfaces artificialisées importantes. En premier lieu, afin de limiter ce besoin, la manière de se déplacer est à repenser. L'accès aux transports en commun est à faciliter et des cheminements doux sont à créer. L'étalement urbain induit ce besoin d'utilisation d'une voiture au quotidien pour avoir accès aux divers services ou pour se rendre au travail et donc de parking à proximité. Cela entraîne également la création d'infrastructures de transport qui, non seulement artificialisent des espaces naturels et agricoles, engendrent des ruptures de continuité écologique mais aussi un risque de collisions mortelles pour la faune. S'il est nécessaire de réaliser un parking, une réflexion est à mener sur le nombre de places qui est à réduire au minimum requis. La mutualisation des places de stationnement entre différents usages est une solution (habitants, professionnels, hôtels, restaurants, visiteurs,...). Afin de limiter l'impact de ces structures sur les sols, la biodiversité et leurs fonctions, un parking est à végétaliser et perméabiliser. Des espaces végétalisés sont ainsi à réaliser, ou à préserver en fonction de l'existant, entre les rangs de stationnement et aux abords du parking. Le positionnement de ces espaces est à réfléchir de manière à permettre une connectivité avec les espaces végétalisés des parcelles adjacentes. La flore indigène est à privilégier, la marque « Végétal local » assurera des plants adaptés au contexte local.

Dans la plupart des cas, les revêtements perméables ne permettent pas de préserver la biodiversité en place, y compris la biodiversité des sols. Surface en graviers, graviers-gazon, dalles alvéolées, pavés engazonnés et revêtement végétal perméable, peuvent nécessiter des excavations, la mise en place de géotextile et/ou la réalisation d'une couche de pose et de fondation. Toutefois, ces surfaces permettent l'infiltration des eaux de pluie, la recharge des nappes phréatiques et restaurent donc le cycle de l'eau. Les risques d'inondation et de pollution des eaux ruisselées sont également diminués. Des techniques se développent, notamment pour réaliser des surfaces en dalles, qui permettraient de maintenir les échanges eau-sol-air et seraient favorables aux organismes du sol. Pour choisir le bon type de revêtement, il faut réfléchir à son usage. En fonction du poids à supporter, de la fréquence et de l'entretien souhaité, le revêtement sera différent. Le gravier-gazon par exemple permettra un stationnement ponctuel des véhicules légers mais en cas de passages réguliers, des ornières pourraient apparaître. Sur l'île de Ré, la commune de Saint-Clément-des-Baleines (17) a aménagé une aire de stationnement végétalisée. Les places de stationnement sont en grave de calcaire et en mélange terre-pierre engazonné. La plantation de boisements et de massifs arbustifs a été réalisée et les arbres existants ont été préservés.

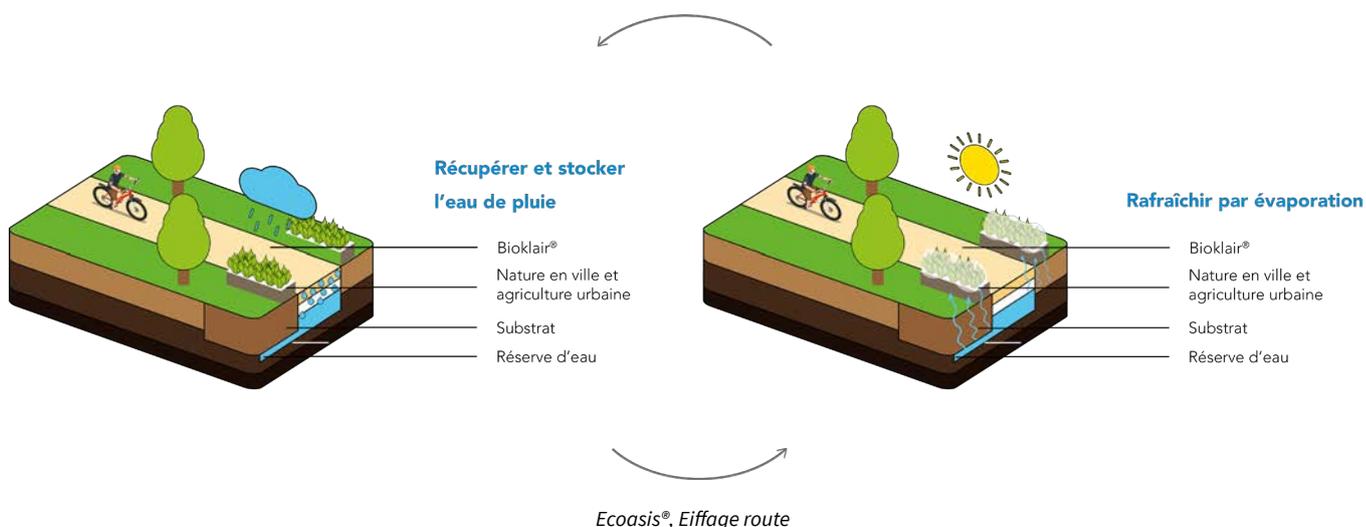


Parking végétalisé de Saint Clément des Baleines © Maëva Felten

L'utilisation de revêtement perméable ne permet pas de préserver la biodiversité en place mais peut permettre d'alimenter en eau les espaces végétalisés adjacents. Sur ce modèle, Eiffage route propose une solution systémique de rafraîchissement qui répond aux enjeux environnementaux et sociétaux (gestion intégrée des eaux pluviales, biodiversité, bas carbone, bien-être, mobilité et sensibilisation des usagers) : Ecoasis®. Le revêtement perméable associé, nommé Bioklair®, permet de remplir des réservoirs d'eau situés sous la chaussée et d'éviter le ruissellement. L'eau collectée peut alors servir à entretenir les espaces végétalisés dans un cycle vertueux. Ce revêtement permet de réaliser de manière écologique et bas carbone toutes sortes d'aménagements. Ses granulats clairs lui permettent de réfléchir et diffuser une grande partie de l'énergie solaire qu'il reçoit (effet d'Albédo).



Revêtement perméable à base de liant végétal, Bioklair®



## Urbanisme circulaire

Théorisé par l'urbaniste Sylvain Grisot, l'urbanisme circulaire apporte des solutions pour lutter contre l'artificialisation des sols. Cet urbanisme repose sur une reconstruction de la ville sur la ville et une application des principes de l'économie circulaire à l'aménagement urbain. L'urbanisme circulaire repose sur trois principes. Il s'agit d'abord d'intensifier les usages de lieux déjà existants. Dans la ville, de nombreux espaces tels que des bureaux, des parkings ou des cantines ne sont utilisés que temporairement. Il est estimé qu'un bâtiment est vide 10% du temps alors qu'il pourrait être exploité à 100%. Le deuxième principe de cet urbanisme repose sur une

transformation des bâtiments vacants pour les rendre à nouveau exploitables en changeant leur usage. La transformation de l'existant et la réalisation de nouveaux projets doivent permettre la création d'aménagements qui pourront être modulés au cours du temps en fonction des besoins des habitants. Dernier principe, dans le cas où l'espace urbain ne peut accueillir de nouveaux usages ou être réhabilité, celui-ci doit être recyclé comme dans le cas des friches industrielles et commerciales.

Des projets appliquant ce concept ont pu voir le jour comme le Talus à Marseille (13) ou la Maison du projet de la Lainière à Roubaix (59). Construit sur une

ancienne décharge de remblais de chantier à proximité de la rocade L2, le Talus est un tiers lieu au sein duquel se trouvent une ferme urbaine participative et un lieu social (bar et restaurant). Des événements festifs et culturels autour de la transition écologique y sont organisés. En 2018, à l'initiative de l'association Heko Farm, l'ancienne décharge a été dépolluée (enlèvement et tri des déchets, analyse de sols et fertilisation avec des biodéchets) pour concrétiser ce projet de transformation d'une friche de chantier. Ce projet prend en compte la biodiversité et des aménagements ont été réalisés : la plantation d'essences locales, la création d'une mare, la mise en place de nichoirs et de gîtes à chauves-souris ainsi que la sanctuarisation de zones non cultivées. La ferme fonctionne avec des pratiques agroécologiques, ce qui permet la préservation des sols.



*Le Talus à Marseille (13) © Le Talus*



*La Maison du Projet à Roubaix (59) © Ville Renouvelée*

La Maison du Projet est située dans le quartier de la Lainière à Roubaix. Ce projet s'est inscrit dans le cadre de reconversions de friches industrielles dans ce quartier emblématique de l'industrie textile. Conçu par les architectes d'EKO, il s'agit d'un bâtiment intégrant à tous ses niveaux les principes de l'économie circulaire (inspiration du concept de « cradle to cradle » littéralement du berceau au berceau). La Maison a été conçue pour être mobile et même transformable. Sans fondations en béton, le bâtiment comporte une ossature métallique reposant sur des pieux enfoncés dans le sol, ce qui préserve certaines de ses fonctions. La Maison peut être déplacée dans un autre quartier et prendre d'autres formes. Cette caractéristique évolutive permet ainsi une multiplicité des usages du bâtiment. La nature sur place a été préservée et le jardin de la Maison a été utilisé pour y installer plus de 700 boutures de saules.



Chapitre 2 :

Comment remettre en état

les sols dégradés ?

© Guillaume Lemoine

## Fiche 5 :

# Comment permettre aux sols dégradés de retrouver certaines fonctions ?

L'artificialisation et certaines activités humaines polluantes altèrent les fonctions des sols (par exemple : la fonction d'habitat pour les organismes, de rétention circulation et infiltration des eaux, de stockage, recyclage et transformation de la matière organique, etc.). Différentes approches existent afin de permettre à ces sols de retrouver certaines fonctions et/ou de gérer les pollutions, dont le génie écologique, et notamment :

- le phytomanagement : Il s'agit d'une « approche de gestion d'un site dégradé ou délaissé permettant d'accroître progressivement sa valeur directe ou indirecte en faisant appel à un ensemble de techniques utilisant les végétaux, et soucieux de la fonctionnalité du sol<sup>12</sup> » (définition par le groupe de travail IDfriches) ;

- le génie pédologique : La reconstitution et la construction de sols, basées sur des techniques de génie pédologique, consistent à reconstituer ou créer de toute pièce des sols assurant certaines fonctions recherchées (comme être support de végétation en augmentant la fertilité du sol) à l'aide de matériaux qui peuvent être issus de déchets urbains.

### Définition :

« Le génie écologique a pour objet de favoriser la résilience des écosystèmes. Il comprend un ensemble de techniques visant à améliorer et restaurer la biodiversité et les fonctions écologiques sur tous les milieux, naturels et artificialisés. » (Union Professionnelle du Génie Ecologique)

*Avant toute action, il est essentiel de réaliser un diagnostic écologique (inventaires naturalistes) afin de prendre en compte les espèces présentes sur le site et de privilégier l'évitement en cas d'enjeux en termes de biodiversité.*

## Les solutions fondées sur la nature

L'Union Internationale pour la Conservation de la Nature (UICN) définit les Solutions fondées sur la Nature comme "les actions visant à protéger, gérer de manière durable et restaurer des écosystèmes naturels ou modifiés pour relever directement les défis de société de manière efficace et adaptative, tout en assurant le bien-être humain et en produisant des bénéfices pour la biodiversité". Ces solutions fondées sur la nature se déclinent en trois types d'actions que sont la préservation d'écosystèmes fonctionnels, l'amélioration de la gestion des écosystèmes pour une utilisation durable par les activités humaines et la restauration des écosystèmes dégradés ou la création d'écosystèmes. Ces solutions peuvent être, par exemple :

- La création de noues (fossés peu profonds et larges végétalisés) ou de jardins de pluie permettant la collecte et l'infiltration des eaux

pour limiter le ruissellement des eaux pluviales ;

- La préservation et la restauration de zones humides et de zone d'expansion des crues pour réguler les risques inondations ;
- La dépollution des sols par la phytoremédiation (voir paragraphe suivant) ;
- La végétalisation du milieu urbain pour lutter contre les îlots de chaleur urbains en recourant notamment à la désimperméabilisation et à des solutions techniques comme les façades et toitures végétalisées.

Certaines de ces solutions peuvent permettre de préserver les sols vivants ou bien de redonner certaines fonctions à des sols dégradés.

<sup>12</sup> Groupe de travail phytomanagement IDfriches, Qu'est-ce que le phytomanagement ?, 2021

## Désimperméabiliser les sols

Les opérations de désimperméabilisation des sols se multiplient afin de permettre aux eaux pluviales de s'infiltrer, de limiter les îlots de chaleur urbains et favoriser la biodiversité. Plusieurs communes ont déjà entrepris de retirer l'enrobé au niveau des trottoirs et dans les cours d'école puis de végétaliser l'espace, comme à Caen ou Lyon par exemple. Les permis de végétalisés créent également des opportunités pour désimperméabiliser les sols tout en confiant la gestion de l'espace à des habitants du quartier. Cet outil permet de fédérer les citoyens autour d'un projet commun et de les sensibiliser à la préservation des sols et de la biodiversité.

L'Office Français de la Biodiversité pilote depuis 2020 le projet Life ARTISAN (Accroître la Résilience des Territoires par l'Incitation aux Solutions d'Adaptation fondées sur la Nature) afin notamment de démontrer le potentiel des Solutions d'adaptation Fondées sur la Nature, qui permettent spécifiquement de répondre à l'enjeu de

l'adaptation au changement climatique. Le programme s'est construit autour de dix sites pilotes répartis sur le territoire métropolitain et ultra-marin. Site pilote dans le Nord, la ville de Lille (59) désimperméabilise ses cours d'écoles et les revégétalise. Cette action a été choisie afin de favoriser la biodiversité mais aussi pour lutter contre le phénomène d'îlot de chaleur urbain. La végétalisation des cours d'écoles permettra aussi de lutter contre le ruissellement des eaux pluviales et de renforcer des continuités écologiques existantes. Si depuis 2018, un tiers des cours d'école lilloises étaient déjà végétalisés, la municipalité a décidé d'aller plus loin en visant l'objectif 100%. Les travaux ont été réalisés en 2021 pour trois premières écoles (Sophie Germain, Chateaubriand et Madame de Maintenon). L'ambition de la ville est de végétaliser deux à trois cours d'écoles primaires et maternelles par an sur la durée du Life, soit jusqu'à 2027.



Cour d'école désimperméabilisée © Guilhem Fouques

# Réhabilitation des friches à risque de pollution

Certains sites, dont les friches, sont marqués par leur passé industriel. Ils peuvent nécessiter une intervention de dépollution des sols afin de pouvoir réaliser un projet d'aménagement. En 2020, la surface totale de friches industrielles est estimée, selon les sources, entre 90 000 et 150 000 hectares (ADEME). Ces friches représentent un gisement foncier stratégique dans une logique de lutte

contre l'étalement urbain, de renouvellement urbain ainsi que de création d'espaces de nature accessibles aux citoyens. Il est toutefois nécessaire de dépolluer, ou bien de stabiliser les polluants dans le sol, afin que le site soit compatible avec les usages envisagés.



Friche industrielle © Pixabay

## Des techniques de gestion des pollutions impactant moins les sols

La gestion des sites et sols pollués s'appuie sur le Code de l'Environnement, le Code de l'Urbanisme et le Code de la Santé Publique. C'est la loi ALUR qui établit un cadre juridique et précise les responsabilités en matière de remise en état des sites et sols pollués. Selon le principe de « pollueur-payeur » présenté dans le Code de l'environnement : les frais résultants des mesures de prévention, de réduction de la pollution et de lutte contre celle-ci doivent être supportés par le pollueur. De nombreux acteurs privés et publics sont impliqués dans la chaîne de décision (propriétaire, aménageur, bureaux d'études, coordinateur sécurité, ...) et optent ensemble pour une méthode de gestion adaptée aux caractéristiques du site, du sol et aux contraintes économiques, sociales et techniques. Il existe une méthodologie nationale de gestion des sites et sols pollués sur laquelle s'appuyer lors d'une requalification.

<sup>13</sup> Ministère de l'environnement, de l'Énergie et de la Mer, Direction Générale de la prévention des risques, *Méthodologie nationale de gestion des sites et sols pollués*, 2017

### Définition :

D'après le ministère de la Transition écologique et solidaire un site pollué est défini comme : « un site présentant un risque pérenne, réel ou potentiel, pour la santé humaine ou l'environnement du fait d'une pollution résultant d'une activité actuelle ou ancienne sur ce site ».

Les diverses techniques de traitement des sols pollués sont classées en quatre catégories : les procédés physicochimiques, thermiques et biologiques ainsi que le confinement. Selon l'ADEME en 2012, les traitements physico-chimiques représentaient 59 % du volume des terres traitées, suivis par les traitements biologiques (25 %) et les traitements thermiques (16 %). Ces techniques

sont réalisées in situ, le sol n'est alors pas déplacé, ou ex situ, demandant une excavation des terres. Le choix de la méthode dépend notamment de la taille du site, des délais de dépollution et du temps dont les acteurs disposent, du type de pollution (polluants organiques comme les PCB, les hydrocarbures, etc. et/ou inorganiques comme les métaux lourds, fluorure, ...), de la nature du sol et des coûts générés.

Les techniques ex-situ impactent la biodiversité et les fonctions écologiques des sols, les terres étant prélevées. Certaines méthodes de traitement in-situ sont moins destructives pour les sols, c'est le cas de la phytoremédiation. Elle fait partie des traitements biologiques et des solutions fondées sur la nature pour gérer les sols pollués. La connaissance des paramètres concernant le sol (notamment la fertilité) et le site, ses usages actuels et

Il existe différentes stratégies :

- **La phytostabilisation** : cette technique s'applique aux polluants inorganiques et organiques. La phytostabilisation ne traite pas la pollution. C'est un mode de gestion qui permet de mettre en sécurité le site en réduisant la mobilité des polluants (par lessivage, sous forme de poussières ou transportés par la faune) et leur biodisponibilité\*.
- **La phytoextraction** : Cette technique s'applique aux sols pollués par des métaux, des métalloïdes\* et des radionucléides\*. Les polluants présents dans le sol sont extraits à l'aide d'espèces végétales. Les plantes absorbent, via leurs racines, et accumulent les polluants dans leurs parties aériennes (feuilles, tiges,..). Une fois que les plantes sont saturées, elles sont récoltées. Il est alors possible de récupérer, et donc de recycler, les métaux pour un usage industriel. Cette filière est appelée l'agromine.

### Définition :

« Dans le cadre des techniques de phytoremédiation, les sols pollués sont gérés ou bien dépollués via l'utilisation de plantes. Ce sont des techniques qui nécessitent un temps d'action long (de 2 à 20 ans) et qui conviennent pour des pollutions présentes à faible profondeur (de 0 à 1 m) à des concentrations non écotoxiques. Ces traitements s'appliquent particulièrement aux sites de grande surface.

futurs, les polluants présents, permet de pré-sélectionner la (les) phytotechnologie(s) la (les) plus adaptée(s) et d'identifier les paramètres susceptibles de vérifier la faisabilité et les performances des techniques (ADEME).

- **La phytodégradation/rhizodégradation** : Cette technique s'applique aux polluants organiques (notamment HAP, HCT, PCB, ...). Il s'agit d'une technique de dépollution des sols. Les plantes, et les microorganismes qui leur sont associés, dégradent les polluants en composés plus simples et moins toxiques. Il existe :

> La rhizodégradation : les microorganismes présents dans l'environnement des racines (la rhizosphère) stimulent la dégradation des polluants.

> La phytodégradation : Après les avoir absorbés, la plante peut dégrader les polluants organiques au niveau des parties aériennes et racinaires via son métabolisme.



L'Arabette de Haller, plante utilisée pour la phytoextraction © Wikimedia

Les coûts engendrés par ces techniques sont très disparates et dépendent étroitement du site, du choix de l'espèce, de la durée de traitement et de l'apport d'amendement. Ils sont de l'ordre de : 18 à 40 €/m<sup>2</sup> de surface de sols traités (hors apport de terre végétale) pour des techniques de phytoextraction et de 2 à 12 €/m<sup>2</sup> de sols gérés pour des techniques de phytostabilisation. Les coûts de mise en place varient de 0,5 à 3 €/m<sup>2</sup>.

La phytoremédiation fait partie des techniques utilisées en phytomanagement. La phytoremédiation permet de gérer la présence de polluant mais aussi par exemple d'améliorer

la fertilité des sols, de les aérer et donc de favoriser l'infiltration des eaux. Les techniques de phytoremédiation peuvent être intégrées dans un projet à long terme de reconversion d'un site. Un aménagement paysager et écologique est à privilégier sur les surfaces traitées afin de bénéficier des fonctions écologiques retrouvées et de maintenir des habitats pour les espèces sauvages. Par ailleurs, ces espaces peuvent avoir une portée pédagogique et permettre de mettre en avant la phytoremédiation. La filière est en plein développement, les phytotechnologies ayant gagné en maturité ces dix dernières années.

## Reconstruction de sols fertiles et gestion des terres

### Renaturation et construction de sols fertiles

En réponse à une attente sociétale forte de verdissement des villes croisée à une artificialisation croissante, des pratiques de construction de sols fertiles à des fins de végétalisation se développent, (Anthrosols reconstitués et construits), regroupées sous les termes d'ingénierie pédologique. Dans le cadre d'opérations d'ingénierie pédologique (création d'une zone d'aménagement, réhabilitation de friches industrielles), et notamment de renaturation, la fertilité des sols est la fonction principale recherchée, mais des fonctions complémentaires peuvent être attendues : la portance dans le cadre de reconstitution de sol en mélange terre-pierres (association de terre fertile et d'un squelette minéral) dont les propriétés mécaniques peuvent par exemple répondre à des usages de stationnement de véhicules ; l'infiltration dans le cadre de reconstitution de sol de noues d'infiltration. Les sols fertiles sont reconstitués sur le modèle de sols naturels par superposition d'horizons favorables au développement racinaire. Chacun des horizons présente donc des propriétés physico-chimiques variables, adaptées pour répondre aux différents objectifs de sols support de végétation. La norme NF U 44-551 définit en ce sens des types de matériaux selon leur teneur en matière organique telles que la « terre végétale » et la « terre support ». La fertilité des matériaux pédologiques excavés peut être améliorée notamment par des amendements organiques (par exemple : compost) qui ont montré de nombreux bénéfices, entre autres, sur la stabilité des agrégats, la disponibilité des nutriments et l'activité microbienne. Dans le cadre de prestations paysagères commandées par les grands aménageurs publics ou privés, les acteurs des métiers du paysage se réfèrent en France aux préconisations techniques regroupées dans deux documents de référence de la filière du Paysage : le fascicule 35 du CCTG et les règles professionnelles de l'UNEP.

Les éléments techniques relatifs à l'ingénierie pédologique à destination des aménageurs décrivent les différentes étapes de construction de sols à partir de matériaux pédologiques (Anthrosols reconstitués).

#### Définition :

« Les anthrosols reconstitués résultent de l'utilisation de matériaux pédologiques excavés puis mis en place sur la zone à renaturer. Les anthrosols construits résultent de l'utilisation de mélanges de matériaux anthropiques recyclés. »



Dans le contexte de mise en œuvre des lois « Anti-gaspillage pour une économie circulaire » (AGEC) du 10 février 2020 et « Climat et Résilience » du 22 août 2021, la réutilisation de terres excavées pour la reconstitution de sols sur l'emprise de projets d'aménagement urbain devient un enjeu de premier plan pour préserver et valoriser les ressources pédologiques non renouvelables. La complexité de la réutilisation de ces ressources repose sur le statut de déchet

<sup>14</sup> Colombano S., Saada A., Guerin V., Bataillard P., Bellenfant G., Beranger S., Hube D., Blanc C., Zornig C., Girardeau I., Quelles techniques pour quels traitements – Analyse coûts-bénéfices, 2010

<sup>15</sup> Bert V., Hadj-Sahraoui A., Leyval C., Fontaine J., Ouvrard S., Les phytotechnologies appliquées aux sites et sols pollués, Etat de l'art et guide de mise en œuvre, 2012

<sup>16</sup> Guide de valorisation hors site des terres excavées issues de sites et sols potentiellement pollués dans des projets d'aménagement (DGPR – 2020). Guide de valorisation hors site des terres excavées non issues de sites et sols pollués dans des projets d'aménagement (DGPR – 2020).

des terres excavées qui conditionne leur revalorisation. L'arrêté du 4 juin 2021 fixe ainsi les critères de sortie du statut de déchet pour les terres excavées ayant fait l'objet d'une préparation en vue d'une utilisation en aménagement. Deux guides précisent les obligations sur la qualité des terres excavées et sur les usages autorisés

pour une telle qualité. L'évolution réglementaire récente ouvre, voire favorise, de nouvelles possibilités pour les acteurs de l'aménagement afin d'améliorer leur bilan d'aménagement, tant sur le plan économique que sur le plan environnemental.

## ZAC des Deux Rives : Retour d'expérience de réhabilitation et reconstruction de sols



*Sols désartificialisés puis reconstitués à partir des alluvions naturelles enfouies du site au sein de la ZAC des deux rives à Strasbourg, © Sol Paysage*

La ZAC des Deux Rives à Strasbourg fournit un retour d'expérience de référence de réhabilitation et de reconstitution de sols dans le cadre d'un projet d'aménagement paysager. Un plan guide de réemploi des terres excavées en économie circulaire a été établi pour valoriser les ressources pédologiques présentes sur l'emprise de la ZAC (74 ha) enfouies depuis des décennies sous un à plusieurs mètres de remblais liés aux anciennes occupations. Cette démarche propose une véritable innovation de gestion de sols contaminés en contexte de sites et sols pollués, dans le respect de la norme de service NF X 31 620.

Le projet prévoit l'aménagement de logements, de parcs urbains et de plantations sur la voirie d'une ancienne friche industrielle. Les principales attentes du maître d'ouvrage sont, d'une part, de réutiliser l'intégralité des déblais à l'intérieur de la zone du projet ; d'autre part, d'éviter l'approvisionnement de terre végétale extérieure au site, le tout permettant une maîtrise des

coûts et des délais de travaux. Un diagnostic complet a été réalisé afin de construire une approche innovante de valorisation des matériaux. Pour atteindre cet objectif, trois compétences incarnées par 3 bureaux d'études sols constituent un groupement d'assistance à maîtrise d'ouvrage : Archimed (études de pollution des sols), Sol Paysage (études agropédologiques) et Géotec (études géotechniques). Les études environnementales ont débuté en 2016 pour établir l'étude d'impact sur l'environnement. 500 sondages pédologiques ont été décrits et analysés et l'ensemble des données a été mis en commun pour constituer un diagnostic situationnel unique. Les enjeux liés à ce diagnostic sont d'évaluer l'opportunité d'utiliser des sols profonds (alluvions). Les données recueillies ont permis de cartographier avec l'outil SIG les zones nécessitant une mise en conformité sanitaire ainsi que les couches de sol disponibles pour créer de nouveaux espaces verts. Ces cartes constituent un outil d'aide à la décision pertinent pour

optimiser la réutilisation des matériaux d'excavation. La cartographie des sols a conduit à un modèle quantitatif/qualitatif des ressources/besoins en sols et matériaux géotechniques pour constituer la couche de fondation des chaussées. Un bilan confrontant les coûts et les avantages a été réalisé afin de sélectionner les meilleurs itinéraires technologiques compte tenu du contexte.

Les conditions nécessaires à la réalisation d'une telle gestion des terres excavées sont possibles grâce à la sensibilisation de l'aménageur à l'économie circulaire, associée au regroupement des compétences à travers les bureaux d'études impliqués dans la réussite du projet. Par le gain économique et la limitation de l'impact carbone et de l'incidence transport des travaux, la création d'espaces verts urbains offre au futur gestionnaire, l'Eurométropole de Strasbourg, des garanties plus durables de sols fonctionnels, fertiles et dont les usages futurs sont préservés des risques sanitaires liés aux anciennes contaminations, grâce à une ingénierie « éco-pédologique » adaptée au projet.



Reconstitution de sols dans le cadre d'un projet d'aménagement paysager au sein de la ZAC des deux rives à Strasbourg, © Sol Paysage

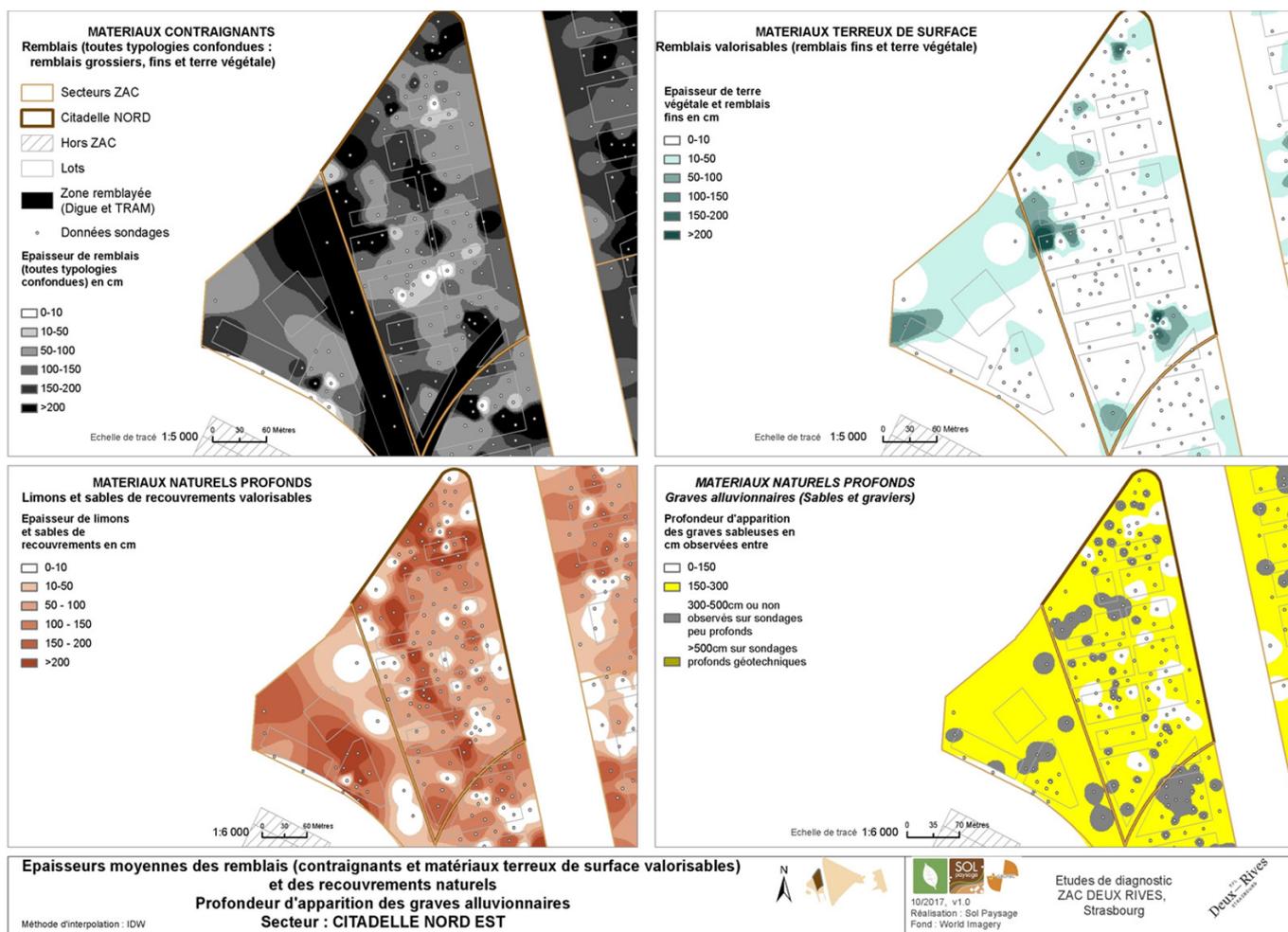


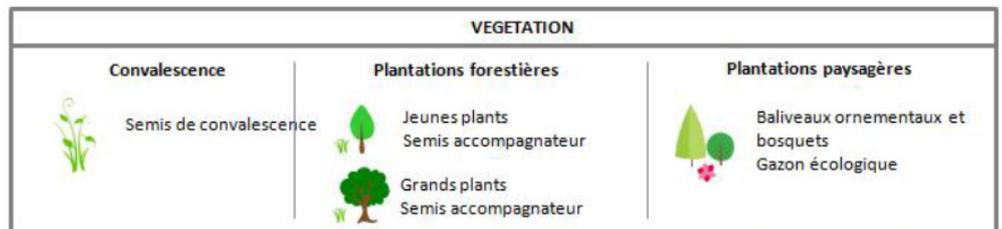
Illustration du bilan des diagnostics agropédologiques, © Sol Paysage

# Des études menées sur la restauration des fonctions des sols

Les bénéfices de la réhabilitation de friche industrielle et des techniques de renaturation utilisées font l'objet d'études. Un projet de recherche a été mené par l'ADEME sur le site de Pierre Bénite, dans la Métropole du Grand Lyon. Localisé en zone SEVESO, en zone péri-urbaine, le substratum est composé essentiellement de remblais d'alluvions entreposés pour élever le niveau des berges et mettre l'autoroute hors de risque d'inondations du Rhône. Pendant un temps, ce site a été occupé par un Lycée technique de BTP. Laissé à l'abandon, la Métropole souhaite le réhabiliter sous forme de zone boisée dans un objectif à long terme de réutiliser cet espace pour un usage récréatif. Sur ce site l'objectif a été d'étudier la restauration des fonctions écologiques d'un sol en fonction des techniques de

réhabilitation/reconstruction utilisées. 6 modalités ont été étudiées :

- M9 : sol « témoin végétalisé » identifié dans une zone où une colonisation végétale spontanée s'est installée depuis une dizaine d'années ;
- M0 : sol témoin sans intervention ;
- M2 : sol dont la surface a été décompactée et a reçu des jeunes plants et un semis ainsi qu'un inoculum microbien (GE : génie écologique) ;
- M1, M3 et M4 : sols construits (Technosols\*) à l'aide de matériaux importés d'autres sites, plus ou moins riches en matière organique et ayant reçu trois types de plantations/semis ainsi que l'inoculum microbien. M1



Présentation des modalités du site de Pierre-Bénite- Hors plan : la modalité M9, témoin végétalisé, située à ~200m des autres modalités, ADEME

Les capacités des sols analysés sont :

- Stockage, recyclage et transformation de la matière organique ;
- Rétention et fourniture des nutriments ;
- Rétention, infiltration et circulation de l'eau ;
- Habitat pour les organismes des sols : La fonction « Habitat pour les organismes du sol » reflète la capacité

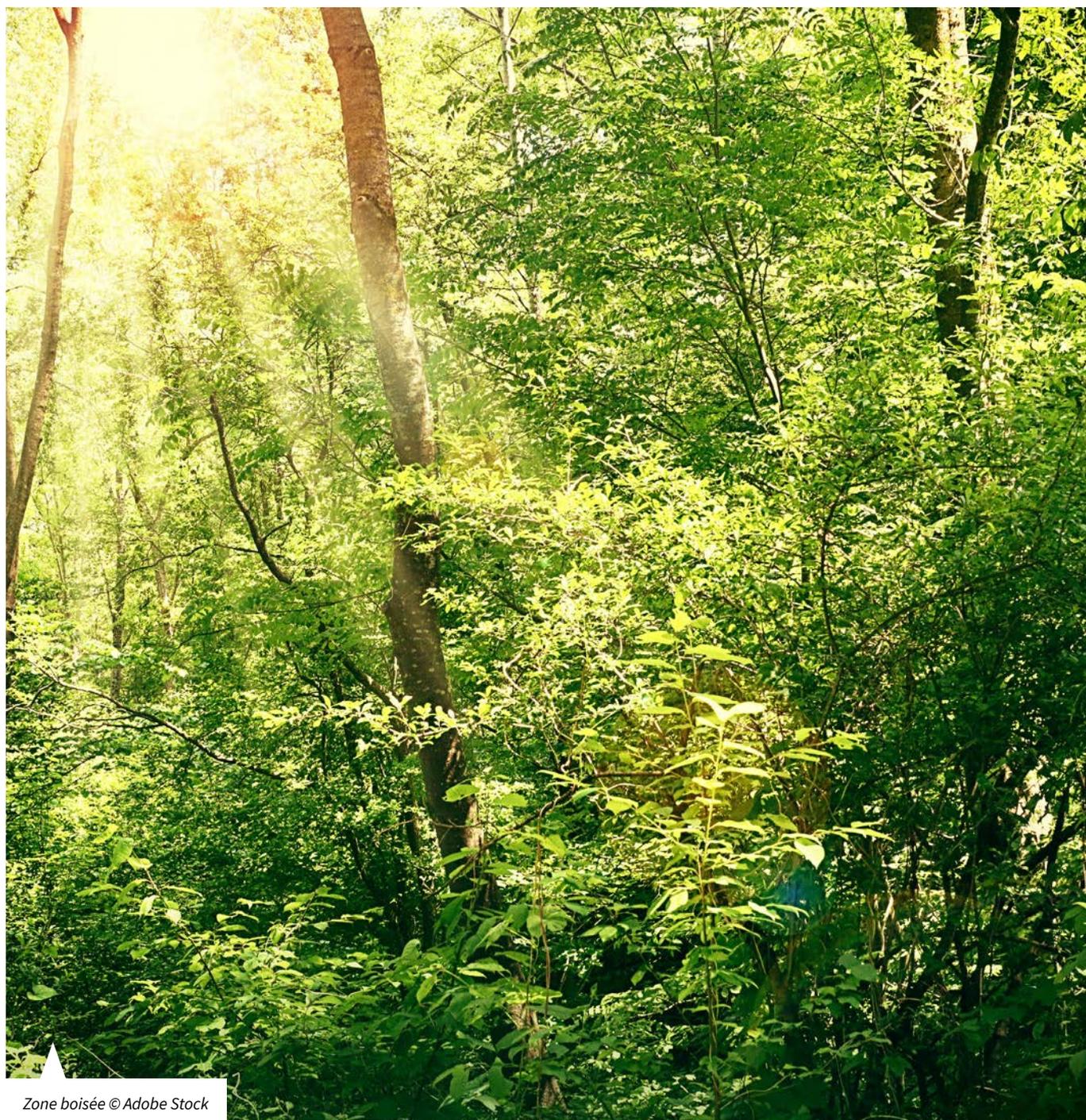
du sol à servir d'habitat viable pour les organismes du sol. Cette fonction dépend de la richesse, de la diversité taxonomique et du fonctionnement des communautés d'organismes du sol. Cette fonction reflète également la capacité du sol à réguler la présence d'espèces dominantes sur les autres communautés d'organismes et induire un déséquilibre dans le fonctionnement biologique du sol.

Les résultats observés sur les différentes modalités du site expérimental de Pierre-Bénite montrent :

- Un effet positif des mesures de réhabilitation 30 mois après leur mise en œuvre dans l'objectif de restaurer les fonctions de stockage de carbone, de fertilité et de rétention d'eau qui sont les fonctions recherchées en vue de la mise en place d'espaces verts. Les sols des modalités M1, M2 et M3 présentent des valeurs relativement élevées pour ces 3 fonctions comparées aux valeurs mesurées sur le sol témoin M0 ;
- Pour la fonction "Habitat pour les organismes du sol", toutes les modalités ont presque atteint des valeurs satisfaisantes comme celles observées sur les technosols de la modalité M3. Le sol témoin M0 assure une fonction

d'habitat mais n'exprime pas les autres fonctions recherchées au regard des enjeux de la reconversion et de l'usage futur envisagé (espace paysager ou espace boisé).

Ainsi dans une démarche de restauration des sols, il n'est pas toujours possible d'améliorer toutes les fonctions afin d'atteindre des conditions optimales pour chacune d'elle. Certaines fonctions peuvent être améliorées alors que d'autres peuvent se détériorer ou a minima être maintenues : on peut notamment penser à la fonction d'infiltration de l'eau qui s'optimise de manière très différente des autres (maximisée pour un sol drainant avec peu de matière organique).



Zone boisée © Adobe Stock

Les caractéristiques spécifiques des sols réhabilités ainsi que le contexte environnemental sont à prendre en compte lors de la sélection des végétaux à planter. Notamment en milieu urbain, car celui-ci est très contraignant. La qualité du sol, l'espace disponible pour le système racinaire, la quantité de lumière, la proximité éventuelle avec des polluants sont autant de paramètres qui influent sur la santé des végétaux. A cela s'ajoute les effets du changement climatique qui ont un impact très important sur les plantes (augmentation des températures, raréfaction de la ressource en eau, etc.).

## La nature des sols réhabilités et les contraintes qui en découlent

La réhabilitation d'un sol peut être effectuée à l'aide de différentes techniques de génie pédologique, comme présenté précédemment (Fiche 5). Chaque technique va induire des caractéristiques différentes pour le sol réhabilité : mécaniques, physiques, chimiques et biologiques.

- Les sols réhabilités à partir de terres excavées, parfois amendées en matière organiques si nécessaire, sont des **sols reconstitués** (ils sont obtenus à partir de matériaux pédologiques). Ils possèdent les caractéristiques physico-chimiques des matériaux parentaux\* (texture, pH, granulométrie...);
- Les sols réhabilités à partir de mélanges de matériaux anthropiques recyclés (béton concassé, déchet de fabrication de brique... mais aussi compost, résidus végétaux...) sont des **sols construits**. Ils ont fréquemment un pH basique, parfois très élevé. La granulométrie des sols réhabilités est fonction de la

taille des matériaux recyclés incorporés, et ces mélanges sont souvent pauvres en argile.

En faisant varier les proportions des différents matériaux d'un mélange, il est possible de modifier ses caractéristiques physico-chimiques pour imiter un sol fertile : bonne porosité en fonction de la texture obtenue, bonne capacité de rétention en eau, teneur en éléments nutritifs et pH convenables. Toutefois, cela se révèle très difficile à réaliser efficacement et précisément, du fait de la diversité des matériaux sources et de leurs interactions.

Dans le cadre de la réhabilitation des sols, il faut veiller à ne pas diffuser des polluants (métaux lourds, plastiques, propagules\* d'espèces exotiques envahissantes comme la Renouée du Japon...). La teneur en éléments polluants détermine les usages possibles du sol et/ou les travaux nécessaires pour le dépolluer.

## La végétation adaptée

Pour choisir correctement les végétaux à mettre en place sur les sols réhabilités, il faut en avoir une connaissance précise : une analyse du sol réhabilité est indispensable. À partir des résultats, il sera possible d'élaborer une palette végétale adaptée aux conditions pédologiques, mais aussi au climat, aux expositions du site, au parti pris esthétique, etc.

Dans un contexte de changement climatique, des outils d'aide à la décision existent pour les projets de plantation d'arbres en ville, comme l'outil Sésame du Cerema, ou ARBOClimat de l'ADEME. Dans certains cas, lorsque le sol réhabilité présente un pH trop alcalin, il sera plus difficile de trouver des plantes qui tolèrent ces conditions. Une solution peut être de laisser la flore

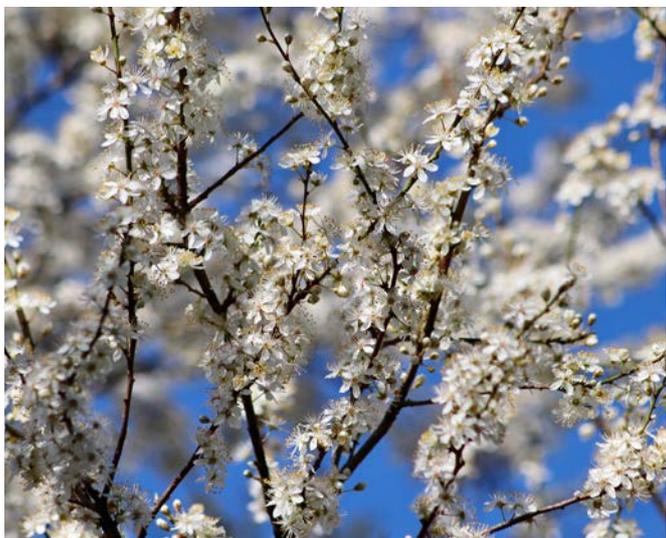


Flore spontanée © Christian Aussaguel

<sup>17</sup> Cf. le programme Siterre de Plante & Cité, et le livre *Créer des sols fertiles : Du déchet à la végétalisation urbaine*. Olivier Damas (coord.), Anaïs Coulon (coord.), 2016. Editions Le Moniteur, Antony, 336 p.

spontanée coloniser le milieu, puis d'intervenir lors de travaux d'entretien pour la gestion de la végétation. La méthodologie de gestion pourra alors s'employer à sélectionner les espèces ayant un intérêt écologique et paysager, à éliminer notamment les espèces exotiques envahissantes, etc.

Le choix des végétaux doit également prendre en compte les fonctions souhaitées pour le site. Végétaliser un espace récréatif ne correspond pas toujours à des



Prunellier © Pixabay

Dans le cas des sols réhabilités pour la production de végétaux destinés à la consommation humaine, par exemple dans un potager, il est indispensable de veiller à ce que le sol ne contienne pas d'éléments (métaux lourds, hydrocarbures, autres polluants) qui puissent être fixés par les plantes et ensuite ingérés par l'homme. Si tel est le cas, et que le choix est fait de maintenir le projet, une dépollution doit être envisagée, ou le sol doit être remplacé. Dans ce dernier cas, le sol sain ne doit évidemment pas être en contact direct avec le sol pollué en place.

Dans le cas d'un sol réhabilité pollué, un programme de phytoremédiation peut être mis en place. Le choix des végétaux se portera alors sur des espèces capables de capter les polluants visés ou de les dégrader. Les plantes présentant des taux de polluants fixés trop importants doivent être éliminées dans des filières spécialisées. Cette technique n'est pas utilisable pour un traitement à court terme et peut prendre des dizaines d'années (voir Fiche 5). Par exemple, des semis de Poacées mélangées à des Fabacées contribuent au traitement des pollutions organiques. Le tissu racinaires et l'apport en azote vont favoriser la porosité du sol et l'activité des micro-organismes qui vont alors dégrader les molécules organiques. Si la pollution est métallique, et en fonction des usages futurs

objectifs de renaturation pour la biodiversité. Les usages et la fréquentation vont également conditionner les besoins en entretien (espace récréatif) ou de gestion (espace plus naturel). Si le propriétaire du site souhaite mettre en défend (rendre non accessible), éviter ou réduire la fréquentation du lieu, des plantations arbustives denses (égantier, aubépine, prunellier, ...) ou bien des plantations forestières sont à préconiser.

souhaitait, il est possible d'implanter :

- Des espèces hyper-accumulatrices à fort développement pour extraire la pollution comme la Moutarde indienne, l'Avoine élevée, la Houllque laineuse et le Saule des vanniers, etc. ;
- Des espèces polluo-tolérantes qui supportent les terrains pollués, qui sont capables de recouvrir les sols sans disperser la pollution et produisent une biomasse réduite.

En fonction des degrés de pollution et de la nature de/des ETM (éléments traces métalliques) présent(s), les sols pollués seront ensemencés avec des métalphytes absolues (Armérie de Haller, Arabette de Haller, Tabouret calaminaire, Pensée calaminaire, Alsine calaminaire, Ibéride intermédiaire), au contraire si les sols sont faiblement pollués avec des pseudo-métallophytes qui accumulent peu d'éléments traces métalliques (Lotier corniculé) ou avec des métal-to-lérantes qui n'en accumulent pas (Agrostide commune, Fétuque rouge, Silène enflé).

## Phytostabilisation des Avinières par des plantes autochtones

La commune de Saint-Laurent-Le-Minier est une zone naturellement riche en métaux. Le site des Avinières a été exploité jusqu'en 1914, principalement à ciel ouvert<sup>18</sup>. Afin de stopper les envols de poussière ainsi que l'érosion par le ruissellement, la technique retenue a été la phytostabilisation. La topographie accidentée ne permettait pas de mettre en œuvre des solutions classiques de confinement. Les teneurs importantes en éléments traces métalliques des sols et la pauvreté en nutriments des haldes\* ne permettaient pas la croissance des

espèces du commerce. Ce sont donc des espèces métallicoles autochtones du site, qui ont développé une résistance aux métaux, qui ont été choisies. Plusieurs espèces ont été impliquées : des Poacées\*, Brassicacées\* et Fabacées\*, ... Ces dernières ont été sélectionnées pour enrichir naturellement le sol en azote. Les plantes métallicoles ont été mises en culture dans une pépinière in-situ (sur site) afin de récupérer les graines nécessaires à la végétalisation et mettre en sécurité un peu plus d'1 ha de sol.



Avoine élevée © Adobe Stock

<sup>18</sup> Société géologique de France, *Avenia*, *Géologues, Géosciences et Société*, mars 2022, numéro 212, p68-75

Les caractéristiques spécifiques des sols réhabilités ainsi que le contexte environnemental sont à prendre en compte lors de la sélection des végétaux à planter. Notamment en milieu urbain, car celui-ci est très contraignant. La qualité du sol, l'espace disponible pour le système racinaire, la quantité de lumière, la proximité éventuelle avec des polluants sont autant de paramètres qui influent sur la santé des végétaux. A cela s'ajoute les effets du changement climatique qui ont un impact très important sur les plantes (augmentation des températures, raréfaction de la ressource en eau, etc.).

## La biodiversité (extra)ordinaire des friches

### Des sols modifiés à l'origine d'une flore et d'une faune particulières

Les friches et délaissés\* sont caractérisés par des espaces fortement minéraux (remblais, pavés, gravats, ballasts, zones remblayées de cailloux, bétons concassés, anthroposols, etc). Ils accueillent des espèces dites rudérales (de rudus : ruines, décombres) sur sols plus ou moins naturels et également une flore thermophile (appréciant la chaleur) comme les molènes, panais, millepertuis, vipérine, diplotaxis, Saxifrage tridactyle, Centranthe rouge, Laitue des murs, Linaire commune... La présence de sols perturbés voire pollués sélectionne des espèces spécifiques parfois rares, patrimoniales ou protégées. C'est le cas des plantes qui se développent sur des sols riches en métaux lourds et qui composent les pelouses dites calaminaires.

Au sein des friches se développent des boisements de saules, de peupliers et de bouleaux ainsi que des

arbustes qui peuvent donner aux lieux un caractère progressivement boisé. Ses jeunes boisements et fruticées sont appréciés des passereaux courants ou moins courants (comme les rousserolles, Fauvette grisette et Pouillot fitis, par exemple). Ces espaces fortement modifiés par l'être humain peuvent également être colonisés par des espèces exotiques envahissantes (EEE) telles que la Renouée du Japon ou bien le Buddleja de David. En fonction de leurs tailles, localisations, âges et natures de sols, les friches peuvent ainsi accueillir une mosaïque de végétations : friches sèches patrimoniales (avec des espèces patrimoniales ou protégées), rudérales ou boisées, voire des zones humides.



Des friches aux milieux divers © Guillaume Lemoine

La faune apprécie la tranquillité des friches peu ou non accessibles et investit ces espaces aux milieux divers. Notamment, sont présentes des espèces inféodées aux milieux secs à faible végétation comme un criquet appelé Oedipode turquoise ou des abeilles solitaires. Le bâti délaissé peut également être occupé : Lézard des murailles, Faucon crécerelle, gravelots, hirondelles, murins... des espèces protégées qu'il faut prendre en compte lors de la reconversion.

Des travaux en écologie urbaine ont montré que les friches sont essentielles au maintien de la biodiversité urbaine car elles abritent des communautés riches en espèces<sup>19</sup>. Sur 17 friches faisant un total de 26,8 ha, suivies en Seine-Saint-Denis dans le cadre du projet de recherche Wasteland, 379 espèces de plantes, 42 espèces d'oiseaux et 17 espèces de papillons furent recensées. Comparées avec les données de l'observatoire départemental de la biodiversité urbaine, les 17 friches étudiées accueillent une biodiversité qui représente un tiers de la biodiversité végétale totale observée dans l'ensemble du département. Ces résultats montrent la place importante que jouent les friches comme réservoirs de biodiversité dans ce département très urbain. Les friches urbaines, même si elles peuvent accueillir des espèces exotiques envahissantes sont souvent plus riches en espèces et en biodiversité que les parcs urbains et jardins voisins, qui accueillent des communautés faunistiques et floristiques différentes et probablement complémentaires. Il apparaît donc clairement pour certains auteurs que les politiques de densification urbaine qui encouragent une politique vertueuse de recyclage des friches à la place de l'étalement urbain ont des conséquences négatives sur la biodiversité urbaine<sup>20</sup>.



Oedipode turquoise sur sol caillouteux © Guillaume Lemoine



Murin dans un bâti délaissé au sein d'une friche © Guillaume Lemoine

<sup>19</sup> Muratet A., Shawart A., Fontaine C., Baude M., Pellaton M. Et Muratet M., 2011 - Terrains vagues en Seine-Saint-Denis, Plaine Commune et Naturparif, 16p

<sup>20</sup> Bonthoux S., Brun M., Di Pietro F. & Greulich S., 2014 - How can wastelands promote biodiversity in cities ? A review. Landscape and Urban Planning, 132 (2014), 79-88

## Une biodiversité à prendre en compte

Il est donc nécessaire d'effectuer des diagnostics écologiques sur l'ensemble des friches afin d'identifier les enjeux en termes de biodiversité. La réalisation d'un Atlas de la Biodiversité Communale est une opportunité afin d'acquérir des données naturalistes et de mieux connaître la faune et la flore de son territoire. L'analyse des enjeux permettra d'orienter les usages à attribuer aux différentes friches. Les espaces les plus riches en espèces ou abritant des espèces patrimoniales et protégés sont à préserver. Ils peuvent faire l'objet d'un projet de parc urbain écologique prenant en compte la faune et la flore présentes : préservation de la végétation en place et de la diversité d'habitats, conservation de zones non accessibles au public, pose de ganivelle et de platelage, mise en place d'une gestion écologique... Comme vu précédemment, certains sols pauvres et secs, constitués de remblais, sont favorables à l'installation d'espèces particulières dites xéro-thermophiles. Il est

donc intéressant de préserver de tels milieux même si leur esthétique ne fait pas l'unanimité auprès des usagers. Des actions de sensibilisation permettent de comprendre l'utilité de préserver de tels espaces. Les friches présentant peu ou pas d'enjeu pourront faire l'objet d'opération d'aménagement favorisant l'installation du bâti sur les zones déjà minéralisées et préservant des espaces de pleine terre. Dès les actions de démolition prévues sur une friche, il est possible de préserver l'existant : en évitant le passage des engins sur les espaces de nature par une mise en défens, en conservant les arbres présents, en transplantant les jeunes arbres au sein de pépinières en vue de leur utilisation future dans le cadre d'un projet... Aux aménageurs ensuite de concevoir le projet en conservant ce qui a été préservé.



Mise en défens d'une pelouse sèche © Guillaume Lemoine



Arbres transplantés en pépinière dans l'attente d'une future utilisation © Guillaume Lemoine

# Le traitement des friches par des opérations de végétalisation

Une fois les démolitions effectuées au sein d'une friche industrielle, le sol présent à la place du bâti est nu. Pour valoriser ces espaces et favoriser la biodiversité ordinaire, il est possible de les végétaliser. Le site peut rester en attente d'un projet d'aménagement 5 ans parfois 10. Comme vu précédemment, une friche qui se végétalise spontanément peut être colonisée par des ligneux, qu'il faudra prendre en compte lors des travaux

d'aménagement (défrichage, broyage ou mise en pépinière) et des espèces exotiques envahissantes qu'il faudra gérer également. La création de prairies fleuries, composées de plantes à fleurs très attractives pour les pollinisateurs, contribue au maintien de la biodiversité ordinaire en ville, limite les coûts de gestion et restaure les sols.

## Ensemencement des sites de l'Etablissement Public Foncier des Haut-de-France

Depuis 7 ans, l'EPF Hauts-de-France pratique l'ensemencement des sites dont il a la charge dès la fin des travaux de démolition. Les mélanges implantés sont de deux types et varient en fonction de la vocation de l'espace à requalifier. Lorsque les terrains sont voués à la constitution de « cœur de nature » définitifs dans la trame verte urbaine, l'installation de pelouses sèches et de prairies peu fertiles est privilégiée, surtout lorsqu'il s'agit de tirer parti de la pauvreté agronomique des sols et des « champs de cailloux » présents (gravats issus de la démolition). Les espèces de prairie, notamment thermophiles, sont choisies dans la flore régionale et sont d'origine régionale certifiée. Dans d'autres cas, nettement plus nombreux, sur les sites en portage court qui vont rapidement repartir à l'urbanisation, ce sont des couverts à base de fabacées\* qui sont installés afin de couvrir au plus vite les sols, de réduire les coûts de gestion et d'en augmenter l'acceptation sociale. Les espèces choisies sont très fleuries, colorées, bien couvrante et de faible croissance comme le Trèfle blanc, le Lotier corniculé en mélange avec de petites graminées comme des fétuques. Lorsque les sites sont plus grands, luzerne, Anthyllide vulnérable et sainfoin complètent la gamme.

L'utilisation massive des fabacées, seules ou en mélange avec des astéracées\* et apiacés\* sur l'ensemble des sites traités, a pour but de venir en aide aux invertébrés de l'espace urbain comme les lépidoptères, les orthoptères et plus particulièrement les hyménoptères anthophiles. Ces espèces végétales sont très attractives pour les hyménoptères dont certains sont menacés en Europe et en France (bourdon et Megachilidae). Les ensemencements, suivis pour mesurer leur intérêt pour la faune sauvage (invertébrés principalement) ont permis l'observation de nombreuses espèces d'apoïde dans les genres *Bombus*, *Osmia*, *Anthidium*, *Megachile*... Les actions de l'EPF entrent dans les plans d'actions en faveur des pollinisateurs sauvages.

Ces friches en attente de remobilisation sont amenées à disparaître. Toutefois, cela doit se faire sans forts impacts écologiques pour les espèces qui ont été momentanément favorisées dans les espaces ensemencés, déconstruits et transitoirement disponibles. Cela n'est possible que si le territoire offre, à proximité, d'autres espaces qui vont pouvoir les accueillir. Mieux encore, l'aménageur peut préserver une



Ensemencement du site de Saint-Liévin, Watrelos, EPF Haut-de-France  
© Guillaume Lemoine

partie des prairies ensemencées dans la conception du projet lors de la reconversion du site. Outre leur bénéfice pour la biodiversité, ces actions de végétalisation dirigée présentent d'autres types d'intérêts : elles contribuent à l'amélioration du cadre de vie, de l'image du quartier et permettent de lutter contre la formation d'îlots de chaleur urbains. Les mélanges à base de Poacées et Fabacées implantés participent à la dégradation d'éventuelles pollutions organiques résiduelles (voir fiche 5).

## Projet de parc urbain : reconvertir les friches en préservant leur biodiversité, exemple du parc Péru à Auby

C'est à Auby, commune de 79 621 habitants située dans le Douaisis (département du Nord), que se trouve le parc Péru. D'une surface d'environ 2 hectares, celui-ci présente la particularité d'accueillir un habitat naturel particulier : des pelouses dites calaminaires qui ne se développent que sur des sols à haute teneur en zinc<sup>21</sup>. Les pelouses calaminaires représentent un habitat rare et exceptionnel, mentionné dans l'annexe 1 de la directive européenne "habitats-faune-flore", pour la protection duquel les États de l'Union européenne sont tenus de s'engager. La découverte de cet habitat botanique dans le périmètre du parc Péru a conduit la Commune d'Auby à entreprendre une réhabilitation ambitieuse et originale. Ce projet a consisté d'un côté à la restauration et à la protection de cette flore exceptionnelle et de l'autre à la reconversion et dépollution d'une partie du parc en espace public de proximité, avec équipements de loisir, pour les habitants du quartier.

L'existence d'un paradoxe réglementaire entre obligation de dépollution et obligation de conservation, a engendré la nécessité de clarifier les enjeux réglementaires, urbains, paysagers et environnementaux du parc et de les expliquer aux habitants dans le cadre d'une démarche ambitieuse d'information et de concertation. Les acteurs locaux ont pris conscience que la dépollution programmée avec excavation des terres et leur mise en décharge allait détruire un patrimoine exceptionnel (pelouses

calaminaires) pour le remplacer par une pelouse urbaine sur terres agricoles apportées pour la circonstance... Une négociation avec l'État a permis d'envisager le maintien de la pelouse calaminaire alors que sa destruction était programmée (suite à une obligation préfectorale de remédiation faite à l'entreprise métallurgique encore présente à proximité). L'ensemble des acteurs ont alors décidé de préserver la partie la plus riche de la pelouse calaminaire (1.1 ha environ) du parc Péru. Pour faire accepter la protection du site, une importante concertation a été mise en œuvre par la ville dans le cadre d'un partenariat avec le conseil d'architecture, d'urbanisme et d'environnement (CAUE) du Nord et le Département du Nord. Lors de cette campagne d'information furent organisés des visites guidées, des ateliers de quartier, la rédaction d'une charte de bons usages du parc et des animations scolaires.

Il semblait également important de faire reconnaître ces pelouses calaminaires comme "un patrimoine" naturel, ainsi qu'une partie du patrimoine de l'histoire industrielle et de l'identité du quartier. Cela a permis d'assurer la protection sur le long terme et de développer des opérations de gestion et de restauration écologique. Ce patrimoine naturel exceptionnel est aujourd'hui classé intégré au réseau Natura 2000.



Pelouses calaminaires du Parc Péru, à Auby © Guillaume Lemoine

<sup>21</sup> Lemoine G., De l'importance des pelouses calaminaires d'Auby et notamment du Parc Péru, Bull. Soc. Bot. N. Fr., 2012, 65 (1-4) : 51-58



*Pelouses calaminaires du Parc Péru, à Auby © Guillaume Lemoine*

## Outils et subventions pour le recyclage des friches

Les friches représentant un gisement foncier d'intérêt pour lutter contre l'artificialisation des espaces naturels, agricoles et forestiers mais peuvent être également des espaces à préserver de par la biodiversité qu'elles accueillent. Plusieurs outils sont disponibles pour identifier les friches présentes sur un territoire, demander un accompagnement ou bien pour étudier les bénéfices de la réhabilitation. En voici quelques-uns :

- **Cartofriche** : C'est une application conçue pour recenser les friches (industrielles, commerciales, d'habitat...). Mise en ligne par le Cerema à la demande du Ministère de la Transition écologique, elle aide les collectivités et l'ensemble des porteurs de projets à localiser et caractériser les friches pour les réutiliser et ainsi réduire l'artificialisation des sols (CEREMA). Des informations sur le type de sol, l'existence d'une pollution ou bien la présence de bâti peuvent être communiquées mais aucun critère ne précise les enjeux biodiversité sur le site ;
- **Bénéfriches** : L'ADEME a développé l'outil Bénéfriches pour aider collectivités et aménageurs à mesurer les retombées économiques, sociales et environnementales de la réhabilitation de friches, comparée à l'extension sur des terres agricoles. « Bénéfriches permet de comparer le rapport coûts/bénéfices d'un même projet dans deux endroits, mais aussi de deux scénarii d'aménagement sur un même site, ou encore l'intérêt de restaurer ou de ne rien faire sur une friche donnée » (Laurent Chateau, coordinateur national « friches » à l'ADEME). C'est une évaluation des services écosystémiques rendus qui sont évalués dans l'onglet « effets environnementaux de l'étalement urbain » comme les effets en termes de régulation du risque inondation ou bien l'effet pollinisation lié à la présence de nature ;
- **UrbanVitaliz** : Il s'agit d'un service public gratuit. Il répond aux questions et aux blocages des collectivités dans le recyclage de leurs fonciers artificialisés (construits, bétonnés, pollués)

qui ont perdu leur usage. Le suivi des dossiers friche est assuré par les urbanistes de l'équipe ainsi que par les acteurs publics locaux (selon les territoires : DDT(M), DREAL, EPF...).

Ces outils peuvent aider à mener à bien un projet de reconversion de friches. Toutefois, ils ne permettent pas d'avoir une appréciation des enjeux biodiversité présents sur le site ou bien des bénéfices que pourrait apporter le projet. Il est donc important de faire réaliser un diagnostic écologique (inventaire naturaliste) afin de bien prendre en compte les espèces faunistiques, floristiques, fongiques et les habitats à la fois dans sa recherche de foncier et ensuite dans la conception du projet.

Par ailleurs, le Gouvernement a déployé un fond pour financer des opérations de recyclages des friches. Sont financés :

- le recyclage des friches et la transformation de foncier déjà artificialisé (acquisition, dépollution, démolition), dans le cadre d'opérations d'aménagement urbain ;
- la reconversion de friches polluées issues d'anciens sites industriels ICPE ou sites miniers, dans le cadre d'un appel à projet de l'ADEME.

3 éditions ont déjà eu lieu de 2020 à 2022, représentant 1311 lauréats. Ces subventions permettent notamment de réaliser des projets de reconversion vertueux en termes de prise en compte de la biodiversité.

Les collectivités territoriales peuvent également faire appel aux Etablissements Publics Fonciers (EPF) en amont des projets d'aménagement. Opérateurs publics de l'Etat, les EPF acquièrent des terrains en vue de leur aménagement et interviennent tel des recycleurs de foncier. Ils participent à la transformation des territoires en réalisant le cas échéant les travaux de déconstruction et de traitement des sources de pollution concentrée. Les traitements mis en place sont choisis en fonction de paramètres techniques, financiers et de temporalité.

## Fiche 8 :

# Quels bénéfices pour la biodiversité ?

**Si un habitat naturel ne pourra jamais être recréé ou restauré à l'identique, la réhabilitation et la renaturation de sols pollués ou dégradés peut avoir des bénéfices importants pour la biodiversité : renforcement des continuités écologiques, réhabilitation en milieu spécifique comme les zones humides ou de milieux bocagers... La réhabilitation et la renaturation d'un milieu dégradé peut entraîner la restauration de plusieurs habitats.**

*Avant toute action, il est essentiel de réaliser un diagnostic écologique (inventaires naturalistes) afin de prendre en compte les espèces présentes sur le site et de privilégier l'évitement en cas d'enjeux en termes de biodiversité.*

## Comment mesurer les bénéfices pour la biodiversité des sols ?

Les bénéfices d'actions de gestion ou de génie pédologique pour la biodiversité des sols peuvent être évalués grâce à l'utilisation de bioindicateurs. Il s'agit d'organismes permettant d'identifier et de quantifier des perturbations de leur milieu via par exemple une modification de leur abondance, richesse, ou encore structure de communautés. Les bioindicateurs se caractérisent entre autres par leurs corrélations aux fonctions de l'écosystème mais aussi leur opérationnalité et l'existence d'un référentiel d'interprétation. Le sol fournit des habitats de tailles variées, de l'agrégat au profil de sol en passant par la motte, et abrite en conséquence une pédofaune et donc des bioindicateurs de tailles variées. Cette faune contribue au fonctionnement du sol à différentes échelles et l'utilisation conjointe de bioindicateurs représentatifs de la micro-, méso-, et macrofaune permet d'obtenir une information relativement complète de l'état et du fonctionnement de l'écosystème sol.

Un exemple concret et opérant consiste à évaluer en parallèle les microorganismes (microfaune), les nématodes (mésafaune), et

les lombriciens (macrofaune). En effet, la biomasse microbienne mesurée par fumigation constitue un indicateur sensible aux contaminations métalliques, aux pratiques culturales et usages du sol, renseignant également sur la fonction « habitat » du sol. Il fournit une réponse globale intégrant l'ensemble des perturbations. L'analyse de la nématofaune (abondance et diversité des différents groupes fonctionnels) permet quant à elle de calculer des indices traduisant la qualité du réseau trophique ou encore les voies dominantes de minéralisation de la matière organique. Enfin, l'analyse des communautés lombriciennes (abondance, biomasse, richesse taxonomique, structure de communautés) traduit le bon fonctionnement biologique global du sol. En effet, en tant qu'espèces clés de voûte, les fortes valeurs d'abondances totales et d'abondances des catégories écologiques lombriciennes (épigés, anéciques, endogés) renseignent notamment une bonne capacité de résilience du milieu.



*Prélèvements d'échantillons de sol pour les analyses microbiennes et nématofauniques (à gauche; © Sol Paysage) et test bêche pour l'échantillonnage lombricien (à droite; © Université de Rennes 1)*

Récemment, un travail de thèse<sup>22</sup> a mis en évidence les impacts de la reconstitution d'Anthrosols d'1.50 m de profondeur sur les communautés lombriciennes, 4 ans et 20 ans après leur mise en œuvre. Les résultats montrent, après 4 ans, des abondances similaires à celles de prairies naturelles mais une large prédominance de la catégorie écologique endogée traduisant un impact négatif du processus d'ingénierie pédologique (e.g., décapage, remise en place de terres excavées) sur la structure des communautés. Après 20 ans, les communautés lombriciennes semblent être impactées par l'interaction du processus d'ingénierie impliquant une reconstitution de l'ensemble du profil de sol et par l'isolement des sols par rapport à un sol réservoir. Ainsi, pour un même type d'Anthrosol, les communautés lombriciennes sont fortement dégradées (faible abondance,

absence de 2 catégories écologiques) dans les sols isolés totalement entre deux routes, tandis que les communautés de sols séparés d'un potentiel réservoir par une simple piste cyclable sont par comparaison significativement améliorées (abondance élevée, présence des trois catégories écologiques). Au contraire, dans le cas d'une ingénierie pédologique moins impactante sur les sols naturels initiaux (i.e., décapage superficiel puis reconstitution partielle du profil de sol), l'isolement des sols n'impacte pas la structure des communautés lombriciennes, probablement restaurées à partir du pool d'espèces préservées dans la partie du sol non impactée par les travaux. Cette thèse met en évidence les impacts contrastés des processus d'ingénierie pédologique et de la conception d'un projet paysager sur les fonctions de réservoir de biodiversité lombricienne.

## Renaturation de site et création de nouveaux habitats

La cessation d'activité d'une installation classée pour la protection de l'environnement nécessite la mise en sécurité puis la remise en état du site. Des travaux de dépollution importants peuvent alors avoir lieu au sein de ces sites (suite à de fortes teneurs en polluants, une pollution profonde, ...), de même pour des friches fortement polluées et laissées à l'abandon pendant plusieurs années. La biodiversité du site est alors à prendre en compte lorsque les travaux sont nécessaires ou obligatoires. En présence d'espèces protégées et d'impacts sur celles-ci (destruction d'individus et/ou d'habitats d'espèces), une demande de dérogation « espèces protégées » doit être effectuée. Des mesures compensatoires doivent alors être mises en œuvre. Après gestion de la pollution, des actions de renaturation sont alors réalisées.

L'entreprise Terzéo, situé sur les communes de Villenoy et d'Isles-lès-Villenoy (Seine-et-Marne), s'est installée sur une friche industrielle de 64 ha polluée à l'arsenic (ancienne sucrerie comprenant des bassins). La pollution a été contenue et le site

renaturé. Un milieu bocager, des bassins et une forêt ont été restaurés, et une lande a été créée. Le site présente un intérêt notable pour l'avifaune. L'assèchement progressif des anciens bassins et la présence du Grèbe à cou noir (et de nombreuses autres espèces d'oiseaux d'eau) a amené la LPO Ile-de-France à animer un partenariat avec Terzéo pour la préservation de ces espèces depuis 2015. La LPO a contribué à l'élaboration du phasage des travaux, des mesures compensatoires et aménagements futurs, et assure le suivi naturaliste du site.

Terzéo, qui exploite une installation classée de tri et de valorisation de terres issues du chantier du BTP, associée à une installation de stockage type ISDD (Installation de Stockage de Déchets Dangereux), a pris en charge la dépollution. Les terres polluées ont été confinées et couvertes à l'aide d'une membrane étanche. Une unité de pompage et traitement des lixiviats confinés pour traiter l'arsenic qu'ils contiennent complète le dispositif.



Image du site en cours de renaturation après travaux de dépollution

<sup>22</sup> Maréchal, J. 2022. « Sols fertiles et Trame Brune en milieu urbain : Impacts de l'ingénierie pédologique sur les sols et les communautés lombriciennes ». Thèse CIFRE (Université de Rennes 1 / Sol Paysage) spécialité écologie.

### *Les mesures compensatoires*

Afin que l'Œdicnème criard ne s'installe pas sur les zones en travaux, des bâches ont été disposées sur l'alvéole de sable du sarcophage. Pour recréer un habitat favorable à cette espèce, l'espace a ensuite été chaulé afin de limiter la pousse de végétaux. Une couverture sablo graveleuse viendra couvrir cet espace en finition.

Le bassin a été nivelé avec une profondeur de 0 à 2m50 en pente douce. Une digue de 15 cm sous le niveau d'eau de 600 m<sup>2</sup> est tracée entre les bassins à l'aide de terres riches en rhizomes d'hélophytes prélevés sur un autre bassin. La partie nord du bassin est recouverte par des matériaux limoneux riches en rhizomes d'hélophytes. La partie sud est aménagée avec des matériaux graveleux drainants.

La végétalisation de la jachère permet également aux espèces de disposer d'une zone prairiale ouverte exploitée sans utilisation de produits phytosanitaires. Concernant la flore, la plantation de diverses espèces locales est importante mais la recolonisation par la flore spontanée peut davantage enrichir le milieu tout en essayant de contenir les espèces invasives telles que le Datura, Buddleia ou la Renouée de Virginie.

### *Suivi naturaliste*

Depuis les travaux, le Grèbe à cou noir a bien été maintenu sur le site ainsi que l'Œdicnème criard. Sont aussi nicheurs sur le site le Grèbe castagneux, la Sterne Pierregarin qui s'est reproduit sur le petit îlot, et le Grand et Petit Gravelot qui se sont reproduits sur les berges. La végétation rivulaire accueille une colonie de Chardonnerets élégants ainsi qu'un petit groupe de Bruants des roseaux. La colonisation piscicole et batracienne s'est faite naturellement. Des odonates (demoiselles et libellules) ont investi les lieux.

Référents projets : Terzéo : Amaury Cudeville / LPO Ile-de-France : Marine Cornet, Jean-Pierre Lair, Alain Planchon (suivi)



Œdicnème criard sur le site de Terzéo © Alain Planchon

## Fiche 9 : Des ressources pour aller plus loin

L'importance des sols dans la préservation de la biodiversité	La protection juridique des sols	Préserver les sols à l'échelle du territoire	Préserver les sols dans le cadre d'un projet d'aménagement
<p>L'origine du monde, une histoire naturelle du sol à l'intention de ceux qui le piétinent, Marc-André Selosse, 2021</p> <p>Focus sur la trame brune : Biodiversité des sols et continuités écologiques, conférence de Daniel Cluzeau, 2018 <a href="https://cutt.ly/yCEDCsU">https://cutt.ly/yCEDCsU</a></p> <p>Pédologie, Les sols dominants en France métropolitaine, Descriptions des grandes familles de sols, GisSol, Sols et Territoires, 2019 <a href="https://cutt.ly/dCED7PD">https://cutt.ly/dCED7PD</a></p> <p>Les sols, conférence de Marc-André Selosse, 2022 <a href="https://cutt.ly/dCEfttv">https://cutt.ly/dCEfttv</a></p>	<p>La protection juridique de la qualité des sols, Maylis Desrousseaux, 2016</p> <p>Le statut juridique des sols face à l'artificialisation : état des lieux et perspectives, Philippe Billet, Annales des Mines - Responsabilité et environnement, 2018 <a href="https://cutt.ly/gCEFOQU">https://cutt.ly/gCEFOQU</a></p> <p>Fiches pratiques ORE, Cerema, 2018 <a href="https://cutt.ly/VCEffk0">https://cutt.ly/VCEffk0</a></p> <p>La protection du sol en droit, Carole Hermon, Droit et Ville, 2017 <a href="https://cutt.ly/kCEFIH6">https://cutt.ly/kCEFIH6</a></p>	<p>AMI ZAN ADEME, <a href="https://cutt.ly/oCYL2o0">https://cutt.ly/oCYL2o0</a></p> <p>Guide du zonage pluvial, Cerema, 2020 - <a href="https://cutt.ly/5CEGhCX">https://cutt.ly/5CEGhCX</a></p> <p>« Formes urbaines et biodiversité un état des connaissances », Morgane Flégeau, PUCA, 2020 <a href="https://cutt.ly/ECEHeWM">https://cutt.ly/ECEHeWM</a></p> <p>Guide pratique de l'élu local, LPO, 2020 <a href="https://cutt.ly/ECEGxXH">https://cutt.ly/ECEGxXH</a></p> <p>Guide pratique pour limiter l'artificialisation des sols, Ministère de la transition écologique, 2021 <a href="https://cutt.ly/KCEGT70">https://cutt.ly/KCEGT70</a></p> <p>Point sur le ZAN, vidéo du cabinet d'avocats Landot et associés, 2021 <a href="https://cutt.ly/sCEGS7X">https://cutt.ly/sCEGS7X</a></p> <p>Végétal et espaces de nature dans la planification urbaine, Plante et Cités, 2022 - <a href="https://cutt.ly/tCEGKPM">https://cutt.ly/tCEGKPM</a></p> <p>S'engager dans de nouveaux modèles d'aménagement, fédération des SCOT, 2022 - <a href="https://cutt.ly/cCEGiAB">https://cutt.ly/cCEGiAB</a></p> <p>Zéro Artificialisation Nette, les propositions de la LPO, 2021 <a href="https://cutt.ly/cCEG0Ee">https://cutt.ly/cCEG0Ee</a></p>	<p>Faire la ville circulaire, Sylvain Grisot, 2021 <a href="https://cutt.ly/XCEHf69">https://cutt.ly/XCEHf69</a></p> <p>Guide Biodiversité et chantiers, Nord Nature, Chico Mendès, LPO, EPF Nord Pas de Calais, EGF BTP, 2019 <a href="https://cutt.ly/QCEHkJH">https://cutt.ly/QCEHkJH</a></p> <p>Projet Greenbox on the roof, 2020 <a href="https://cutt.ly/YCEHZAQ">https://cutt.ly/YCEHZAQ</a></p> <p>La Maison du projet, Frédérique Triballeau, 2021 <a href="https://cutt.ly/mCEHDtL">https://cutt.ly/mCEHDtL</a></p>

Comment permettre aux sols dégradés de retrouver certaines fonctions ?	Quelle végétation planter sur des sols réhabilités ?	Le cas particulier des friches : reconvertir sans évincer la biodiversité	Quels bénéfices pour la biodiversité ?
<p>Enjeux de la reconversion d'une friche et Comment évaluer la réhabilitation écologique d'un sol dégradé, ADEME, 2020 - <a href="https://cutt.ly/JCEH9QB">https://cutt.ly/JCEH9QB</a></p> <p>Guide de valorisation hors site des terres excavées issues de sites et sols potentiellement pollués dans des projets d'aménagement, DGPR, 2020 <a href="https://cutt.ly/0CEH5hJ">https://cutt.ly/0CEH5hJ</a></p> <p>Guide de valorisation hors site des terres excavées non issues de sites et sols pollués dans des projets d'aménagement, DGPR, 2020 <a href="https://cutt.ly/GCEJr9E">https://cutt.ly/GCEJr9E</a></p> <p>Guide simplifié pour la gestion des sites et sols pollués par phytomanagement, Microhumus <a href="https://cutt.ly/GCEJdJG">https://cutt.ly/GCEJdJG</a></p> <p>Qu'est-ce que le phytomanagement ?, IDfriches Auvergne-Rhône-Alpes, 2021 <a href="https://cutt.ly/4CEJWEo">https://cutt.ly/4CEJWEo</a></p> <p>Les phytotechnologies appliquées aux sites et sols pollués, état de l'art et guide de mise en œuvre, ADEME, INERIS, 2012 - <a href="https://cutt.ly/TCEJAKU">https://cutt.ly/TCEJAKU</a></p> <p>Phytotechnologies appliquées aux sites et sols pollués, nouveaux résultats de recherche et démonstration, Valérie Bert., ADEME, 2017 - <a href="https://cutt.ly/ACEJLgQ">https://cutt.ly/ACEJLgQ</a></p> <p>Projet des Cours d'école OASIS <a href="https://cutt.ly/gCEJ9vB">https://cutt.ly/gCEJ9vB</a></p> <p>Suivi des projets de Solutions d'adaptation fondées sur la Nature (SafN), Cerema, 2022 <a href="https://cutt.ly/RCElpXT">https://cutt.ly/RCElpXT</a></p>	<p>Fascicule 35 spécifique aux aménagements paysagers, CCTG, 2021 <a href="https://cutt.ly/TCELxbB">https://cutt.ly/TCELxbB</a></p> <p>Guide des phytotechnologies, Utilisation des plantes dans la dépollution et la réhabilitation des sites contaminés par les métaux lourds, Environnement et développement alternatif, Bert V. &amp; Deram A., 1999 <a href="https://cutt.ly/WCELRcR">https://cutt.ly/WCELRcR</a></p> <p>« Règles professionnelles » : Travaux des sols supports de paysage – Caractérisation, amélioration, valorisation et reconstitution, UNEP, 2012 <a href="https://cutt.ly/MCELFOZ">https://cutt.ly/MCELFOZ</a></p> <p>Les Racines, face cachée des arbres, Christophe Drenou, coordinateur, Institut pour le développement forestier, CNPFP, 2006</p>	<p>Flores et pollinisateurs des villes et des friches urbaines... Entre nature temporaire et biodiversité en mouvement, Guillaume Lemoine, 2016 <a href="https://cutt.ly/MCEZ04B">https://cutt.ly/MCEZ04B</a></p> <p>La biodiversité aménage-t-elle les territoires ? De la présence d'espèces protégées et/ou patrimoniales... ou comment passer d'une logique de contraintes à celle de projets de territoire, Guillaume Lemoine, Développement durable et territoire, vol.4, n°1, 2013 - <a href="https://cutt.ly/hCEXluZ">https://cutt.ly/hCEXluZ</a></p> <p>Le Parc Péru d'un espace pollué à la reconnaissance partagée d'un patrimoine d'exception, Commune d'Auby, 2015 - <a href="https://cutt.ly/mCEXQpc">https://cutt.ly/mCEXQpc</a></p> <p>Le substrat des friches minières favorise les espèces remarquables, Guillaume Lemoine, Espaces naturels, n°38, p23, 2012 - <a href="https://cutt.ly/RCEX0o3">https://cutt.ly/RCEX0o3</a></p> <p>Outil « Cartofriches », CEREMA <a href="https://cutt.ly/uCEXVuT">https://cutt.ly/uCEXVuT</a></p> <p>Outil « Bénéfiche », ADEME <a href="https://cutt.ly/2CEX2Rf">https://cutt.ly/2CEX2Rf</a></p> <p>Outil UrbanVitaliz, CEREMA <a href="https://urbanvitaliz.fr/">https://urbanvitaliz.fr/</a></p> <p>Usages temporaires des friches urbaines de l'Etablissement public foncier Nord-Pas-de-Calais : une contribution aux villes durables ?, Guillaume Lemoine, TSM n°3, 2017 <a href="https://cutt.ly/7CECyWZ">https://cutt.ly/7CECyWZ</a></p>	<p>« Sols fertiles et Trame Brune en milieu urbain : Impacts de l'ingénierie pédagogique sur les sols et les communautés lombriciennes », Jeanne Maréchal, Thèse CIFRE (Université de Rennes 1 / Sol Paysage) spécialité écologie, 2022</p>

# Glossaire

**Abiotique** : Se dit d'un facteur ou d'un milieu, pour désigner ce qui est indépendant des êtres vivants (par exemple : facteurs climatiques, géologiques, géographiques). (Swissoil)

**Anécique** : Les anéciques sont généralement des vers de terre de grande taille qui vivent en permanence dans des galeries verticales qu'ils creusent connectées à la surface du sol (Supagro).

**Agrégat** : Assemblage élémentaire entre les particules minérales du sol (sables et limons) et les ciments colloïdaux (argiles, matières humiques, hydroxydes de fer et d'aluminium) qui caractérise, à l'échelle macroscopique, la structure du sol. (Larousse)

**Apiacées** : Famille de plantes herbacées ou ligneuses dycotylédones caractérisées par :

- des feuilles alternes engainantes souvent composées
- une inflorescence en ombelle
- fleurs à 5 sépales réduits, 5 pétales libres et 5 étamines
- Fruit se divisant en deux parties

(Tela Botanica)

**Aquifère** : sol ou une roche réservoir originellement poreuse ou fissurée, contenant une nappe d'eau souterraine et suffisamment perméable pour que l'eau puisse y circuler librement ([www.u-picardie.fr](http://www.u-picardie.fr))

**Astéracées** : grande famille de plantes dicotylédones appelées aussi composées. Ces plantes ont la caractéristique commune d'avoir une inflorescence en capitule, c'est-à-dire une multitude de fleurs sans pédoncule regroupées sur un réceptacle et entourées de bractées florales. (AgroBio 47)

**Anthrosols** : Sols fortement modifiés ou fabriqués par l'homme, sur plus de 50 cm d'épaisseur depuis la surface. (Référentiel pédologique)

**Biodisponibilité** : La biodisponibilité d'une substance chimique désigne sa capacité à interagir avec les organismes vivants. (Sciences, eaux et territoires).

**Biotique** : Se dit d'un facteur ou d'un milieu, pour désigner ce qui est relatif aux êtres vivants ou dépendant du vivant. S'oppose à abiotique. (Swissoil)

**Brassicacées** : Anciennement appelées crucifères, les Brassicacées sont essentiellement des herbacées dont la principale caractéristique réside au niveau des pétales qui sont au nombre de quatre et en croix.

**Délaissés urbains** : Les délaissés urbains sont des espaces dépourvus d'usage officiel, des lieux transitoires présentant, du fait d'une gestion irrégulière, voire inexistante, une végétation spontanée.

**Edapho-climatique** : Les facteurs édaphiques et les facteurs climatiques. Un facteur édaphique regroupe les propriétés chimiques, physiques et biologiques du sol, conditionnant l'existence de conditions d'habitats spécifiques et, par conséquent, la composition spécifique des organismes qui l'habitent. Les facteurs climatiques sont eux des facteurs écologiques liés aux circonstances atmosphériques et météorologiques dans une région donnée. (Aquaportail).

**Epigé** : Se dit des organismes vivant à la surface du sol. (Larousse) Est aussi une catégorie de vers de petite taille

(inférieur à 10cm) qui vivent dans les premiers centimètres du sol ou dans la matière organique en décomposition à la surface du sol. (Supagro)

**Endogé** : faune qui se trouve à l'intérieur du sol. Les vers endogés sont des vers de terre qui vivent en permanence dans le sol. Ils se déplacent dans le sol en creusant des galeries et en ingérant la terre dont ils assimilent une partie de la matière organique qu'il contient. Certains endogés vivent juste sous la surface du sol ou au contact des racines où le sol est plus riche en matière organique, d'autres peuvent vivre profondément dans le sol (à plusieurs dizaines de cm sous la surface). (Supagro)

**Exsudation racinaire** : Sécrétion d'une substance organique par les racines. (Aquaportail) ; Les exsudats laissent au sol une empreinte jouant un rôle important dans les interactions plante-microorganismes du sol. Ces interactions peuvent aider la plante à se maintenir en bonne santé par une meilleure adaptation à son environnement. (Inrae)

**Fabacées** : Famille de plantes caractérisées par leurs fleurs papilionacées, portent des gousses remplies de graines et ont la capacité à fixer l'azote de l'air et produire leurs propres composants protéiques. (source, Marie-Hélène Jeuffroy, directrice de recherche Inra-agroParisTech).

**Fonge** : Taxon regroupant les champignons.

**Halde** : Tas constitué avec les déchets de triage et de lavage d'une mine métallique. (Larousse)

**Lixiviation** : Entraînement (en général vers la profondeur) par l'eau de percolation ou autres liquides des ions les plus mobiles, dissout dans la solution du sol. A ne pas confondre avec lessivage. (Swissoil)

**Matériel parental** : Matériau minéral ou rocheux sur et / ou à partir duquel des sols se forment pendant pédogenèse (processus de formation du sol); le matériau d'origine est l'un des cinq principaux facteurs de formation du sol. (Soilcare)

**Métalloïdes** : Élément chimique qui ne peut être classé ni dans les métaux ni parmi les non-métaux, c'est-à-dire dont les propriétés physiques et chimiques sont intermédiaires entre celles d'un métal et d'un non-métal. (Technoscience)

**Poacées** : Anciennement appelées graminées, la famille des poacées regroupe des plantes herbacées, annuelles ou vivaces, à tiges cylindriques creuses portant des noeuds, généralement non ramifiées sauf au niveau du sol, et appelées chaumes. L'inflorescence est en épi ou panicule composé d'épillets (petit épi comportant une à plusieurs fleurs). (Ephytia)

**Propagules** : Une propagule est une cellule ou un ensemble de cellules servant à la multiplication de l'espèce et émise par le gamétophyte. Elle prend la forme d'un bourgeon, bulbille, gemmule, stolon, etc., d'une plante capable de reproduction asexuée. (Aquaportail)

**Radionucléides ou nucléide radioactif** : Atomes d'éléments radioactifs naturels ou artificiels.

**Réseau trophique** : Ensemble des organismes d'un écosystème, allant des producteurs primaires aux échelons les plus élevés de la chaîne alimentaire. (Actuenvironnement)

**Technosol** : Anthrosol construit ou reconstitué

## Ont contribué à l'élaboration de ce guide :

### **ADEME**

Agence de la transition écologique, elle a pour mission d'accélérer le passage vers une société plus sobre et solidaire, créatrice d'emplois, plus humaine et harmonieuse. À cette fin, elle soutient l'innovation, de la recherche jusqu'à l'application et le partage des solutions. De sorte que les bonnes pratiques soient généralisées et que les connaissances progressent. L'ADEME œuvre notamment pour un urbanisme durable s'inscrivant dans la lutte contre l'artificialisation des sols et de l'étalement urbain.

#### **Fiche 5 : Comment permettre aux sols dégradés de retrouver certaines fonctions ?**

Réhabilitation des friches à risque de pollution

Des études menées sur la restauration des fonctions des sols

### **EPF Hauts-de-France**

L'Établissement public foncier (EPF) Hauts-de-France est le partenaire des projets fonciers des collectivités territoriales de la Région Hauts-de-France. Opérateur public de l'État, il intervient, tel un recycleur de foncier, en amont des projets d'aménagement des collectivités pour les aider à en maîtriser le foncier et les usages. L'EPF participe à la transformation des territoires en réalisant le cas échéant les travaux de déconstruction et de traitement des sources de pollution concentrée. Par son action, il permet l'accueil de nouvelles activités sur des fonciers délaissés.

<https://www.epf-hdf.fr/>

#### **Fiche 7 : Le cas particulier des friches : reconvertir sans évincer la biodiversité**

### **Sol Paysage**

Sol Paysage est un bureau d'études de conseil, de projet et d'ingénierie. Au service des aménageurs et gestionnaires de territoire, il développe depuis 1994 une approche transversale des paysages et des sols. Société innovante, le développement de son ingénierie est fondé sur une relation étroite avec le milieu scientifique. Sol Paysage participe à des programmes de recherche et développement, en particulier sur les sols urbains, pour intégrer davantage de nature dans la ville et réhabiliter des sites pollués ou dégradés.

#### **Fiche 4 : Préserver les sols dans le cadre d'un projet d'aménagement**

La phase de diagnostic du projet

#### **Fiche 5 : Comment permettre aux sols dégradés de retrouver certaines fonctions ?**

Reconstruction de sols fertiles et gestion des terres

#### **Fiche 8 : Quels bénéfices pour la biodiversité ?**

Comment mesurer les bénéfices pour la biodiversité des sols ?

### **UNEP**

Créée en 1963, l'Union Nationale des Entreprises du Paysage (UNEP) est la seule organisation professionnelle du paysage reconnue par les pouvoirs publics. Au plus près de ses milliers d'adhérents grâce à ses 13 Unions régionales (12 en métropole et 1 en outre-mer), l'Union Nationale des Entreprises du Paysage défend les intérêts des entreprises du secteur du paysage et des jardins, élabore les normes sociales de la profession et pilote la création des règles professionnelles du métier.

#### **Fiche 6 : Quelle végétation implanter sur des sols réhabilités ?**

Nous remercions l'ensemble des participants au groupe de travail «Sols vivants Alternative à l'artificialisation des sols et réhabilitation des sols dégradés » pour le partage des connaissances sur le sujet :

### **Nos partenaires**

**ADEME** : Isabelle Feix, Cécile Grand, Anne Lefranc, Ariane Rozo

**Bouygues construction** : Alexandre Feuga

**CEMEX** : Johanna Moreau

**Eiffage** : Marion Aubrat, Clément Bourge, Hélène Delmas, Pierre-Antoine Jujard

**Ministère de la transition écologique** : Paola Vita

**Office Français de la Biodiversité** : Héloïse Gautier, Kathleen Monod

**UNEP** : Justine Campredon, Quentin Mettray, Pierre-Antoine Thevenin

**Vinci** : Cécile Cren

**Ville de Paris** : Béatrice Jannic, Pascale Lebeau, Yann Le Bourligu, François Nold, Michelle López Valdivia.

### **Ainsi que**

Centre Alexandre Koiré/IFRIS, Germain Meulemans ; Cerema : Christelle Neaud ; Conseil régional de Bourgogne-Franche-Comté, Mathilde Bozonnet, Nadine Enderlin, Antoine Werochowski ; EDF, Frankie Rico Sanz ; EDF – DIPDE, Hugo De Palmas, Ludmila Mlynski ; EGF – BTP, Nicolas Volckaert ; EPF Hauts-de-France, Guillaume Lemoine ; Eurométropole de Strasbourg, Mina Charnaux, Raphael Wurm ; Florence Peucat Paysage, Florence Peucat ; LPO, Pierre Blanchot, Suzanne Brault, Julie Courtemanche, Emma Gnidula et les animateurs-trices du groupe de travail, Elsa Caudron, Léa Luciol, Damien Villotta, Observatoire de l'immobilier durable, Marie Le Goaster ; Métropole de Lyon, Pierre Athanaze ; PNR Oise-Pays de France, Jean-Marc Giroudeau PUCA, Sophie Carré ; Toulouse Métropole, Benoît Boldron ; Sol Paysage, Xavier Marié, Jeanne Maréchal ; Urbalia, Paola Mugnier, Clémence Ermenault ; Ville de Lille, Yohann Tison ; Vinci Immobilier, Julie Bosch.

# Sols vivants

## Alternatives à l'artificialisation des sols et réhabilitation des sols dégradés

---

Ce guide a bénéficié du soutien financier de l'OFB :

---



---

Les contributeurs :

---



**Rédaction :** Tanguy Borgarelli – LPO, Léa Luciol - LPO, Maëva Felten - LPO, Cécile Grand - ADEME, Guillaume Lemoine – EPF Hauts-de-France, Jeanne Maréchal - Sol paysage, Xavier Marié - Sol paysage, Christophe Pennont – Eiffage route, Pierre-Antoine Thevenin – UNEP.

**Relecture :** Nolwenn Bougon – OFB, Laurent Château – ADEME, Julie Courtemanche – LPO, Cécile Grand – ADEME, Anne Lefranc ADEME, Guillaume Lemoine – EPF Hauts-de-France, Jeanne Maréchal – Sol paysage, Kathleen Monod – OFB, Christelle Neaud CEREMA, Ariane Rozo - ADEME.

**Graphisme/Mise en page :** Service Editions LPO ED220906 © 2022 Fabien Ratelet.



Agir pour  
la biodiversité