# GT Transition écologique – Ville durable
# Compte-rendu de la réunion 4 du 17 juin 2024

***Vf du 26.07.2024***

**Présents** :

***Président du GT :*** Michael Matlosz (Université de Lorraine - Académie des Technologies)
***Conseillère scientifique :*** Anne Ruas (UGE)
***Participants : cf annexe***
***ANRT :*** Nadège Bouquin (directrice de projet)

**Ordre du jour :**

Introduction
Michael Matlosz, président du GT, et Nadège Bouquin, ANRT

1. **Sols urbains : terres inconnues ?**
   **Christophe Schwartz**, professeur en pédologie urbaine, INRAE-Université de Lorraine
2. **Renaturer la ville avec les Technosols : impact sur la biodiversité des sols**
   **Sophie Joimel**, maître de conférences en écologie des sols - AgroParisTech
3. **La construction de sols fertiles et les besoins de désimperméabilisation des sols urbains pour la végétalisation de la ville**
   **Robin Dagois**, chargé de mission Agronomie, sols urbains et conduite des végétaux – Plante et Cité
4. **Renaturation, refonctionnalisation, restauration : l'enjeu de choisir la bonne terminologie pour un domaine de recherche récent**
   **Lukas Madl,** doctorant en aménagement et urbanisme, Université Gustave Eiffel / AREP
5. **Artificialisation des sols : l'agence Dédale et l'innovation urbaine et sociale**
   **Cécile Brazilier**, European Project Manager, DEDALE
6. **Les coûts de la restauration des sols urbains**
   **Mathilde Salin**, doctorante en économie, CIRED / Banque de France
7. **Le jumeau numérique environnemental, un outil d'aide à la décision pour répondre à l'objectif ZAN 2050 ?**
   **Sylvain Riss**, directeur Groupe, Digital et BIM – WSP|BG Ingénieurs Conseils, et **Fanny Josse**, architecte et doctorante – Université Gustave Eiffel / WSP|BG Ingénieurs Conseils
8. ***Conclusion transversale*** **- Evolution des enjeux de la nature en ville et perspectives pour les villes-nature**
   **Caroline Gutleben**, directrice – Plante et Cité

Tour de table / discussion : synthèse des enjeux, autres défis et conditions de la gestion des sols urbains, perspectives

## Introduction - Michael Matlosz et Nadège Bouquin

Le président Michael Matlosz souhaite la bienvenue aux participants et remercie les intervenants de leur participation à cette quatrième et dernière réunion thématique du GT, sur les enjeux de recherche et d'innovation liés aux sols urbains.
Pour rappel, les travaux du GT vont donner lieu à une synthèse des pistes de recherche et d'innovation pour le développement de la nature en ville, à l'attention des responsables de la programmation de la recherche française et européenne (programme DUT notamment).
Une réunion supplémentaire est envisagée en septembre ou octobre pour échanger autour des grandes lignes de la synthèse, à confirmer (sinon, échanges par mail).
Un événement d'une demi-journée devrait ensuite être organisé en fin d'année, pour présenter le document de synthèse et en partager et discuter le contenu.

Quelques informations concernant DUT et notamment son pilier CUE :

- **Calendrier de l'AAP** : « soft launch » le 1er juillet, avec également l'ouverture de la plateforme de matchmaking – **les membres du GT porteurs de projet ou qui souhaiteraient s'intégrer à des projets peuvent s'y inscrire et regarder s'ils peuvent y trouver des partenaires potentiels.** Lancement de l'AAP le 2 septembre. Journées d'information DUT les 10 septembre et 9 octobre (Nadège enverra l'info).
- **Les trois axes de l'AAP pour la partie CUE** sont :
  - Créer un nouveau paradigme pour les cycles de l'eau urbaine
  - Modèles circulaires pour régénérer, repositionner, protéger et conserver l'espace urbain pour la biodiversité
  - Stratégies multi-villes pour le management et le suivi de l'économie urbaine circulaire

  La **question des sols** est notamment abordée dans le 2ème thème, via les enjeux de biodiversité en particulier. Sont ainsi évoqués « la disponibilité des terres, la gestion immobilière, les pratiques de descellement ».
- Parution récente de deux publications DUT / CUE, ressources utiles pour les chercheurs et acteurs de la ville circulaire et régénérative :
  - Towards Regenerative Neighborhoods – avril 2024
  - Mapping Circular Urban Economy Cases – juin 2024

Le président rappelle que les sols urbains ont pu être décrits comme les « héros méconnus de la lutte contre le changement climatique » (dans le projet européen BENCHMARKS pour la surveillance de la santé des sols). Leur rôle en tant que réservoir de biodiversité est par exemple essentiel. Cependant leur importance est sous-estimée et les connaissances à leur sujet sont insuffisantes, alors même que beaucoup sont gravement dégradés, avec des conséquences lourdes pour l'environnement et la santé.

Il invite le premier intervenant, Christophe Schwartz, à prendre la parole.

## 1. Sols urbains : terres inconnues ?
## Christophe Schwartz – INRAE / Université de Lorraine

Les sols urbains sont la catégorie de sols dont l'étude est la plus récente en France et dans le monde : cela ne fait qu'une trentaine d'années que la pédologie s'y intéresse. Leur rôle est pourtant crucial : ils remplissent de nombreuses fonctions, en lien avec la santé des écosystèmes et la santé humaine. On peut ainsi citer une douzaine de services remplis par les sols d'une façon générale, et de façon plus ou moins marquée par les sols urbains. Cette multifonctionnalité des sols explique l'importance de développer leur étude.

Au niveau européen, c'est l'enjeu de la Mission Sols qui a été lancée dans le cadre du programme Horizon Europe. Cette mission comporte 8 objectifs, dont 6 sont pertinents pour les sols urbains (les deux autres étant la lutte contre l'érosion et la désertification) :

- Préservation des stocks de carbone organique
- Mettre fin à l'imperméabilisation des sols et accroître la ré-utilisation des sols urbains
- Réduire la pollution des sols et promouvoir leur restauration
- Améliorer la structure pour favoriser la biodiversité du sol
- Réduire l'empreinte mondiale de l'Europe sur les sols
- Améliorer l'éducation de la société à la question des sols

La Mission prévoit notamment d'établir 100 Living Labs et sites de démonstration pour mener la transition vers des sols sains à l'horizon 2030.

Il faut aller au-delà d'une certaine caricature concernant les sols urbains, que l'on ne considère parfois pas comme de véritables sols (cf photo d'un trou creusé dans un sol urbain, empli de tuyaux et câbles divers). En effet, ceux-ci sont des objets de réactivité chimique mais aussi sociologique très forte : ils sont très marqués par la population humaine qui les occupe et qui est de plus en plus nombreuse à vivre en ville.

## Lorsque les activités humaines deviennent un facteur dominant de formation et d'évolution des sols : anthroposéquences de sols

Les activités humaines sont devenues des facteurs dominants de formation et d'évolution des sols, à côté d'autres facteurs comme le climat, la topographie, l'activité biologique d'une roche mère. Au-delà des notions de chronoséquences ou toposéquences de sols, on peut désormais parler d'anthroposéquences de sols. Les sols urbains sont ainsi au cœur d'enjeux sanitaires, environnementaux, fonciers, économiques très forts dans nos sociétés. Mais même si les études les concernant sont assez récentes, il faut arrêter d'insister sur la faible connaissance que l'on a d'eux : on en sait tout de même de plus en plus.

Une carte de l'usage des sols à Paris de 1949 à 2017 montre bien le grignotage progressif des terres agricoles et des zones naturelles (forêts…) par les espaces urbains dans tous leurs usages : habitat ; réseaux de transports ; zones industrielles, commerciales, militaires… ; installations sportives ou de loisirs, etc.
Sur une image de 2018 de cette unité urbaine parisienne, on voit ainsi se succéder plusieurs anthroposéquences de sols, avec l'accumulation de divers « horizons » de sol (au sens de couches) :

- Cambisol : sol initial naturel, avec pratiques de maraîchage
- Anthrosol : passage à des cultures plus intensives, apport renforcé de matières organiques
- Technosol : changement d'usage des sols (habitat), modification de leur profil avec des matériaux supplémentaires (remblais)
- Technosol : usage résidentiel, nouvel ajout d'un horizon au Technosol

In fine, au cours de cette période 1949-2017 :

- 36 % de la surface de l'agglomération parisienne a changé d'affectation
- 21 trajectoires historiques d'affectation du sol décrivent 80 % de la superficie
- Mais qui peuvent se résumer en un seul type de changement dominant en 70 ans : passage de sols agricoles en sols urbains

Attention cependant à **ne pas considérer tous les sols urbains comme dégradés** du fait des impacts d'une présence humaine dense : tous les sols urbains ne sont pas fortement modifiés, tous ne sont pas des Technosols, on peut aussi trouver en ville des sols « pseudo-naturels ».

Il faut donc préserver la vision d'une diversité des sols urbains : tous n'ont pas besoin d'être traités pour une éventuelle contamination. Il faut combiner la protection de ceux qui ont gardé des fonctionnalités suffisantes, et le traitement de ceux qui le nécessitent (désimperméabilisation, décontamination, etc.)
On peut catégoriser cette diversité de sols urbains en fonction de leur gradient de fonctionnalités avec par exemple des :

1. Sols pseudo-naturels : Luvisol (forêt urbaine), Cambisol (agriculture urbaine)
2. Sols reconstitués ou construits : Anthrosol (horticulture), Technosol construit, Technosol de toit végétalisé
3. Sols sur dépôts : Technosols sur sites contaminés, Technosol de bassin de décantation
4. Sols imperméabilisés : Technosol pavé, Technosol imperméabilisé

Parmi les fonctions majeures des sols urbains, on peut souligner leur **contribution significative à la séquestration du carbone**, malgré des surfaces restreintes. On peut considérer qu'en ville, il existe 30 % d'espaces végétalisés (e. q., prairies urbaines, parcs…), dont 70 % sont constitués de sols ouverts. Il est important de travailler à préserver et développer ces sols en particulier et leur capacité de séquestration et de stockage du carbone. **Les stocks de carbone dans les surfaces urbaines végétalisées sont parfois supérieurs à ceux de surfaces forestières équivalentes**. Bien sûr, il y a une importante variabilité selon les conditions locales. Au total**, en France, environ 7 % du stock national de carbone organique global provient de sols artificialisés.**

Les sols urbains sont également d'importants réservoirs de biodiversité, notamment dans les espaces végétalisés : parcs, jardins privés ou partagés par exemple. On observe une grande diversité de micro-habitats, aboutissant à un gradient de biodiversité assez proche de celle des milieux forestiers, avec de nombreuses espèces telles que des arachnides, des collemboles ou encore une importante flore bactérienne, etc.

### Lorsque les sols urbains aspirent à redevenir des soles naturels : solutions fondées sur la nature

Tout cela appelle à développer des solutions fondées sur la nature, pour favoriser la transformation des sols urbains en des sols plus naturels et fertiles.

Des cadres législatifs et réglementaires existent pour développer ces solutions :

- 2018, Plan Biodiversité, principe de Zéro Artificialisation Nette
- 2021, loi Climat et résilience : renforce les actions pour atteindre le ZAN en 2050
  - préservation des espaces naturels, agricoles et forestiers
  - création des trames brunes en milieu urbain
  - désimperméabilisation des sols et renaturation

L'idée est d'élaborer des sols urbains avec une finalité précise, plutôt que de subir des sols impactés négativement par les activités humaines. On peut utiliser pour cela des **procédés de génie pédologique comme la construction de sols**. C'est ce qui a été fait par exemple dans le cadre du **projet SITERRE**[1].
Un exemple [slide 16] montre ce qui a été fait sur la station expérimentale du Groupement d'Intérêt Scientifique sur les Friches Industrielles (https://gisfi.univ-lorraine.fr/fr/), dans le cadre de la reconversion du site d'une ancienne cokerie. Des sols dégradés peuvent être réhabilités par la construction de technosols à l'aide de déchets, et retrouver des fonctionnalités comparables à celles de sols naturels.

Ces technosols représentent des solutions intéressantes pour des chantiers de désimperméabilisation des sols. Les **sols imperméabilisés** caractérisent souvent le développement urbain et il faut en rappeler les conséquences négatives en termes de **perte de fonctions écologiques et de services**

[1] Projet SITERRE, 2011-2015 (voir cet article par exemple), puis SITERRE 2, 2021-2024

**écosystémiques** : réduction des échanges gazeux, très forte réduction de la production de biomasse, pertes de biodiversité, uniformisation des paysages.

Ainsi, le **projet DESSERT** – ADEME (DEsimperméabilisation des Sols, Services Ecosystémiques et Résilience des Territoires) a pour objectif d'éclairer les pratiques de désimperméabilisation, en particulier par des connaissances scientifiques acquises en conditions de laboratoire et sur des sites pilotes répartis sur le territoire national (Angers, Nancy et Cannes). Un guide d'aide à la conception d'opérations de désimperméabilisation sera édité fin 2024..
Il faut souligner aussi les flux possibles entre surfaces artificialisées et non artificialisées, avec des processus croisés d'artificialisation ou de désartificialisation.

## Prendre en compte les sols dans les stratégies d'aménagement

Dans le cadre des stratégies d'aménagement urbain, il est crucial de mettre en place des démarches d'observation et d'acquisition de données sur les et aussi de développer des outils d'aide à la décision fondés sur une meilleure prise en compte de la qualité des sols. Il faut favoriser l'évolution de la conception des sols urbains :

- d'un « sol urbain-surface » (approche foncière de l'aménageur)
- à un « sol urbain-matière » (profil de sol, selon le pédologue : disponible pour la végétation et apte à rendre des services. Notion de qualité du sol selon l'agronome)

Une diversité d'outils se développe et permet d'accompagner cette évolution des conceptions :

- localisation prédictive de Technosols (e.q. au sein de l'unité urbaine de Paris)
- prédiction cartographique de sols ouverts végétalisés fertiles (avec des seuils définis pour leurs diverses propriétés : e.q., pH, teneur en carbone organique et en phosphore, etc.)

Des outils d'aide à la décision sont alors en développement et disponibles pour les gestionnaires publics ou privés des sols urbains, dans leurs démarches de désimperméabilisation, de décontamination, de végétalisation (*e.g.*, MUSE, SUPRA, Destisol).

## Communiquer, former, sensibiliser et impliquer

Partager une meilleure connaissance et compréhension des sols urbains entre chercheurs, experts, décideurs, acteurs, citoyens est essentiel. Là encore, on peut citer de nombreuses initiatives récentes en ce sens ; quelques exemples :

- ouvrage Soils within Cities. Global approaches to their sustainable management
- Guides et manuels, exemple : Plante & Cité « Présomption de pollution d'un sol. Des clés pour comprendre et agir »
- Projets et réseaux, exemples :
  - **URBASOL**, visant à fédérer l'ensemble des actions de recherche et de gestion en lien avec les sols urbains
  - **JardiBioDiv**, observatoire participatif de la faune du sol en milieu urbain
- Initiatives entrepreneuriales, exemple : **Sol&Co**, start-up issue de l'Université de Lorraine, qui valorise dix années de recherche en sciences du sol (agronomie, pédologie, écologie, écotoxicologie) et aménagement du territoire (urbanisme opérationnel)

## Enjeux de recherche sur les sols urbains

- **Continuer à développer la pédologie urbaine** et promouvoir une **vision intégrée de la couverture pédologique** (incluant tous types d'usages et de sols forestiers, agricoles, urbains et industriels)
- Décrire les **liens état des sols urbains - fonctions écologiques - services écosystémiques** dans un contexte de changement climatique
  - contribution des sols urbains au stockage du carbone

  - sols urbains et biodiversité
  - nexus sol-eau-alimentation pour les sols supports d'agricultures (péri)urbaines

- **Connaître les sols urbains pour mieux les gérer**
  - observation, cartographie des sols urbains
  - modèles (*e.g.*, jumeaux numériques)
  - outils d'aide à la décision pour prendre en compte les sols dans les stratégies d'aménagement
  - solutions fondées sur la nature combinées à d'autres procédés pour renaturer-refonctionnaliser-restaurer
  - génie pédologique (du déchet à l'opportunité)

  Question de la construction durable avec les sols. Il faut réfléchir aux façons d'utiliser le béton, le ciment pour les constructions urbaines, et comment favoriser la résilience de la ville.

- Poursuivre le développement de **laboratoires vivants**
  - faire de la recherche autrement et que cette manière de faire de la recherche soit reconnue
  - encourager des approches transversales entre les services des collectivités.
    Les enjeux sont très transversaux : liens entre les sols et la santé humaine, problèmes de multicontamination en ville

- **Renforcer les liens entre les programmes nationaux et européens**
  - e.g. développer une porosité entre les Missions européennes (ville, sols, climat, …)

  A l'échelle européenne, on peut citer l'exemple du programme européen **Soil Health BENCHMARKS**, basé sur 24 cas multi-échelles et muti-utilisateurs pour l'observation et la gestion des sols urbains.

Pour conclure, on ne pourra plus dire à l'évenir qu'on ne sait pas ce qui se passe en milieu urbain concernant les sols : les sols urbains sont de plus en plus décrits et compris dans leur fonctionnement, leur capacité à assurer des fonctions écologiques et leur aptitude à rendre des services écosystémiques. Ces connaissances doivent aujourd'hui être intégrée et rendues disponibles et accessibles à tous via des outils opérationnels et des pratiques vertueuses largement diffusées. Les villes ont en effet besoin de sols fonctionnels.

**QUESTIONS**

***M. Matlosz :*** Dans les projets européens de recherche, qu'apporte la comparaison entre villes sur ces sujets, d'après votre expérience ?
***Réponse :*** Le niveau européen permet d'accéder à des villes avec des histoires, des climats etc. contrastés, permettant d'identifier des catégories de cas d'usages contrastés.
Il invite aussi à inclure des porteurs d'enjeux divers, qui n'ont pas les mêmes problématiques ni les mêmes façons de travailler que les acteurs français.

***C. Pourchez :*** Y a-t-il des liens et si oui, lesquels entre la Mission Sols et la Mission Ville ?
***C. Schwartz*** : Il y en a un peu mais pas suffisamment…

## 2. Renaturer la ville avec les technosols : impact sur la biodiversité des sols

**Sophie Joimel** – AgroParisTech

En France, actuellement, 24 000 hectares de sol sont artificialisés chaque année. Cela signifie qu'on artificialise l'équivalent de 5 terrains de foot par heure !

Pour lutter contre cette artificialisation, Christophe en a parlé, la loi Climat et Résilience a introduit l'objectif de zéro artificialisation nette (ZAN) à l'horizon 2050. L'idée est de limiter l'artificialisation tout en restaurant ou renaturant.
Une prochaine intervention reviendra sur les divers de termes utilisés autour de cette question de renaturation des sols en ville (réhabiliter, etc.). Ici le choix est fait de garder le terme "renaturation".
La fonctionnalité des sols en ville est plurielle, avec une diversité de services :

- infiltration et stockage des eaux pluviales
- dépollution de l'eau
- production végétale
- habitat pour la biodiversité
- rafraîchissement de l'air
- réservoir de carbone
- usages et valeurs paysagers, culturels et récréatifs

Cette présentation s'attache essentiellement à la dimension de la **biodiversité en lien avec les technosols**.

On peut distinguer deux façons de faire lorsqu'on veut renaturer des sols en ville par des technosols.

1. Lorsqu'il s'agit de sols imperméabilisés que l'on veut désimperméabiliser (cf le projet DESSERT évoqué par C. Schwartz) : on est souvent face à des sols imperméabilisés, contaminés ou multi-contaminés, et peu fertiles. Dans ces cas-là, on enlève le bitume, on apporte des matériaux et on décompacte.
2. Si ce n'est pas possible, il faut mettre en place des technosols. On parle de génie pédologique et de solutions fondées sur la nature : il s'agit de construire des sols qui imitent les sols naturels.

Ces technosols comprennent généralement trois horizons, même s'il y a une grande variabilité selon les cas :

- un horizon de croissance : permet la germination et le développement initial des plantes
- un horizon de développement : permet le développement des racines et la nutrition minérale ou hydrique ainsi que l'ancrage
- et parfois un horizon technique : permet la gestion de l'eau en favorisant le drainage des eaux en excès ou en assurant un stockage additionnel.

Un exemple : un technosol construit sur une toiture, avec une couche de brique concassée en bas et un mélange de marc de café et de compost de déchets verts en haut.

Les technosols sont encore peu étudiés par la recherche, qui s'y intéresse seulement depuis une dizaine d'années. Un recensement de la littérature scientifique internationale a permis d'identifier 88 articles sur le sujet, dont beaucoup en France, et la plupart en conditions de laboratoire (encore peu de recherches en conditions réelles).
De nombreux **enjeux et questions** peuvent être identifiés.

- <u>Enjeux génériques</u> :
  - Construction des technosols : quelle épaisseur doivent-ils avoir ? Et quelle épaisseur doit avoir chacun de leurs horizons (couches) ? Quelles doivent être leurs propriétés, en fonction des usages auxquels ils sont destinés ?
  - Gestion des technosols, depuis l'excavation jusqu'à l'entretien (questions venant notamment des opérateurs, des gestionnaires des sols)
  - Indicateurs de suivi : lesquels choisir, en fonction des objectifs fixés ?

- <u>Enjeux spécifiques :</u>

- Quelle modulation selon les contextes locaux ? Exemple : pédoclimat local ; matériaux disponibles localement (exemple du marc de café en raison d'une entreprise voisine utilisant ce matériau)
- Quelle modulation selon les objectifs ?
- Type de végétalisation : doit -on privilégier les espèces locales, ou des espèces qui paraîtraient plus adaptées à des évolutions futures du climat par exemple ?...
- Technosols légers, adaptés à des besoins particuliers (toits…) : quelles spécifications ?

Concernant la préservation de la biodiversité, les questions suivantes sont soulevées : comment l'intégrer en amont et en aval ? Comment la caractériser, la mesurer, la suivre ? Le nombre d'espèces présentes est-il un critère suffisant, ou en faut-il d'autres ? Comment intégrer aussi par exemple le souhait d'éviter le développement d'espèces invasives ? Comment adapter le niveau de préservation de la biodiversité en fonction des objectifs ? Par exemple, les enjeux de fertilité ou de risques sanitaires ne sont pas les mêmes pour de la production alimentaire ou de la production ornementale.

Des études à long terme sur les technosols doivent également être menées pour comprendre leur évolution et leur capacité à supporter la biodiversité. Il y a des défis tels que la contamination par des métaux lourds et des microplastiques, provenant de déchets.
On a pu observer qu'un technosol d'une dizaine d'années avait été progressivement contaminé aux métaux lourds, alors que ceux-ci n'étaient pas présents dans l'atmosphère. Au bout de 10 ans, la quantité mesurée dans le technosol (presque 100 mg/kg de plomb) s'approchait pourtant du seuil maximal fixé par la norme.

Les contaminations aux polluants émergents tels que les microplastiques sont à regarder aussi de près. Leur présence peut être assez fréquente dans les technosols, avec des déchets qui en contiennent.

On suppose souvent que le simple fait de désimperméabiliser va permettre de retrouver de la biodiversité. Mais il y a encore peu d'études sur cette question, donc on ne sait pas vraiment si la désimperméabilisation a un impact direct en termes de gain de biodiversité en vie concernant les sols urbains.

On sait en revanche **qu'entre 25 et 60 % des espèces terrestres sont présentes dans les sols, mais seulement 1 à 3 % des études sur les sols urbains portent sur cette biodiversité**. Or celle-ci est essentielle dans les sols construits, pour permettre la fertilité et la rétention d'eau, nécessaires pour la renaturation des sols.

La biodiversité des sols comprend plusieurs groupes d'organismes :

- La microflore (bactéries et champignons), et la microfaune (notamment les nématodes), qui sont invisibles à l'œil nu.
- La mésofaune, qui inclut les collemboles et les acariens.
- La macrofaune, un groupe beaucoup plus connu qui comprend notamment les vers de terre et les mille-pattes. La majorité des études (globalement peu nombreuses donc) se concentrent sur ce groupe.

Il existe un a priori fréquent selon lequel la biodiversité des sols s'installe d'elle-même en milieu urbain. Si cela peut être vrai dans certains cas, d'autres situations sont plus complexes. Par exemple, il est difficile de trouver des vers de terre sur des toitures. La colonisation dépend des types d'organismes et de la connectivité des toitures.

De plus, la **stabilisation de la biodiversité peut prendre plusieurs années**, parfois quatre à cinq ans, avec des fluctuations importantes avant d'atteindre un équilibre stable.

**Les suivis de biodiversité varient également selon les saisons**. Les observations au printemps ne sont pas les mêmes qu'en automne, ce qui introduit une grande variabilité dans les résultats.

Pour favoriser cette biodiversité dans les sols construits, **plusieurs actions peuvent être entreprises.**

- La conception des technosols peut inclure la réduction des contaminants, l'ajout de matière organique, et la création de microhabitats.
- La gestion des sols, en essayant de limiter le travail du sol et de contrôler les apports de matériaux comme les pesticides, le compost (gestion différenciée).
- La connectivité des espaces peut être améliorée pour permettre aux organismes de se déplacer librement. Des expérimentations avec des lombrics sont en cours pour faciliter la mobilité des vers de terre sous les chemins (exemple d'un « lombriduc » dans un parc urbain à Lille).
- L'inoculation d'organismes est une autre solution explorée.

Pour conclure :

- **Globalement, la biodiversité des sols ne s'installe pas seule** ; elle nécessite une approche multidisciplinaire, impliquant des écologues, des pédologues, des géographes, et des biochimistes. Cette collaboration est essentielle pour réussir la renaturation urbaine.

- Dans le cadre des attentes de renaturation de la ville, on constate une **demande croissante d'études de la part des acteurs opérationnels**. Les études scientifiques peuvent par exemple aider à dépasser des inquiétudes liées à l'utilisation des technosols en agriculture urbaine. Par exemple, un récent rapport de l'Agence régionale de la santé déconseille l'usage des technosols pour l'agriculture urbaine. Il est donc nécessaire de développer des guides de bonnes pratiques et de structurer des filières professionnelles dédiées à l'ingénierie pédologique.

- La construction des sols nécessite de **développer et diffuser deux types de ressources** :
  - génériques (guide de bonnes pratiques) pour le plus grand nombre
  - Spécifiques : plus spécialisées, pour la filière des ingénieurs pédologiques.

- Concernant la biodiversité des sols construits : les études restent rares ; elles doivent se développer, en répondant à trois besoins : quantification (recueil, analyse, croisement de données sur l'ensemble de la biodiversité des sols : dispersion, colonisation, habitat) ; suivi à long terme ; et dans une diversité de contextes (conditions climatiques, etc.).

- Un sol renaturé n'est pas un sol naturel. De ce fait, renaturer ne devrait pas être vu comme un droit à artificialiser, mais comme une opportunité de végétaliser la ville et réhabiliter des sites dégradés.

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

**Robin Dagois** – Plante et Cité

Pour répondre aux besoins de renaturation et de végétalisation des villes, il est essentiel de disposer de sols et de substrats fertiles, en termes de qualité et de quantité. Actuellement, on se procure généralement ces matériaux en milieu périurbain et agricole par le décapage des sols agricoles (en vue de l'urbanisation du terrain), ce que l'on appelle les **terres végétales**, que l'on transporte ensuite en milieu urbain.

Cependant, ce modèle a des impacts et des coûts : réduction des ressources naturelles, des espaces naturels et de la sécurité alimentaire, pollutions liées aux transports. Par ailleurs, avec l'objectif de ZAN, l'étalement urbain va être limité et cette ressource en terre décapée va donc se réduire.

Aujourd'hui, il faut donc trouver des matériaux alternatifs pour remplacer ces terres végétales en milieu urbain, en réutilisant des déchets urbains, des délaissés industriels ou urbains, ainsi que des sous-produits industriels. En sélectionnant ces matériaux avec soin et en les mélangeant, il est possible de créer des sols fertiles capables de remplacer la terre végétale dans les processus de construction de sols.

Le principe de construction de technosols consiste à **imiter la répartition des « horizons » que l'on trouve dans un sol naturel**. Un sol naturel se caractérise par une superposition de différentes couches, ou horizons, allant de la roche mère à l'humus, et ayant chacune ayant des propriétés spécifiques bénéfiques pour les plantations. On distingue des horizons de substrat (ou horizon squelette), des horizons techniques et des horizons de croissance. L'objectif est donc de recréer ces horizons, en mélangeant différents matériaux, avec pour chacun d'eux les propriétés physico-chimiques spécifiques qui bénéficieront aux plantations.

Les travaux menés dans le cadre du programme **SITERRE**[2], financé par l'ADEME entre 2010 et 2015 et piloté par Plante et Cité, avaient pour but de développer une méthodologie permettant de construire des sols fertiles en milieu urbain à partir de déchets et de délaissés urbains.
Par exemple, pour un modèle type "Parc et square", adapté à des espaces verts urbains, **des valeurs seuils ont été définies pour diverses propriétés des sols**, telles que la macroporosité, la densité, le pH et le phosphore. Ces valeurs seuils guident la sélection et le mélange des matériaux pour créer des sols aux propriétés désirées.
Pour chaque horizon, des valeurs spécifiques sont déterminées. Par exemple, pour la teneur en matière organique dans un horizon de croissance en surface, on cherche des teneurs élevées, allant de 40 à 100 grammes par kilogramme. Cela permet de sélectionner les matériaux à mélanger en fonction de ces critères pour construire des sols aux propriétés optimales pour la croissance des plantes.
Une batterie **d'indicateurs chimiques et physiques est utilisée pour évaluer la fertilité des sols**, tels que la rétention en eau, la densité apparente et la macroporosité. Il est essentiel de penser à l'usage final du sol lors de la sélection des matériaux.

Le **Catalogue européen des déchets, comprenant 836 types de déchets,** a servi de référence pour sélectionner les matériaux potentiels, en écartant ceux qui ne pouvaient pas être utilisés en construction de sol, comme les déchets médicamenteux ou dangereux (contenant de l'amiante ou de l'encre par exemple). Après divers tris, **11 matériaux** ont été sélectionnés :

- 6 minéraux inertes : ballast, bétons de démolition, déchets de fabrication de briques, déchets de déconstruction, terres excavées
- 5 organiques : déchets verts, déchets issus du nettoyage de rues, sous-produits papetiers, boues de stations d'épuration…

Des caractérisations de base, telles que le pH, les carbonates de calcium et le carbone total, sont réalisées pour évaluer les propriétés de ces matériaux. Les matériaux bruts peuvent avoir des propriétés extrêmes, comme des pH très élevés ou des teneurs en carbonate de calcium et en carbone total

[2] Objectifs de Siterre : montrer la faisabilité et le potentiel de construction de sols fertiles à partir de déchets et sous-produits urbains, développer des modèles de prédiction de la fertilité des mélanges, évaluer et contrôler les risques potentiels pour la santé des personnes et l'environnement, créer un outil d'aide à la décision, proposer la mise en place d'une nouvelle filière.

exceptionnellement hautes. Mélanger ces matériaux permet d'atténuer ces effets extrêmes et de créer des mélanges organo-minéraux similaires aux horizons naturels.

Le programme **SITERRE 2** (2022 à 2026) permet de poursuivre ces travaux, avec notamment des essais sur le terrain. L'objectif est de finaliser un outil prédictif d'aide à la décision basé sur les études et modélisations de mélanges de matériaux. Il est basé sur des analyses multicritères intégrant les dimensions suivantes :

- Matériaux (analyses, gisements)
- Dimension environnementale -bilan carbone)
- Dimension socio-économique : acceptabilité, coût
- Usages (nombre et caractérisation des horizons)

Cet outil permettra de recommander des mélanges de matériaux pour construire des sols en fonction des matériaux disponibles localement et des usages prévus : parcs et squares, prairie extensive, arbres d'alignement, production agricole non-alimentaire.

Par ailleurs, une **enquête** a été menée auprès des professionnels de la filière pour comprendre les **pratiques actuelles de construction de sols et l'évolution des sols construits**.

Des **sites pilotes** ont été étudiés pour effectuer des **caractérisations plus détaillées des propriétés agro-pédologiques des sols**. Par exemple, à Rennes, des mélanges de ballast et de compost de déchets verts ont été utilisés pour construire des sols fertiles. À Paris, au parc de Sempin, des terres excavées ont été réutilisées, et à Aulnay-sous-Bois, du béton concassé et du compost ont remplacé les terres végétales pour la construction de sols.

Un enjeu important du projet est de communiquer et d'interagir avec la filière, afin de permettre d'enrichir les résultats, de les diffuser, d'en favoriser l'appropriation et la mise en œuvre.

Enfin, une **analyse de cycle de vie** est en cours pour évaluer l'impact environnemental de la construction de sols à l'aide de déchets revalorisés. Il est supposé que l'utilisation de matériaux locaux et réutilisés a un impact environnemental moindre que l'importation de terres végétales, mais cela doit être démontré. Trois scénarios, avec des formulations diverses de composition des sols, sont testées pour comparer les impacts :

1. 100 % terre végétale
2. 70 % terre du site, 30 % compost de déchets verts
3. 40 terre du site, 30 % bétons concassés, 30 % compost de déchets verts + mycoryzation

**En conclusion**, ce projet de renaturation urbaine par la construction de technosols à partir de matériaux recyclés et locaux est prometteur. Il permet non seulement de préserver les espaces agricoles en réduisant le besoin de décaper des sols agricoles, mais aussi de valoriser des déchets urbains et industriels, contribuant ainsi à une gestion plus durable des ressources et à une réduction de l'empreinte environnementale de la végétalisation urbaine.

**QUESTIONS**

- ***M. Matlosz :*** Ces premiers exposés permettent d'identifier une tension entre le besoin d'intervention dans la gestion de la nature réintroduite ou recréée en ville (entretien…), et le souhait de ne pas intervenir (ou pas trop), de la laisser se développer. Y a-t-il un juste équilibre entre ces deux attitudes ?

***Réponse R. Dagois :*** Les deux ne sont pas incompatibles, tout dépend de la configuration des sols et de l'environnement. D'une façon générale, plus le sol est dégradé, plus il est nécessaire d'intervenir.

***Réponse C. Schwartz :*** Il faut considérer les technosols comme de véritables sols, soumis à des facteurs d'évolution. Au fil du temps, des processus et des mécanismes spécifiques se développent, influençant la pédogenèse (formation et évolution des sols). Les pratiques de gestion différenciées, telles que l'incorporation de matière organique, l'utilisation d'engrais et le travail du sol, affectent particulièrement les horizons de surface. Ces pratiques influencent également la gestion de la biomasse, notamment en forêt ou en milieu agricole. Même les sols agricoles, bien qu'intensivement gérés, continuent de subir des processus pédogénétiques à moyen et long terme. Il est essentiel de différencier les effets à court terme des pratiques agricoles et les évolutions pédogénétiques à plus long terme.
Il faut aussi distinguer les différents types de matériaux utilisés. Par exemple, un profil constitué presque entièrement de compost ne peut pas être considéré comme un sol à part entière. Le compost pur subit des phénomènes de dégradation de matière organique et de concentration des éléments, mais il ne possède pas les caractéristiques complètes d'un sol différencié et évolué. Il est donc essentiel de bien définir si l'on parle de matériau, de sol, ou de sol différencié et évolué.

- ***Sylvain Riss :*** Concernant l'ACV, comment ont été déterminées les différentes formulations propres à chaque scénario ?

***Réponse R. Dagois :*** ce sont des choix vraiment issus de l'expérimentation ; l'objectif était de disposer de trois compositions différenciées, et le détail de chacune s'est fait en fonction des contextes locaux.

- ***Estelle Caudal :*** Si on venait à manquer de compost de déchets verts, quel matériaux pourrait le remplacer, à grande échelle ?

***Réponse R. Dagois*** : Les autres matériaux que l'on a pu utiliser sont par exemple les boues d'épuration ou les déchets de l'industrie papetière, mais leurs propriétés les rendent moins propices. Cela étant, il n'y a pas vraiment de raison que l'on soit amenés à manquer de déchets verts…

***Réponse C. Schwartz*** : un complément de réponse tient à l'horizon de temps que l'on se donne. On veut souvent agir avec des résultats immédiats, donc on a recours par exemple à des matériaux que l'on a sous la main – ce qui peut être bien car on recycle des déchets. Mais si on en manque, on peut aussi avoir l'objectif de « laisser le temps au temps », de laisser la nature suivre son cycle – la nature que l'on aura recréée ou re-développée, et elle produira elle-même les déchets verts que l'on pourra réutiiliser pour la suite.

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

**Lukas Madl** – UGE / AREP

Dans le cadre de ma thèse (UGE-AREP) sur la fonctionnalisation des sols, j'ai été confronté à des enjeux sémantiques, car plusieurs termes proches sont utilisés pour qualifier des processus liés à la restitution des habitats naturels en ville.

Le ZAN (Zéro Artificialisation Nette) se focalise sur les sols de deux manières différentes :

1. La **réduction de la consommation des sols** de 50 % d'ici 2031.
2. La **renaturation des sols ayant perdu leurs fonctions écologiques,** notamment au vu de l'objectif de zéro artificialisation nette d'ici 2050.

Il est crucial de comprendre qu'on parle de "net" et non de "brut". A partir de 2050, toute artificialisation encore effectuée devra être compensée par un projet de renaturation. Cette politique vise à répondre

à plusieurs enjeux environnementaux tels que la dégradation des sols, le réchauffement climatique, la perte de biodiversité et la pollution, notamment des eaux souterraines.

Le terme "renaturation" n'a pas de définition généralement acceptée dans les publications scientifiques. Les rares références dans la littérature sont variées. Dans les publications anglophones, où l'on parle de "re-naturing", on trouve des articles décrivant la restitution des liens entre l'homme et les processus naturels, qui s'ajoute à l'objectif de rétablir la santé des écosystèmes.

Les documents politiques, comme celui traitant de l'objectif de l'Union Européenne de zéro consommation nette de sol d'ici 2050, utilisent "renaturation" dans un contexte de **compensation de la consommation de sol**. Plusieurs publications francophones emploient le terme dans le contexte de la **récupération des fonctions écologiques des rivières**. Dans les articles de presse, on peut observer que le terme est également souvent utilisé dans le contexte des rivières. Le plus ancien article que j'ai pu trouver dans les archives de journaux (Europresse) date de 1992, traitant d'un projet visant à rendre le Rhin plus favorables aux populations de poissons. Des articles de 2004 et 2015 utilisent également le terme majoritairement dans le cadre des travaux visant à améliorer l'état des rivières, souvent en lien avec la directive européenne sur l'eau.

**En 2021, la renaturation est définie dans le code de l'urbanisme dans le cadre de la loi climat**. L'article 192 stipule que la renaturation d'un sol ou désartificialisation consiste en des actions de restauration ou d'amélioration de la fonctionnalité d'un sol, transformant ainsi un sol artificialisé en sol non artificialisé. Cette définition peut être divisée en deux parties :

- les actions visant à l'amélioration ou à la restauration de la fonctionnalité du sol,
- et les résultats attendus, à savoir la transformation d'un sol artificialisé en sol non artificialisé, précisée par une nomenclature en fonction de la couverture du sol et de l'usage.

Les notions de "renaturation" sont diverses mais tournent généralement autour de l'amélioration de l'état des écosystèmes. Il serait intéressant de comparer cette notion avec des termes englobant des actions similaires dans différents domaines scientifiques, comme l'écologie de la restauration.

Deux concepts souvent discutés sont :

- la **restauration écologique**, qui vise à restaurer un site pour qu'il retrouve l'écosystème indigène qui existait avant sa dégradation ;
- la **réhabilitation écologique**, qui vise à rétablir un certain niveau de fonctionnement de l'écosystème et de biodiversité.

Ces deux termes diffèrent également en fonction des **contextes d'application** : plus un site est dégradé, moins il est possible de le ramener à son état historique. Sur des sites fortement dégradés, où les pressions extérieures persistent, la réhabilitation, visant un certain niveau de fonctionnement de l'écosystème, pourrait être plus appropriée.
La restitution du fonctionnement écologique est reprise par le terme "re-**fonctionnalisation**", de plus en plus utilisé par divers acteurs depuis la promulgation de la loi Climat et résilience.

**La réaffectation** est un terme venant également de l'écologie de la restauration, désignant le changement d'usage d'un site, généralement en améliorant les conditions écologiques.

En comparant les définitions de ces termes avec celle de la renaturation, on peut **identifier des croisements** :

- La renaturation, tout comme la (re)fonctionnalisation, la réhabilitation et la restauration, vise la restitution des fonctions écologiques. Cet objectif est élargi au cas de la restauration par la restitution d'un état ancien, préexistant.

- La renaturation partage avec l'affectation la notion de changement d'usage du site.

La recherche est encore en cours, avec un état de l'art sur la question de la renaturation des sols, l'objectif étant d'identifier les axes principaux autour desquels les recherches sur ce sujet tournent actuellement. Pour le moment, **trois axes de recherche sont identifiés :**

- la planification du projet
    - évaluation des fonctions ou services écosystémiques fournis par le sol
    - adaptation de l'usage en fonction des propriétés des sols
- la mise en œuvre
    1. impacts des techniques de renaturation sur le sol, la faune et la flore
    2. mise en œuvre des techniques de renaturation du sol
- et le suivi des projets, qui semble moins étudié jusqu'à présent.

**Deux pistes de recherche** complémentaires qui m'intéressent, pour conclure :

- l'identification des objectifs pour un projet de renaturation,
- le choix des techniques de fonctionnalisation adaptées au contexte.

**QUESTIONS**

- ***M. Salin :*** J'ai été confrontée moi aussi, pour ma thèse, à ces enjeux sémantiques. Par rapport aux définitions posées, toutefois, il m'a semblé rencontrer le termes « restauration des sols urbains » sans référence à un retour à un état passé des sols, auquel cas, la définition se rapprocherait beaucoup de celle du terme « fonctionnalisation », qu'en pensez-vous ?

  ***Réponse L. Madl :*** En effet, si on enlève la référence à un état passé du sol, le terme restauration se rapprocherait de celui de fonctionnalisation. Je n'ai pas rencontré cette utilisation du terme, pouvez-vous m'envoyer le document en question ?
  M. Salin : Le voici (lien indiqué dans le fil de conversation)

## 5. Artificialisation des sols : l'agence Dédale et l'innovation sociale et urbaine

### Cécile Brazilier – Dédale

La **participation citoyenne dans les projets de revalorisation de la nature en ville** est fondamentale. Etudier *in vivo* et comprendre cette participation citoyenne nous intéresse particulièrement .

Dédale est une **agence d'innovation urbaine et sociale** qui existe depuis 2002. Nos **domaines de compétences** incluent l'urbanisme, les questions de nature en ville, l'aménagement, la mobilité, mais aussi la culture et l'éducation. Nous travaillons à l'échelle locale (Paris et banlieue), mais aussi à l'international. Nous sommes impliqués dans des projets Horizon Europe, Erasmus+, Creative Europe, CERV, DUT, etc.

**Nos activités** comprennent la gestion de projets, la recherche et l'expérimentation, la création d'événements artistiques, les études et l'assistance à maîtrise d'ouvrage pour les collectivités locales, et plus récemment, la gestion du Rosa Lab, un tiers-lieu de 300 m2 lié à un jardin partagé de 600 m2, situé dans le nord-est parisien (19$^{ème}$ arrondissement). Cet espace et quartier environnant est labellisé **Smart City Living Lab** par le label européen EnoLL, soutenu par la Commission européenne, qui met l'usager au centre d'un projet de recherche en collaboration avec les autres parties prenantes (collectivités territoriales, laboratoires, secteur privé).
le citoyen, l'usager est au centre des préoccupations et donc, des projets que nous proposons.

Nous définissons notre Living Lab comme un espace de recherches et d'expérimentations sur la ville durable et innovante, où le citoyen, l'usager, est au centre des préoccupations et donc des projets que nous proposons.

Travailler selon ce principe de co-création avec les habitants et qu'il soit reconnu par les institutions a été un processus graduel. Au départ, nous étions engagés dans des actions activistes avec les citoyens. Nous avons mis en place des actions telles que la Guérilla Gardening avec des élèves de l'École Nationale du Paysage, et des événements comme le Parking Day pour questionner la place de la voiture en ville et promouvoir des espaces de nature. Lors de cette action de Guérilla Gardening, nous avons été confrontés aux réalités des sols urbains : sols compactés, naturalisation des sols, etc. Nous avons cherché des procédés de naturalisation à long terme avec l'utilisation d'une palette végétale peu exigeante en termes d'entretien et susceptible de se développer seule.

Ces projets d'activisme nous ont conduits vers **l'urbanisme tactique**, qui privilégie les modifications progressives et expérimentales avant de passer aux changements permanents. Par exemple, à partir de l'expérience du Parking Day, nous avons mené un projet avec la ville de Paris pour tester des usages innovants des zones de parking : transformation d'espaces de 8 mètres carrés en zones de revégétalisation ou en espaces de coworking ou de bibliothèques, sur une période de six mois.

Nous avons également mené des actions de concertation sur la question de la Nature en ville en impliquant des citoyens, des chercheurs, et des ONG, sous forme d'ateliers participatifs dans l'espace public. En 2012, la question de l'artificialisation des sols était déjà prépondérante.

En 2013, nous avons été labellisés Living Lab (réseau ENOLL soutenu par la Commission européenne). **En 2014, nous nous sommes rapprochés de l'Université** avec un projet de recherche mené par le Lab'Urba sur l'intervention artistique comme levier d'innovation dans les projets urbains. En 2016, nous avons commencé à répondre à des appels d'offres d'AMO (assistance à maîtrise d'ouvrage).

Toutes ces démarches nous ont conduit à participer au concours Réinventer Paris. Cela nous a permis d'être lauréats de deux projets, l'un dans le nord-est parisien, L'Îlot Fertile avec LinkCity, et l'autre dans le sud de Paris, Le Cercle, gagné avec le groupe Pichet.
**En 2023, nous avons commencé à gérer le Rosa Lab** (situé dans L'Îlot Fertile).

Notre **méthodologie de co-création** consiste à nous interroger sur les points suivants :

Quels sont les intérêts des habitants pour le projet ? Quel est le contexte géographique et socio-économique ? Quelle typologie d'habitants peut (ou doit) être impliquée dans le projet (familles, personne sans emploi, communautés issues de l'immigration, étudiants,…)? Comment ? Quelle est l'échelle du projet (locale, nationale) ?
La dimension ludique et conviviale d'un projet de co-création est souvent essentielle pour impliquer des habitants.
Pour aller à la rencontre des habitants nous utilisons les canaux de communication suivants : réseaux sociaux, médias généralistes ou spécialisés, cooptation, porte à porte, tractage, centres civiques et sociaux du quartier, jardins partagés…

Nous travaillons actuellement sur la **mise en place d'un Living Lab français pour la Mission Soil de la Commission européenne (Programme Horizon Europe)**, en collaboration avec le CEREMA, la ville de Paris, et le Transformateur à Saint-Nicolas-de-Redon. Nous voulons étudier comment la participation citoyenne peut être cruciale dans la renaturation des sols urbains en nous intéressant aux aspects légaux, sociaux et économiques.

En résumé, notre engagement dans la revalorisation de la nature en ville à travers la participation citoyenne et l'innovation ouverte nous permet de créer des projets durables et inclusifs, en collaboration avec divers acteurs et en intégrant les habitants au cœur de nos démarches.

## 6. Les coûts de la restauration des sols urbains

**Mathilde Salin** – CIRED / Banque de rance

Le projet présenté, mené avec d'autres chercheurs du CIRED, notamment Charles Claron, Elodie NGuyen Rabot, Nicolas Mondolfo et Harold Levrel, porte sur l'évaluation des coûts de la restauration des sols urbains.

Le fait de rendre la ville résiliente au changement climatique nécessite notamment des sols fonctionnels. Ils doivent pouvoir fournir de nombreux services écosystémiques nécessaires, et être des supports de Solutions fondées sur la nature, dans le contexte du changement climatique. Une gestion durable des sols urbains implique certes de préserver l'existant autant que possible, mais aussi de mener des actions de restauration.

Restaurer les sols urbains devient un enjeu politique, à toutes les échelles, dans le cadre des objectifs « Zéro Net » :

3. à l'échelle internationale, on a des objectifs de type Zéro net, par exemple l'objectif de développement durable (ODD) n° 15.3 : neutralité de dégradation des terres, notamment par la restauration des terres et des sols. On trouve aussi des objectifs dans le cadre de la COP 15 : restauration de 30 % des écosystèmes terrestres et marins dégradés, d'ici 2030.
4. À l'échelle européenne, on a des objectifs, par exemple dans le projet de loi sur la restauration de la nature, voté par le Parlement européen, qui vise à accroître les espaces verts urbains de 5 % d'ici 2050.
5. En France, on a l'objectif de Zéro artificialisation nette (ZAN), le "net" impliquant des actions de désartificialisation des sols.

Les connaissances sur les sols sont souvent considérés comme le parent pauvre dans les processus de restauration écologique, notamment pour les sols urbains. Même si on trouve un nombre croissant de publications sur ce sujet, les connaissances techniques restent assez disparates, avec des informations dispersées entre différents corps de métiers et des niveaux de connaissances inégaux.
Par exemple, les questions de dépollution des sols ou de désimperméabilisation sont assez bien connues et structurées, car il existe des corps de métiers spécifiques dans ces domaines. D'autres sujets, comme la construction de sols, sont plus émergents et encore moins bien compris. Et Il y a peu de connaissances intégrées sur la filière de la restauration des sols urbains et sur les coûts associés à ces opérations.

Une référence sur le sujet est le rapport de France Stratégie, publié en 2019, qui propose une estimation de ces coûts de restauration des sols. Après avoir décomposé le processus en plusieurs étapes et évalué les coûts de chacune d'entre elles, le rapport estime des coûts de renaturation allant de 33 € par mètre carré pour une construction de technosol seule à 455 € par mètre carré pour des restaurations impliquant toutes les étapes (déconstruction, dépollution, construction de technsols…), avec les hypothèses de coûts les plus élevés.
Cette estimation demeure néanmoins incomplète : les sources sont anciennes ou absentes, et la méthodologie utilisée n'est pas décrite. Cette publication ne portait d'ailleurs pas essentiellement sur les coûts de la restauration des sols urbains, mais plus largement sur les leviers de protection des sols et la question de l'artificialisation des sols en France.

La question que nous nous posons dans ce projet est donc : **comment et à quel coût restaurer les sols urbains ?**

La méthode retenue comprend deux temps :

1) Entretiens préalables pour bien s'approprier la thématique et structurer la 2ème étape (enquête), en segmentant les opérations de restauration des sols. Ces entretiens ont été réalisés auprès de 10 responsables de réseaux scientifiques, techniques ou professionnels liés au génie écologique, ainsi que des scientifiques et responsables de programmes de financement, par exemple à l'ADEME.

   10 étapes de la restauration des sols ont été identifiées :

   1. Planification, incluant des concertations avec les citoyens,
   2. Maîtrise foncière (achat du foncier),
   3. Étapes préalables, comme les analyses techniques du sol et les études agropédologiques,
   4. Démolition éventuelle de bâti,
   5. Modification du revêtement du sol,
   6. Étapes d'assainissement du sol, incluant la dépollution,
   7. Travail du sol, incluant la construction de sols,
   8. Gestion des terres et des déchets générés,
   9. Végétalisation,
   10. Gestion et le suivi de l'état du sol.

2) Enquête sur ces étapes, pour stabiliser une liste de sous-étapes et récolter des estimations de coûts.

46 entretiens ont été réalisés sur la base d'un questionnaire, et des devis et autres documents de coûts ont été recueillis auprès d'acteurs du réseau l'A-Igeco, une association professionnelle autour du génie écologique, puis par effet « boule de neige » (les experts interviewés pouvant nous mettre en contact avec d'autres personnes susceptibles de répondre à nos questions).

Les résultats montrent que **les diverses étapes ont des coûts qui peuvent être assez disparates**.
Par exemple, l'assainissement du sol et la démolition de bâti sont particulièrement coûteux, tandis que les études préalables et la végétalisation sont moins onéreuses (en €/m$^2$).

Des **facteurs de variabilité des coûts** ont aussi pu être identifiés, tels que :

- possibilités d'économies d'échelle
- présence d'amiante lors de la démolition
- niveau de pollution du sol, etc.

Le choix de segmenter une opération de désartificialisation en plusieurs étapes et sous-étapes permet ensuite de les agencer entre elles pour créer des **itinéraires techniques pertinents** selon l'état initial d'un site et l'état escompté.

A partir de ces itinéraires techniques, des scénarios ont été développés, représentant le passage d'un état initial fortement artificialisé à un état final avec un sol restauré.

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

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

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

## 7. Le jumeau numérique environnemental : un outil d'aide à la décision pour répondre à l'objectif ZAN 2050 ?

**Sylvain Riss** – WSP|BG Ingénieurs Conseils, et **Fanny Josse** – UGE / WSP | BG ingénieurs Conseils

**Sylvain Riss**
WSP|BG Ingénieurs Conseils est un bureau d'ingénierie dans le domaine des infrastructures, bâtiment, énergie, industrie, eau et environnement. Nous nous positionnons également comme conseillers pour nos clients sur les enjeux liés à la ville et à l'aménagement urbain. Dans ce cadre, des questions importantes sont posées concernant la gestion de la complexité urbaine, notamment en ce qui concerne l'artificialisation des sols, une problématique de plus en plus pressante pour nos clients.

Notre démarche est orientée vers le digital. Nous avons cherché à déterminer quels dispositifs pourraient être mis en place pour croiser toutes les données évoquées précédemment. Nous envisageons d'aller jusqu'à des simulations portant sur l'horizon 2050 pour les zones urbanisées. L'idée est donc de créer un dispositif intégrant des données urbaines que nous traiterons et simulerons. Dans cette perspective, Fanny va expliquer ce que nous appelons un jumeau numérique.

**Fanny Josse**

Ce travail s'inscrit dans une thèse Cifre en urbanisme, débutée en 2022. Elle est encadrée par le laboratoire Lab'Urba, sous la direction de Bruno Barroca à l'Université Gustave Eiffel, et est également soutenue par WSP|BG, avec l'accompagnement de Sylvain.
L'objectif de cette thèse est d'explorer les concepts de conception numérique et de planification urbaine en lien avec le territoire. Nous abordons notamment les notions de Building Information Modeling (BIM) et de City Information Modeling (CIM), ainsi que celles de Smart City et des données territoriales.

Dans ce contexte, nous nous concentrons particulièrement sur les données liées aux sols et à leur artificialisation, afin de comprendre la notion de jumeau numérique. Ce concept, bien que relativement ancien, date des années 1970 et a été initialement développé par la NASA pour l'ingénierie industrielle. Aujourd'hui, il trouve des applications dans divers domaines multidisciplinaires, tels que la médecine et la construction.

Un des premiers défis a été de **définir précisément ce qu'est un jumeau numérique**, car chaque domaine l'interprète différemment. Après une analyse approfondie de la littérature scientifique et technique, nous avons défini le jumeau numérique comme **un avatar d'un ensemble d'entités physiques, basé sur la continuité des données dynamiques et statiques**. Cette continuité est essentielle car elle permet de simuler, diagnostiquer, surveiller et contrôler le comportement des composants physiques tout au long de leur cycle de vie.

Pour réintroduire brièvement **l'objectif ZAN 2050**, il s'agit de l'artificialisation des sols, mesurée quantitativement par l'augmentation de la superficie des sols artificialisés et qualitativement par la transformation des caractéristiques des sols naturels. Ce concept est renforcé par la loi climat et des mesures complémentaires adoptées en 2023, et nécessite une mise à jour continue.

Les **principales questions de recherche** tournent autour de la capacité d'un jumeau numérique environnemental à servir d'outil d'aide à la décision pour atteindre l'objectif 2050. Nous devons relever plusieurs défis, notamment :
- la **complexité juridique entre le droit de l'environnement et le droit de l'urbanisme**,
- la **multiplicité des interprétations des calculs**,

- la **diversité des acteurs et décideurs impliqués**.

L'enjeu est de développer un outil **facile à utiliser**, **transparent** en termes de données et de calculs, et **capable de s'adapter rapidement** aux évolutions réglementaires.

Notre méthodologie comporte plusieurs étapes clés :

1. **Analyse bibliographique** : Consultation de la littérature scientifique et technique pour identifier une liste non exhaustive de jumeaux numériques environnementaux déjà existants, en examinant leurs cas d'usage et leur pertinence par rapport à l'objectif ZAN.
2. **Analyse fonctionnelle** : Détermination des données nécessaires à la création d'un jumeau numérique environnemental et identification des méthodes de conception les plus appropriées.
3. **Analyse des besoins des acteurs** : Identification des besoins spécifiques des acteurs impliqués dans la conception du jumeau numérique pour le cas d'usage du ZAN.

Les premiers résultats indiquent que pour répondre à un cas d'usage du ZAN, il est nécessaire **d'intégrer des données spécifiques du territoire, en 2D ou en 3D**. Nous développons actuellement un prototype intégrant les modélisations 3D des projets urbains en cours.

Nous avons mené une enquête pour **identifier les besoins et les données pertinentes**, en déterminant leur **provenance**, leur **développement** et les **indicateurs de performance** pour chaque projet. Le processus inclut **l'identification des données de base récurrentes et spécifiques** à chaque cas d'usage du ZAN.

Ensuite, nous avons **analysé les besoins en termes d'outils et de fonctionnalités**, ainsi que **l'appropriation du système par les utilisateurs**.

Nous avons défini différents **scénarios** pour proposer un outil d'aide à la décision offrant plusieurs solutions.

Notre analyse est structurée autour de nombreuses catégories de données, y compris des données météorologiques, chacune ayant ses propres sources. Il a fallu identifier ces bases de données, vérifier leur fiabilité et leur intégration dans le système. Nous proposons donc une plateforme permettant de lire plus facilement les données statiques et dynamiques.

Pour conclure, nous proposons une réflexion ouverte sur la conception des jumeaux numériques, en soulignant leur application à l'ingénierie système. Il s'agit de représenter des modèles basés sur des systèmes opérationnels et fonctionnels, afin de créer des outils spécifiques à chaque cas d'usage.

Cependant, il est important de reconnaître les **limites actuelles**.

La difficulté réside dans la représentation des territoires, notamment des sols : « Le territoire n'est pas un système automatisé qui peut être facilement compris et prédit, mais plutôt **un système vivant qui évolue constamment** à travers les variations et les développements de ses constructions physiques, de ses activités économiques et politiques, de ses cadres sociaux et culturels. »

De ce fait : « La technologie de simulation actuelle ne peut toujours **pas saisir les détails complexes** des matériaux et des dimensions d'une infrastructure, **ni décrire les facteurs environnementaux externes complexes** ».

Les recherches futures devront donc se concentrer sur l'amélioration des capacités de simulation et l'intégration des nouvelles technologies pour mieux comprendre et gérer les territoires, en particulier les sols.

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

**Caroline Gutleben** – Plante et Cité

On constate aujourd'hui une visibilité des enjeux de la nature en ville sans précédent depuis ces dernières années. On peut prendre un moment pour regarder en arrière afin de mesurer le chemin parcouru, et observer notre situation actuelle et les enjeux qui nous attendent.

**Dans les années 70**, les espaces verts et la nature étaient principalement considérés comme des éléments ornementaux, destinés aux plus privilégiés. L'expérience de la nature était avant tout visuelle, caractérisée par des pelouses vertes bien entretenues et des arbres taillés avec précision. Les paysages étaient assez pauvres, avec une vision très utilitaire des espaces naturels.

**Dans les années 80**, les espaces verts ont évolué pour devenir des infrastructures sociales. L'émergence de grands parcs périurbains visait à répondre à des enjeux d'équité sociale, en offrant des espaces récréatifs au plus grand nombre, dans une optique hygiéniste renouvelée. L'expérience de la nature se vivait alors à travers des activités récréatives et sportives dans de grands espaces, même si les préoccupations écologiques n'étaient pas encore au premier plan.

**Dans les années 90**, la **gestion différenciée** a marqué les prémices d'une transformation écologique. Des villes comme Rennes et Montpellier, précurseurs en la matière, ont développé ce mode de gestion pour appliquer un niveau d'exigence et d'entretien adapté aux usages sociaux, culturels et écologiques des espaces verts. Cette évolution a permis de questionner les pratiques d'entretien standardisées et de diversifier les paysages, en introduisant des méthodes d'entretien plus extensives et favorables à la biodiversité.

**Dans les années 2000**, les trames vertes urbaines ont émergé, en lien avec le Grenelle de l'environnement. Ce concept visait à intégrer les espaces de nature dans les zones urbaines, afin qu'elles ne constituent plus un obstacle à la biodiversité, mais qu'elles recréent des conditions favorables pour les espèces animales et végétales. On a mobilisé des outils d'urbanisme et des politiques foncières pour retisser les liens entre la ville et les milieux naturels, ainsi qu'à l'intérieur même des villes, en créant de petits espaces verts.

Cette approche a pu se concrétiser à l'échelle des quartiers. Les aménagements ont été pensés pour développer une vision écosystémique de la nature en ville, avec l'évolution de la compétence GEMAPI (Gestion des Milieux Aquatiques et Prévention des Inondations) dans les blocs intercommunaux. Cela a permis de créer des paysages capables de contenir l'eau et de soutenir la biodiversité.

Certaines collectivités ont même développé des gammes végétales spécifiques, en produisant des semences d'origine locale pour favoriser les pollinisateurs.

Demain, quels sont les enjeux qui nous attendent ? Nous constatons que les espaces verts et la nature jouent un rôle important pour la santé des habitants, en réduisant les îlots de chaleur et en améliorant le confort thermique. Ils sont également essentiels pour la santé sociale, en créant des liens communautaires et en rééquilibrant l'équité sociale dans les quartiers denses.

**Les enjeux futurs** sont de quatre ordres.

Premièrement, la **pression foncière** constitue un défi majeur. Il est crucial de **préserver les espaces de nature, y compris les petits espaces privés** et les cœurs d'îlots, qui jouent un rôle important pour la biodiversité et les liens sociaux.

Deuxièmement, il existe une **controverse scientifique sur les essences à planter** face aux effets du changement climatique. Il est nécessaire de diversifier les plantations pour assurer leur résilience et éviter la perte de capital écologique.

Troisièmement, l'urgence d'agir doit être équilibrée avec la **temporalité de la nature**. Les sols et les arbres nécessitent du temps pour se développer. Il est essentiel de préserver l'existant dans les documents de planification et les étapes de chantier.

Enfin, les enjeux de la nature en ville dépassent désormais les sphères de spécialistes. Il est important de **faire travailler ensemble des compétences variées**, en intégrant des écologues, des pédologues et autres experts pour des projets pérennes et fonctionnels.

Il est également crucial de **ne pas recréer une standardisation des espaces verts ni de céder au marketing en écologie**. La nature en ville doit être envisagée comme une approche globale nécessitant une ingénierie du vivant, intégrant toutes les compétences nécessaires pour répondre aux défis écologiques et sociaux de demain.

## QUESTIONS / DISCUSSION

***Cécile Brazilier* :** dans la conduite du vivant, il faut regarder comment la nature évolue par elle-même ; on peut regarder de ce qui se fait du côté des friches notamment. Des expérimentations ont été faites (notre action Guerilla Garden) avec des plantes pionnières qui ne sont pas forcément des plantes locales, mais qui ont permis d'implanter un sol qui est aujourd'hui toujours en place.

***Caroline Gutleben*** : En effet, il est important de ne pas avoir de vision manichéenne sur les types de plantes souhaitables pour la renaturation : cela dépend des espaces, des situations. Par exemple, on peut avoir des approches diverses envers des plantes jugées comme des espèces envahissantes : essayer de contenir leur développement, les laisser se développer librement, les gérer… La nature en ville est à créer, et il y a une diversité de problématiques, de contraintes et de possibilités. Le degré d'intervention humaine sera variable selon les cas : pour des arbres d'alignement par exemple, on ne peut pas compter uniquement sur de la régénération spontanée. Dans certains milieux densément habités et/ou à usages multiples, on est aussi en face d'injonctions très fortes qui peuvent être contradictoires, ce qui amène à réfléchir au dosage du niveau d'intervention nécessaire.

***Cécile Brazilier :*** Autre question importante : celle de la façon dont les habitants prennent part à cette gestion du vivant, des sols etc. dans la ville. On pourrait imaginer d'évaluer la valeur économique de cette gestion par les habitants.

***Mathilde Salin :*** pour cela, il faut s'interroger sur ce que coûte déjà la gestion de la nature en ville : le coût d'entretien des espaces verts par les mairies est par exemple estimé de 1 à 4 euros / an par $m^2$.

***Fanny Josse :*** les évaluations sont plus ou moins développées selon ce que l'on souhaite estimer. Pour les bâtiments, on sait évaluer les coûts de l'énergie, de la maintenance etc. Sur la ville, on peut évaluer assez bien le coût de la gestion du risque inondation, des îlots de chaleur, des nuisances telles que les pollutions diverses.

***Anne Ruas :*** Autre question : quelle prise en compte des petits espaces verts existants? Ils sont importants à l'échelle de la ville (cours intérieures, îlots centraux, jardins privatifs…) mais le ZAN ne les concerne pas. Comment éviter leur disparition, quels outils peuvent être mobilisés ?

***Réponse – Caroline Gutleben :*** En effet, seulement **10 à 15 % des espaces verts d'une ville sont publics, le reste relève du privé**, ce qui pose la question de sa préservation. Il existe des outils ou des leviers, comme des relevés utilisés pour des zonages ou des classements, y compris à partir d'un seul arbre.
***Nadège Bouquin, Anne Ruas :*** des initiatives nouvelles voient le jour en ce sens, comme par exemple la possibilité d'une prise en charge de l'entretien de ces espaces par la collectivité, en échange d'un accès ouvert aux habitants non résidents.
***Stéphanie Joimel :*** en effet, de plus en plus de collectivités réfléchissent aux moyens d'agir sur ces espaces privés : comment acquérir des terrains, ou inciter les acteurs concernés à développer la préservation ?
A noter : le Géoportail de l'Urbanisme permet une cartographie fine de la composition du tissu urbain.

***Christophe Schwartz :*** Il faut souligner aussi le besoin de formation sur ces sujets, avec des approches nécessairement croisées. Les laboratoires vivants (Living Labs) devraient faire l'objet d'une appropriation plus large par les acteurs de la recherche.

## CONCLUSION

Suite aux quatre réunions du GT, dont 1 réunion introductive de cadrage et 3 réunions thématiques, un travail de restitution et de synthèse va être engagé. Il donner lieu à une note de synthèse, avec des propositions d'enjeux prioritaires pour la recherche et l'innovation liés au développement de la nature en ville.

Les membres du GT seront consultés pour relecture, enrichissement et validation, avec si possible une réunion sur la base d'un premier texte (fin septembre/octobre), ou en tout cas des échanges par mail.

Un événement de présentation et de discussion ouvert sera organisé en fin d'année, sans doute en novembre.

Un grand merci aux intervenants et aux membres du GT pour leur participation et leurs précieux apports et à bientôt !

## Participants à la réunion (visioconférence)

| Nom | Prénom | Organisation |
|---|---|---|
| ***En présentiel*** | | |
| BOUQUIN | Nadège | ANRT |
| MATLOSZ | Michael | Université de Lorraine / Académie des Technologies / ANRT |
| RUAS | Anne | Université Gustave Eiffel |
| ***En distanciel*** | | |
| ANISS | Hasnaa | Université Gustave Eiffel |
| ASSAF-MEDAWAR | Eleni | ADEME |
| BENAMROUZ-VANNESTE | Sadia | FGES, ICL |
| BERT | Valérie | Ineris |
| BETIS | Gilles | ESTP |
| BRAZILIER | Cécile | DEDALE |
| CAUDAL | Estelle | IAUR |
| DAGOIS | Robin | Plante et Cité |
| DEVIGNE | Laëtitia | Université catholique de Lille |
| DOUGUET | Emma | CdA La Rochelle_Service des études urbaines |
| FUGIER | Pascal | CEA |
| GABER | Jean | Cerema |
| GOSSELIN | Flovic | Université Catholique de Lille |
| GUTLEBEN | Caroline | Plante et Cité |
| IDIR | Rachida | Cerema |
| JOIMEL | Sophie | AgroParisTech |
| JOSSE | Fanny | UGE / WSP Ingénieurs Conseils |
| JOSSELIN | Jean-Pascal | IAU de Rennes |
| LE MEUR | Stéphanie | KARDHAM |
| MADL | Lukas | UGE / AREP |
| MARTINE | Robin | Orange |
| MILLAN | Caroline | COLAS SA |
| MORILLAS | Alexis | rougerie+tangram |
| PEYRAT VAGANAY | Charlotte | Inria |
| POURCHEZ | Carole | MTECT-CGDD-SRI |
| RISS | Sylvain | Directeur Groupe, Digital et BIM |
| SALIN | Mathilde | CIRED / Banque de France |
| SCHWARTZ | Christophe | INRAE / Université de Lorraine |
| SINSIN | Tudal | Altereo |
| STELLA | Patrick | AgroParisTech |
| TOUTAIN | Julien | SCE |
| TRIBOUT | Christelle | UPS |
| VIVIER | Baptiste | Holcim Innovation Center |
| ZAYAS | Marie | Le Mans Métropole |
| CHAUVEAU | Jules | Artelia |
| ROUSSELLE | Maryline | Université Catholique de Lille |
| CHAUVEAU | Jules | Artelia |