



i **F O R** *e* *VEES Paris*



Synthèse de la conférence

Sols urbains et biodiversité

Résultats de recherche et d'expérimentation



Mardi 21 novembre 2017
Ministère de la Transition écologique et solidaire
La Défense

Programme

I. Ouverture institutionnelle.....	3
II. Introduction : Qu'est-ce qu'un sol urbain ? État des connaissances et enjeux pour la transition écologique.....	5
III. Résultats de recherche : comment évaluer la qualité écologique des sols urbains ?.....	9
1. Évaluation des effets de la pression urbaine sur la qualité des sols : le cas des éléments traces métalliques dans les sols des pelouses et bois de la région Ile-de-France.....	9
2. Application des bio-indicateurs dans le cadre d'un projet de réaménagement urbain : résultats de recherche sur les Prairies Saint-Martin à Rennes.....	10
3. Évaluer la qualité des sols urbains via la biodiversité.....	13
4. L'ADN environnemental : une méthode innovante pour évaluer la biodiversité des sols urbains ?.....	15
IV. Panorama d'expérimentations pour préserver et restaurer les sols en ville....	18
1. Reconstitution de sols fertiles à partir du recyclage des déchets urbains.....	18
2. Trame brune et restauration d'habitats pour les abeilles terricoles à Lille.....	21
3. Phytoremédiation : l'exemple du Parc départemental du peuple de l'Herbe à Carrières-sous-Poissy.....	22
4. Construire en préservant les sols en place ? L'exemple du quartier du Séqué à Bayonne.....	24
V. Synthèse collective : quels enseignements et recommandations pour l'action publique et privée ?.....	27

Animation : Gilles Lecuir, Natureparif

I. Ouverture institutionnelle

- **Nicolas MOURLON**, directeur de l'Institut de formation de l'environnement (Ministère de la Transition écologique et solidaire/IFORE)

En tant qu'institut de formation, l'IFORE promeut l'environnement et le développement durable. Son objectif est de donner envie d'agir pour les transitions écologiques et énergétiques. Nous vous proposons de nous réunir dans ce cadre, pour évoquer les sols urbains et la biodiversité.

Vous venez d'horizons très divers : Etat, collectivités, professionnels, universitaires, bureaux d'études, associations. Il est important que des échanges s'installent, dans la salle et en marge de ce colloque. Cet événement est organisé en partenariat étroit avec Natureparif. Je remercie l'ensemble des équipes mobilisées. Le Commissariat général au développement durable, la DGALN et le Cerema sont également parties prenantes à cette conférence.

Nous souhaitons montrer aujourd'hui le croisement des différentes disciplines autour de la thématique des sols. L'IFORE s'emploie à faciliter les compréhensions et la transversalité pour enclencher les prises de décisions et les actions. L'enjeu est fort au niveau national et international, la lettre de mission du ministre de la Transition écologique et solidaire prévoyant la lutte contre l'artificialisation et l'appauvrissement des sols, l'une des principales menaces pour la biodiversité.

Au-delà de cette journée, nous organiserons le 5 décembre une conférence sur l'utilisation efficace des ressources naturelles, qui abordera à nouveau la question des sols.

- **Bruno BESSIS**, ministère de la Transition écologique et solidaire, direction générale aménagement, logement nature (MTES/DGALN)

Merci d'être présents aussi nombreux. Ces rencontres sont toujours des moments forts sur des sujets qui nous tiennent à cœur.

J'exerce à la Direction de l'Habitat, de l'Urbanisme et des Paysages au sein de la sous-direction Aménagement durable. La notion de « sols » n'apparaît pas dans ces appellations. Pourtant, ils se trouvent au cœur de nos politiques publiques. Outre l'approche quantitative, nous adoptons une approche qualitative. Beaucoup d'éco-quartiers se construisent sur des sols pollués. Dans le cadre de ces opérations, nous travaillons à leur dépollution.

Le Grenelle de l'Environnement a conduit à l'adoption de plusieurs plans d'actions, notamment le plan « *Restaurer et valoriser la nature en ville* ». Ce dernier comptait seize engagements, dont le neuvième portait sur l'amélioration des sols urbains et péri-urbains. Le pilotage autour de ce plan a été important.

La démarche Eco-quartier s'est développée. Ensemble, nous avons construit un référentiel pour porter ce label. Le référentiel comprend 20 engagements, dont le dernier vise à « *préserver et valoriser la biodiversité, les sols et les milieux naturels* ». L'aspect qualitatif est donc récent, mais important. L'engagement 20 regroupe quatre manières d'aborder les sols. La première voit les sols en tant que matière première pour apporter la « nature en ville ».

Cette approche constitue un axe fort des éco-quartiers. La gestion de l'eau est un second aspect. Dans tous les éco-quartiers, cette question abordée au travers de l'assainissement alternatif ou des zones d'expansion des crues, par exemple. Bien sûr, l'engagement évoque l'agriculture urbaine, désormais quasiment systématique dans les projets d'éco-quartiers. L'enjeu est de fournir aux collectivités des outils leur permettant d'intégrer cette thématique dans leurs opérations d'aménagement. Enfin, le quatrième axe porte sur l'adaptation de nos villes aux changements climatiques.

Nous avons travaillé sur la méthodologie d'évaluation de cet engagement 20. Cette méthode se décline en divers critères. L'un d'entre eux concerne la qualité et l'artificialisation des sols et propose deux indicateurs aux collectivités : le niveau de connaissance et d'usage des sols, d'une part, et le coefficient de biotope par surface, d'autre part.

Les progrès sont perceptibles. Nous entrons plus en profondeur dans l'appréhension des sols dans nos politiques globales de développement durable. Nous nous sommes particulièrement investis en 2016 en portant, avec Natureparif, le sujet des sols et de la biodiversité. Dernièrement, nous avons travaillé avec Vivapolis pour produire des fiches sur le thème « Sols et innovation ». Ces actions démontrent la prise de conscience des acteurs de l'environnement sur cette thématique.

L'engagement du gouvernement est fort sur ce sujet. Un *side event* « Solutions fondées sur la nature » s'est tenu en marge de la COP23. D'autres actions seront prochainement menées sur le thème de la biodiversité.

- **Gilles RAYE**, ministère de la Transition écologique et solidaire, Commissariat général au développement durable (MTES/CGDD)

Votre présence en nombre montre que le sujet intéresse de plus en plus de monde.

Le sol est une interface créée par la biodiversité. Nous avons tendance à distinguer la biodiversité, la fertilité et le stockage carbone, alors que les trois sujets sont liés : la biodiversité se trouve à l'origine de tout.

Au 13^e siècle, le territoire français comptait 21 millions d'habitants. La population s'est maintenue jusqu'au 17^e siècle avant d'être multipliée par 3,5. De fait, nous avons dû installer les citoyens. Jusqu'en 1840, la population est répartie sur le territoire, même si elle reste majoritairement rurale. En quelques décennies, le rapport s'inverse : 80 % des personnes se trouvent en ville et 20 % résident à la campagne. Les villes s'étendent aujourd'hui à un rythme de 60 000 hectares par an, soit l'équivalent d'un parc national. Tous les dix ans, la superficie d'un département disparaît. Dans l'antiquité et au Moyen-Age, les villes se sont installées sur les meilleures terres, qui disparaissent progressivement. Cette tendance doit s'inverser.

Le CGDD est à l'origine de plusieurs initiatives. Nous nous investissons fortement sur la question des sols compte tenu de l'implication du gouvernement, de la FAO et de l'Union européenne. La Commission européenne s'engage également. Les initiatives se retrouvent à tous les niveaux, y compris en local. La multiplicité des structures est incroyable. Nous avons fondé le réseau national d'expertise scientifique et technique sur les sols afin de créer des synergies entre les acteurs concernés. Ce réseau ERNEST conduira une politique de recherche

sur les sols. Le CGDD mène également la stratégie nationale pour une bonne gestion des sols. Nous attendons les directives du ministre de la Transition écologique pour avancer.

L'enjeu des sols urbains réside sur la reconquête de la biodiversité. Nous devons rendre les villes plus vivables. Les villes grossissent, les transports se développent, la pression sur les ressources s'accroît. Nous observons dans certaines régions du monde la création d'immeubles verts, capables de créer un sol artificiel et présentant un bilan carbone complètement neutre. Nous devons innover pour rendre les villes durables. Les collectivités avancent plus rapidement que les gouvernements, comme le démontre le plan climat de la ville de Paris.

Le CGDD soutiendra toutes les démarches autour de la préservation des sols. Nous sommes totalement dépendants des sols et de la biodiversité. Nous devons retisser le lien entre l'humain et la biodiversité.

II. Introduction : Qu'est-ce qu'un sol urbain ? État des connaissances et enjeux pour la transition écologique.

Luc ABBADIE, Institut d'Ecologie et des Sciences de l'Environnement (iEES-Paris)

Le sol est un objet important, mais toujours mystérieux. Il se définit par des études de terrain. Un sol est organisé de manière verticale. Nous observons plusieurs éléments constitutifs, en tête desquels les particules minérales. Celles-ci se constituent de particules de grande taille – gravillon, sable, etc. – et de particules plus fines, dites « argiles ». Ces dernières jouent un rôle majeur dans la qualité des sols. Nous trouvons également de la matière organique, particulièrement complexe à étudier, regroupant des glucides, des lipides et des molécules de toutes natures et de toutes tailles. La matière organique est importante pour la biodiversité, car elle représente une source de matériaux pour produire l'énergie nécessaire aux organismes et une source de matériaux de construction. Nous observons dans les sols une porosité au sein de laquelle circulent des gaz et de l'eau. Cette porosité détermine les conditions et le rythme de fonctionnement des organismes dans le sol. Enfin, les sols contiennent des organismes vivants de grandes ou de petites tailles. Les micro-organismes sont responsables d'une grande partie du fonctionnement initial du sol, la faune jouant un rôle de régulateur de l'activité microbienne.

Le sol est un milieu incroyablement vivant. Dans un sol de prairie, il est courant de compter 10^8 corps bactériens par gramme. Ces êtres vivants fonctionnent sur la matière organique. La carte mondiale du temps de résidence dans les sols montre des disparités importantes entre le nord et le sud de la France. Les êtres vivants utilisent très lentement le substrat de croissance à leur disposition, ce qui explique l'accumulation de matière organique dans le sol. Cette dernière constitue le premier stock de CO₂ à l'échelle mondiale – la quantité de carbone stockée dans les sols est deux à trois fois supérieure à celle présente dans l'atmosphère. La matière organique est capable de s'associer aux argiles, qui la préservent de l'activité enzymatique des microbes. En outre, la structure chimique de la matière génère des problèmes de rendement. Elle est un point clé pour la stabilité à long terme de la matière organique dans les sols.

Les stocks de carbone dans les sols sont plus importants dans les zones froides. Or le réchauffement climatique conduit globalement à réchauffer davantage ces zones froides. Cette évolution pourrait entraîner un déstockage massif de carbone des sols.

Les villes tendent à s'étendre, détruisant la végétation – source de carbone – et les sols, qui deviennent émetteurs de carbone. L'extension des villes sera responsable de 5 % des émissions liées à la déforestation tropicale, qui représente 17 % des émissions totales. L'enjeu carbone se trouve particulièrement dans la manière dont les sols seront gérés en milieu urbain.

A Paris, les arbres sont plantés dans une fosse contenant de la terre de champ, ce qui revient à une plante en pot. Ces sols ne seront pas régénérés puisque les débris végétaux, qui normalement alimentent le stock de carbone du sol, sont exportés et ne peuvent donc plus jouer ce rôle. Dès lors, perdront-ils de leur qualité ? Étonnamment, les études montrent que le carbone du sol augmente au cours du temps. Le développement du système racinaire expliquerait ce phénomène d'accumulation. Nous observons également une difficulté croissante de l'arbre en termes d'approvisionnement en eau.

Les sols urbains comprennent également les sols des toits d'immeubles. Il apparaît que l'effet de la profondeur sur la productivité végétale est positif. En outre, les sols artificiels sont capables d'engendrer une productivité plus élevée que les sols natifs, probablement car leur matière organique, plus récente, se décompose plus rapidement. À terme, cet effet devrait donc disparaître. La productivité végétale dépend toujours de la qualité du sol et de sa capacité à produire les éléments nutritifs.

La productivité de l'agriculture urbaine et son bilan environnemental dépendront énormément de la manière dont nous concevrons le cycle de la matière organique. Pour une agriculture durable dans les milieux urbains, nous devons raisonner en termes de recyclage des déchets organiques, notamment domestiques. Nous pourrions imaginer de boucler le cycle du carbone, ce qui n'est pas le cas actuellement.

L'atténuation de l'effet de chaleur urbain passe par l'évaporation du sol et la transpiration du sol – ce qui implique que le sol contienne de l'eau. Le pourcentage d'eau de pluie retenu par les sols varie avec les profondeurs, mais aussi avec la nature de sol et la diversité végétale. Le rôle de cette diversité dans cette capacité de retenue d'eau n'est pas expliqué.

La qualité de l'eau est un aspect important. Or dans les sols artificiels, l'eau se révèle extrêmement chargée en carbone organique dissous. La végétation peut servir d'outil pour contrôler ce carbone.

J'insiste sur un point : nous devons raisonner en termes de système, et non pas uniquement au regard du sol seul.

Plusieurs études portent sur la végétation des rues et la faune du sol. En revanche, la diversité microbienne des sols reste peu exploitée. Nous observons néanmoins qu'il n'existe pas d'effets déterminants de l'organisation spatiale sur la diversité microbienne. En revanche, selon la taille de l'environnement et sa fragmentation dans l'espace, la diversité des fourmis s'avère supérieure dans les espaces de grande taille comme les parcs.

Une étude préliminaire sur la diversité des vers de terre dans les parcs parisiens identifie une dizaine de clusters. Pour autant, nous ne parvenons pas à mettre en évidence de structuration claire de ces clusters.

En conclusion, soulignons que les sols urbains jouent un rôle majeur dans les cycles biogéochimiques. Ils rendent de multiples services de production et de régulation. Ils sont des outils potentiels d'atténuation des changements environnementaux et d'adaptation à ces changements. Qu'ils soient natifs, modifiés ou artificiels, le fonctionnement des sols urbains reste méconnu. Ces mondes, notamment le monde microbien, nous réserverons des surprises.

Discussion avec la salle

Nous entendons souvent parler de « désimperméabilisation ». Pensez-vous que cet enjeu soit important dans des secteurs très urbains ?

Luc ABBADIE

Oui, l'enjeu est important. Dans le milieu urbain, le phénomène de ruissellement l'emporte sur celui d'infiltration. Cette situation pose des difficultés. La « désimperméabilisation » est un enjeu de sécurité des personnes, mais aussi de santé. En effet, les périodes de canicule sont notamment fonction de la capacité de la végétation à évaporer de l'eau. Des modélisations montrent qu'une ville correctement couverte de végétalisation réduit la température de 7 à 8°C en période de canicule.

Yohan TISON, Ecologue à la ville de Lille

Le choix des végétaux doit avoir son importance dans le bilan d'évapotranspiration.

Une part du carbone est stockée dans l'humus. Il m'a été dit que le process restait peu efficace et qu'il était préférable de valoriser le bois par une filière de bois d'œuvre. La conservation du bois mort est-elle réellement anecdotique ?

Luc ABBADIE

La biodiversité joue un rôle dans la composition chimique des végétaux. En théorie, incorporer ce type de composé au sol revient à incorporer des molécules qui résisteront à la dégradation et s'accumuleront dans le temps. Si l'objectif est de maximiser la teneur en carbone du sol, il est en principe plus astucieux d'utiliser des parties de végétaux riches en molécules complexes. Le bois présente des propriétés de conservation à long terme plus importantes que d'autres végétaux. Tout l'enjeu repose sur l'incorporation du matériau au sol. La durée de vie en surface est moindre que dans les sols. Le bois doit donc être découpé en morceaux et incorporé. Des organismes pourront alors s'installer, créer de la porosité.

Gilles LECUIR

Le sol doit être désimperméabilisé, mais aussi perméable au mouvement des organismes vivants. Or les sols urbains sont souvent trop tassés.

De la salle

La norme NFU 44051 sur la qualité des composts n'est plus nécessairement adaptée à la fabrication du compost par les pratiques collectives. Une révision des textes est-elle envisagée ?

Luc ABBADIE

La qualité du compost peut se résumer au degré de compostage. Selon la qualité, l'effet sur la microflore du sol peut être fort ou nul. En apportant un compost mature, vous réduisez son degré d'énergie et stimulez moins la microflore en place. De fait, vous ne déstockerez pas le carbone. L'apport de matière organique tend à enrichir la matière organique du sol, mais l'énergie apportée peut engendrer le déstockage. L'enjeu est de déséquilibrer ces deux processus afin de ne pas stimuler les micro-organismes du sol. Cette problématique reste mal-maîtrisée.

De la salle

Un sol urbain est artificialisé. Tentez-vous de modéliser ce qui permet à un sol urbain reconstitué d'avoir une fonction opérationnelle ? Existe-t-il une taille significative pour reconstituer toutes ces fonctionnalités naturelles ?

Luc ABBADIE

Pour rétablir un fonctionnement, nous devons reconsidérer le sol comme un système. En théorie, nous pourrions réintroduire des végétaux spécialisés dans la colonisation de substrat. Certaines espèces sont facilitatrices. D'autres créent leur propre fertilité et se constituent un microenvironnement. Par contagion, vous rétablissez des fonctionnalités dans le sol. Il existe donc bien des processus permettant de rétablir les fonctions de base.

De la salle

Les plantations d'alignement en ville parviennent-elles à produire des mycorhizes ?

Luc ABBADIE

Des études ont été conduites sur les mycorhizes. L'une est en cours sur les arbres de Paris. Ces champignons sont souvent un agent majeur de la dynamique du carbone dans les sols. Ils assurent l'essentiel de la nutrition minérale des végétaux. Les champignons, comme les bactéries du sol, sont assez largement sous pilotage des systèmes racinaires.

De la salle

Des études ont-elles été menées sur le carbone que les différentes espèces d'arbres sont capables de stocker dans le sol ?

Luc ABBADIE

Nous connaissons les propriétés des arbres jouant sur le stockage de carbone. L'une d'elles est le schéma d'enracinement sur l'axe vertical. Plus profonde est la racine, plus profond est le carbone. Dès lors, il se conserve mieux. L'identité de l'espèce joue également un rôle important. Plusieurs études montrent une relation positive entre le niveau de carbone du sol, la diversité microbienne et la biodiversité végétale et aérienne.

III. Résultats de recherche : comment évaluer la qualité écologique des sols urbains ?

1. Évaluation des effets de la pression urbaine sur la qualité des sols : le cas des éléments traces métalliques dans les sols des pelouses et bois de la région Ile-de-France

Ludovic FOTI, doctorant CIFRE Natureparif – IEESParis

Les villes concentrent plus de la moitié de la population mondiale. D'ici 2050, elles représenteront plus de 6,3 milliards d'habitants. Les sols sont une composante cruciale des villes, car ils contribuent à de nombreux services écosystémiques, dont ceux fournis par les espaces verts urbains. La qualité des sols constitue ainsi un enjeu majeur pour la qualité de vie des citoyens et pour la durabilité des villes. Les sols urbains subissent de plus grandes pressions anthropiques que les sols présents dans les zones de moindre densité. Ces pressions modifient leurs caractéristiques et affectent leur qualité.

Je me suis concentré sur les origines, les sources et les degrés de contamination et de pollution en éléments traces des sols de la région parisienne. Les sols que j'ai échantillonnés sont ceux des bois et des pelouses des parcs. Au total, 180 sites de la région ont été retenus au regard d'indices sociodémographiques et d'îlots de chaleur. Nous pouvons ainsi définir une zone rurale, une zone péri-urbaine et une zone urbaine. Dans chaque zone, 30 échantillons ont été prélevés pour chacun des trois types d'usage des sols.

A partir des éléments traces et de leurs valeurs régionales naturelles de référence, nous avons défini les degrés de contamination et de pollution de chaque échantillon.

Les premiers résultats sont issus d'une analyse en composante principale conduite sur l'ensemble des concentrations en éléments traces présents dans les sols de la région Ile-de-France. Il apparaît que le fer est uniquement corrélé avec le deuxième axe. Ce dernier est donc identifié comme une origine naturelle en éléments traces. Les autres axes sont perçus comme une origine anthropique. L'arsenic, le chrome et le nickel sont également corrélés au deuxième axe, ce qui suppose qu'ils partagent une source naturelle commune. Le cadmium, le cuivre, le plomb et le zinc sont corrélés au premier axe, ce qui signifie que ces éléments traces sont d'origine anthropique et qu'ils partagent une source anthropique commune. Toutefois, le cadmium est aussi corrélé au troisième axe, impliquant qu'il relève de deux sources anthropiques différentes, dont la deuxième de moindre importance.

AXES	Source anthropique Axe 1	Source naturelle Axe 2	Source anthropique Axe 3
% variance expliquée	39 %	32 %	11 %
As	0.47	0.65	-0.43
Cd	0.57	0.01	0.71
Cr	-0.23	0.83	-0.26
Cu	0.86	0.25	0.17
Fe	0.08	0.89	-0.25
Ni	0.46	0.75	0.17
Pb	0.88	-0.06	-0.03
Zn	0.87	0.11	0.19

0,50 = seuil de significativité

Le degré de contamination des sols est classifié comme faible pour l'ensemble des éléments traces d'origine naturelle – arsenic, chrome et nickel. Il augmente de la zone rurale à la zone urbaine pour les deux types de milieux pour l'ensemble des éléments traces d'origine anthropique – cadmium, cuivre, plomb et zinc. Les sols des bois de la zone urbaine sont plus pollués et contaminés que les autres catégories. Les concentrations en éléments traces présents dans leur sol constitue un degré de contamination très élevés et constituent un risque écologique considérable.

Il apparaît donc que les concentrations en éléments traces anthropiques augmentent de la zone rurale à la zone urbaine. La circulation routière de la région Ile-de-France devrait être la principale source en éléments traces anthropiques, le cadmium, le cuivre, le plomb et le zinc étant reconnus comme des marqueurs de trafic routier – usure des freins et de pneus, essence, huiles de lubrification, etc. Les activités industrielles de la région devraient être la source secondaire. La plupart des concentrations en éléments traces anthropiques sont équivalentes ou supérieures aux valeurs de référence réglementaires.

Les sols des bois en zone urbaine sont plus contaminés et pollués que ceux des pelouses de cette zone. L'irrigation par les eaux usées pendant près d'un siècle explique vraisemblablement cette situation, ces eaux étant riches en éléments traces. En outre, ces sols étant plus anciens que les autres espaces verts, ils ont été exposés à de plus grandes quantités d'eaux usées et sont plus exposés aux conditions urbaines.

Le niveau de concentration en éléments traces dans les sols de la région suggère la mise en place d'un programme de surveillance des sols, le contrôle des activités à l'origine des dépôts et une attention particulière pour les sols des bois de la zone urbaine. L'agriculture urbaine devrait uniquement être développée sur les sites dont les niveaux de contamination et de pollution des sols ont déjà été évalués. Il reste nécessaire d'étudier les différentes formes chimiques des éléments traces présents dans les sols de la région pour mieux évaluer leur biodisponibilité et mieux comprendre les mécanismes à l'origine de leur accumulation.

2. Application des bio-indicateurs dans le cadre d'un projet de réaménagement urbain : résultats de recherche sur les Prairies Saint-Martin à Rennes.

Cécile GRAND, ADEME

L'étude a été conduite avec le maître d'ouvrage – la ville de Rennes – et le maître d'œuvre - EODD. L'ADEME est intervenu en tant que support et co-financeur. Le projet vise à réhabiliter des écosystèmes dégradés.

L'objectif est de proposer une boîte à outils pour évaluer quantitativement les fonctions du sol. Il s'agit également d'améliorer notre connaissance de la biologie des sols. A plus long terme, nous devons proposer une démarche d'évaluation des fonctions du sol selon les usages afin de préserver et restaurer les sols urbains.

L'étude sur le site des Prairies Saint-Martin portait sur d'anciens jardins ouvriers, une prairie et des boisements. La zone industrielle située à proximité est exclue du périmètre de l'étude. La ville de Rennes souhaitait réhabiliter le terrain pour permettre les ballades à pied et à vélo

et installer des aires de jeux, d'une part, et reconstruire une zone d'expansion de crues et reconstituer des zones humides, d'autre part. Les anciens jardins ouvriers doivent devenir des bassins alimentés par le débordement des canaux qui seront créés par le projet.

La ville de Rennes a proposé une caractérisation physico-chimique des sols. Les prélèvements ont mis en évidence que seuls les légumes feuilles étaient contaminés. La recommandation visant à ne pas planter de salades dans les futurs jardins n'a pas été retenue, car trop difficile à vérifier. Une seconde mesure consistait à ajouter 50 centimètres de terre végétale. Cette solution est complexe et coûteuse à mettre en œuvre. La ville de Rennes a préféré abandonner les jardins ouvriers pour supprimer le risque sanitaire.

Au-delà de l'interdiction au public, comment évaluer les transferts potentiels vis-à-vis de l'écosystème futur ? La zone doit être réaménagée en parc naturel urbain à forte valeur écologique en conservant les habitats en place. Quelle sera la qualité de ces sols ? Comment suivre la qualité des sols sur le long terme ? Nous avons proposé d'effectuer une surveillance pour évaluer le comportement des métaux à long terme.

Nous avons évalué la contamination des organismes vivant dans le sol pour estimer le transfert potentiel vis-à-vis des chaînes trophiques supérieures. Deux outils ont été proposés. Le premier consiste à réaliser un *pool* de végétaux, d'évaluer la teneur en métaux en leur sein puis d'estimer la moyenne des transferts. Le second outil repose sur la mise en œuvre d'un microcosme d'escargots sur un sol en vue d'apprécier la bioaccumulation dans les escargots après un mois. Ces deux outils ont permis de développer des indices et de constituer un référentiel.

Un programme de bio-indicateurs met en évidence les sols non-contaminés, moyennement contaminés et fortement contaminés. Nous appliquons les deux indicateurs sur ces sols. Il n'existe pas toujours de cohérence entre l'analyse physico-chimique et l'analyse dans les végétaux et les escargots. Un sol peut donc être très contaminé par les métaux, sans aucun transfert.

Nous avons proposé de compléter cette analyse par des données biologiques. Un indicateur d'effet basé sur l'analyse des lipides dans les plantes a également été utilisé pour mieux connaître l'effet des métaux sur les végétaux.

Il convenait par ailleurs d'améliorer la caractérisation des fonctions sols. Les propriétés intrinsèques du sol et les organismes biologiques ne sauraient être dissociés. Le sol subit des pressions, notamment lors des changements d'usages. Ces évolutions peuvent modifier les propriétés du sol, et donc ses fonctions. Une parfaite connaissance des fonctions du sol est nécessaire pour maîtriser un changement d'usage.

L'analyse pédologique des sols montre que ceux-ci sont limoneux, riches en matières organiques et très hydromorphes. Cette caractérisation pédologique est souvent omise. Pourtant, ces informations sont intéressantes.

Nous avons réalisé notre propre caractérisation chimique, qui met en évidence l'absence de contamination dans les prairies et les boisements, à l'inverse des anciens jardins ouvriers. La pollution est largement liée à l'historique des jardins, certains ayant été mieux entretenus que d'autres. Les pollutions étant très locales, le risque sanitaire aurait été particulièrement difficile à gérer. La ville de Rennes a fait le bon choix en supprimant ces jardins.

L'abondance des vers de terre est importante dans le bois, mais très faible dans les prairies.

Globalement, la qualité des sols est donc satisfaisante. Malgré la pollution, cette qualité permet de mener à bien le projet de réaménagement. Les bio-indicateurs ont permis d'évaluer la biodisponibilité des métaux, la biodiversité et le fonctionnement biologique des sols. Ils serviront également pour la surveillance à long terme.

Discussion avec la salle

De la salle

Pourquoi ne pas vous être intéressés aux HAP, premiers facteurs de déclassement de la qualité de l'eau en France ?

Ludovic FOTI

Je souhaite étudier la concentration des HAP dans les sols sur ces échantillons. A ce stade, je me suis concentré sur les éléments traces.

De la salle

Avez-vous étudié l'hypothèse selon laquelle le rabattage des particules fines et moyennes vers le sol est plus important dans les boisements ?

Cécile GRAND

Les jardins sont très anciens. Les pratiques culturelles et l'historique expliquent certaines pollutions. Des pratiques anciennes consistaient à répandre les cendres de la cheminée sur les sols. Un jardin est bien entretenu lorsque les apports de composts sont maîtrisés.

Ludovic FOTI

Les bois de la zone urbaine ont été restructurés sous la période haussmannienne. Le réseau d'égouts a été restructuré avec la ville. Plutôt que de rejeter les eaux dans la Seine, elles ont irrigué les espaces verts jusque dans les années 1950. Les conséquences futures de cet épandage d'eau usée n'avaient pas été prises en compte.

Je n'ai pas testé l'hypothèse selon laquelle les arbres captent les polluants atmosphériques.

De la salle

Pourquoi le mercure n'est-il pas référencé dans les études ? Pourquoi du cadmium est-il présent dans les eaux usées ?

Ludovic FOTI

Je n'ai pas pu exploiter les relevés de mercure, car la majorité des valeurs se trouvaient en deçà des limites de quantification.

Le cadmium est vraisemblablement présent dans les eaux usées en raison d'une accumulation sur le long terme des herbicides, notamment.

De la salle

Le rythme de gestion peut-il être un facteur et une solution à la gestion des polluants ? Les écologues prescrivent désormais systématiquement aux gestionnaires d'espaces verts la fauche avec exportation. Cette méthode est-elle favorable ?

De la salle

Les référentiels utilisés à Rennes ont été établis sur des milieux agricoles. Leur pertinence a-t-elle été évaluée pour les milieux urbains ?

Cécile GRAND

Nous nous sommes interrogés sur l'opportunité d'exporter les métaux contaminés. Dans notre périmètre, les quantités de métaux dans les plantes restent limitées. Parmi les dix ou quinze végétaux étudiés pour estimer l'accumulation dans les plantes, il n'est pas exclu que l'une soit phyto-accumulatrice. Pour autant, ces teneurs n'engendrent pas une gestion différente des espaces verts.

Les référentiels en milieu urbain débutent. Nous devons acquérir un retour d'expérience. L'ADEME est vigilante à rendre ces référentiels publics, car ils restent insuffisamment mis à disposition des maîtres d'œuvre, des maîtres d'ouvrage et des bureaux d'études.

Ludovic FOTI

Des résultats montrent l'impact de l'exportation du produit des fauches sur la qualité de la matière organique, notamment sur sa composition. J'ai tendance à estimer qu'il faut éviter d'exporter ces produits. Tout dépend de quel point de vue on se place : stockage du carbone ou biomasse microbienne.

De la salle

Les botanistes recommandent en ville d'exporter les produits de fauche des prairies pour favoriser l'installation d'espèces plus diversifiées et de plus en plus rares en ville.

Les espèces phyto-accumulatrices sont les seules capables de pousser sur des sols très pollués. De fait, elles sont très abondantes dans les friches.

3. Évaluer la qualité des sols urbains via la biodiversité**Sophie BOULANGER-JOIMEL, AgroParisTech**

La qualité d'un sol est sa capacité à remplir des fonctions et assurer des services écosystémiques. Nous pouvons nous intéresser aux propriétés physico-chimiques du sol – fertilité, contamination, etc. – ainsi qu'à ses propriétés biologiques – abondance des organismes vivants, diversité des espèces, etc.

Plusieurs menaces pèsent sur la biodiversité des sols urbains. L'effet de l'activité humaine implique des modifications physico-chimiques des sols. Dès lors, le risque existe d'influencer

la biodiversité. Sur ces questions, les études se concentrent généralement sur la forêt et le milieu agricole, et non sur les milieux urbains.

En milieu urbain, les études avancent souvent l'hypothèse d'une homogénéisation biotique – les mêmes espèces se retrouveraient dans chaque ville.

Les organismes du sol sont particulièrement divers. Nous les classons souvent selon leur taille – microfaune, mésofaune, macrofaune et mégafaune. Ces groupes sont utilisés comme bio-indicateurs. Toutefois, aucune méthode ne permet d'étudier la totalité de ces groupes simultanément. Nous concentrerons cette étude sur les collemboles, particulièrement abondants dans les sols. Ils jouent un rôle important dans les cycles du carbone et de l'azote et sont souvent utilisés comme bio-indicateurs des pollutions physico-chimiques.

Les protocoles de prélèvement sont précis, mais ne s'adaptent pas à tous les milieux. Par exemple, comment récupérer des échantillons à 25 centimètres de profondeur dans un toit végétalisé ? Comment appliquer sur un jardin de 50 mètres carrés des méthodes développées pour des parcelles de plusieurs hectares ?

Lors d'une précédente étude, nous avons étudié la qualité des sols de jardin familiaux à l'échelle française. Les données ont été comparées à des sols agricoles et urbains. A partir de 2 450 échantillons, nous observons une augmentation de la contamination et de la fertilité dans les jardins.

La biodiversité des collemboles dans les sols urbains a été étudiée sur la base de 3 000 échantillons. Il apparaît que les sols de jardin sont un refuge pour la biodiversité, où les collemboles sont abondants. Les importantes ressources trophiques présentes dans les jardins expliquent ce phénomène.

Certains collemboles vivent en surface tandis que d'autres s'installent plus en profondeur. *A priori*, plus les organismes sont nombreux en profondeur, meilleure est la qualité du sol. Sur la base de cet indicateur, les forêts, les jardins potagers et les sols urbains et industriels présentent la meilleure qualité. Ces résultats confirment les résultats obtenus en matière d'abondance et de diversité.

Pour vérifier l'hypothèse d'une homogénéisation biotique, nous avons étudié les communautés dans le grand Nancy, à Nantes et à Marseille. Nous ne relevons pas d'homogénéisation biotique des collemboles dans les jardins de ces différentes régions. D'autres études récentes soulèvent la complexité de ces analyses pour d'autres espèces tels que les vers de terre.

Nous avons aussi étudié la qualité des sols des toits végétalisés potagers et extensifs. Les qualités physico-chimiques diffèrent fortement entre ces deux types de sol. Toutefois, en terme de biodiversité, nous n'observons pas d'écarts d'abondance et de diversités. Des disparités apparaissent en terme de composition. Les collemboles des toits potagers proviennent des composts tandis que les collemboles des toits extensifs ont des caractéristiques qui leur permettent d'être emportés par le vent et de coloniser. Le type de paysage influe donc sur des organismes de deux millimètres tels que les collemboles. Nous devons encore déterminer les implications de ces différences sur le fonctionnement des espèces et leur rôle dans les sols.

Ainsi, les pratiques, les conceptions et l'urbanisation impactent les communautés présentes. Il convient d'améliorer les recherches scientifiques et le dialogue entre acteurs pour prendre en compte la biodiversité comme une composante de la construction d'infrastructures vertes dans les villes.

Discussion avec la salle

De la salle

Un jardin urbain se compose de nombreux micro-milieus. Avez-vous défini ce qu'était un milieu homogène ?

Sophie BOULANGER-JOIMEL

Nous ne nous sommes pas intéressés à l'effet de ces micro-habitats, mais cette étude serait intéressante.

De la salle

Lorsque l'anthropisation s'accroît, le PH des sols augmente : pour quelles raisons ?

Sophie BOULANGER-JOIMEL

Le phénomène de chaulage et l'utilisation de la bouillie bordelaise peuvent expliquer ce phénomène dans les jardins. A l'inverse, l'acidification des sols dans les forêts réduit le PH. Des facteurs liés à l'activité industrielle sont également vraisemblablement en cause.

4. L'ADN environnemental : une méthode innovante pour évaluer la biodiversité des sols urbains ?

Lionel RANJARD, INRA Dijon

Nous observons un retour de la nature en ville pour améliorer la qualité de vie en milieu urbain et réduire l'empreinte environnementale. Dans ce contexte, le sol est un bras de levier mobilisable pour cette nature en ville.

Le sol représente 25 à 30 % de la biodiversité terrestre. L'analyse de l'ADN du sol cible souvent les bactéries et les champignons, qui ont concentré les investissements des quinze dernières années. Des études se développent sur la faune du sol pour caractériser la biodiversité à partir d'un même magma d'ADN. Le patrimoine biologique du sol remplit des fonctions biologiques pouvant répondre à des problématiques urbaines – régulation du climat, atténuation des pollutions, etc.

Dans l'ADN du sol, nous ciblons plus particulièrement les micro-organismes. Leur structure leur permet de s'adapter rapidement aux modifications environnementales. Il apparaît qu'une baisse de 30 % de la diversité microbienne d'un sol entraîne une perte de 40 % de la minéralisation du sol, une perte de 50 % de la productivité végétale et de la stabilité structurale du sol ainsi qu'une multiplication par cinq du temps de survie des pathogènes dans le sol.

Depuis une vingtaine d'années, nous essayons de caractériser l'ADN des micro-organismes. Nous développons des indicateurs tels que la biomasse microbienne moléculaire et le séquençage. Nous sommes capables de séquencer la totalité de cet ADN et d'en déduire des niveaux et des compositions de diversité. Les coûts de séquençage ont fortement chuté au cours des dernières années, permettant d'étendre la recherche et de disposer d'outils particulièrement puissants.

Le réseau français d'observation des sols est important. Plusieurs paramètres expliquent les différences d'abondance des micro-organismes, dont le type de sols. Un PH alcalin et une forte présence de carbone favorisent la présence de micro-organismes. A l'inverse, plus la matière organique est récalcitrante à la dégradation, moins les micro-organismes sont nombreux. Les modes d'usage impactent également la biomasse microbienne. Cette dernière est plus importante dans les systèmes naturels et semi-naturels. En revanche, il n'existe pas de relation entre l'abondance des organismes et leur diversité. La diversité bactérienne est plus forte dans les systèmes cultivés.

Les données accumulées permettent d'établir des modèles prédictifs afin de définir des valeurs de référence pour un sol donné et les seuils critiques associés. Sur la base de ces éléments, nous sommes à même d'établir un diagnostic. La majorité des parcelles agricoles compte davantage de micro-organismes que la valeur de référence. Toutefois, une partie non-négligeable se trouve en deçà du seuil critique, altérée par les pratiques agricoles. De même, une partie des sols flirte avec le seuil critique en matière de diversité.

Nous mettons en place des projets participatifs en vue d'équiper les agriculteurs pour qu'ils puissent évaluer l'impact de leurs pratiques sur la biologie du sol. Cette étude montre que 10 % des parcelles agricoles de l'échantillon se trouvent dans les seuils critiques, 32 % atteignent les valeurs de référence, mais plus de 50 % se trouvent dans des seuils intermédiaires. 97% des agriculteurs ont suivi le processus dans sa totalité. Deux ans après la fin du projet, 59 % ont fait évoluer leurs pratiques.

Les divers indicateurs sont en cours de transfert vers des laboratoires analytiques en vue de leur industrialisation. Ce projet permettra de réduire les coûts d'utilisation des bio-indicateurs.

Seuls 2 à 3 % des études réalisées sur les sols concernent les sols urbains. Le continent nord-américain et l'Europe concentrent la grande majorité de ces recherches.

Seize habitats microbiens dans le sol sont distingués, mais les villes sont exclues de l'échantillonnage. Nous devons investir sur l'étude des sols urbains. L'INRA, avec un groupe d'experts, souhaite mettre en place un réseau national de veille à l'innovation sur la qualité des sols urbains. L'objectif est de co-construire un tableau de bord opérationnel, élaborer une formation adaptée et diagnostiquer et expertiser la qualité biologique des sols urbains. *In fine*, nous souhaitons proposer un conseil pour l'aménagement urbain.

Discussion avec la salle

De la salle

Avez-vous mené étudié les champignons du sol ?

Lionel RANJARD

L'étude est en cours.

De la salle

En combien de temps l'ADN microbien se dégrade-t-il dans le sol ?

Lionel RANJARD

L'ADN se dégrade en quelques semaines, voire quelques jours. Le processus est rapide, car le sol est un milieu oligotrophe.

De la salle

Quel est le niveau de connaissance sur les espèces et sous-espèces de bactéries ? Vos projets incluent-ils des travaux sur les espèces favorables à l'ensemencement ?

Lionel RANJARD

La notion d'espèce est relative chez les bactéries. Nous parlons de taxons pour caractériser les diversités de génomes.

Compte tenu des effets barrières, les bactéries que nous ajoutons dans le sol ne se maintiendront pas nécessairement. Un habitat est nécessaire pour les héberger.

De la salle

Le séquençage de l'ADN microbien donne-t-il accès à une liste d'espèces ? La diversité de la communauté bactérienne sur les toits végétalisés a-t-elle été évaluée ?

Lionel RANJARD

Oui, nous disposons d'une liste d'espèces. Nous devons désormais observer la qualité de la composition de chacune.

La diversité présente dans les toits végétalisés est en cours d'études. Les résultats devraient être disponibles en début d'année 2018.

IV. Panorama d'expérimentations pour préserver et restaurer les sols en ville

1. Reconstitution de sols fertiles à partir du recyclage des déchets urbains

Charlotte PRUVOST, iEES-Paris, Observatoire de la biodiversité urbaine de Seine-Saint-Denis et Entreprise ECT

Dans le cadre de ma thèse, j'ai travaillé sur un essai de plantation d'arbres d'alignement dans les technosols construits. Les technosols sont fortement influencés par l'activité humaine. La dynamique de développement urbain conduit à excaver une quantité importante de sols minéraux d'horizons profonds, car leurs propriétés ne sont intéressantes ni pour les constructions ni pour les plantations. Environnement dix millions de tonnes de déchets sont ainsi excavés chaque année en vue d'être stockés en milieu rural. Ces mises en décharge présentent un coût économique pour les villes ainsi qu'un coût environnemental lié au transport. En outre, des sols d'horizons superficiels plus riches en matière organique doivent être importés du milieu rural pour l'implantation de végétaux. Cette opération présente à nouveau un coût économique pour la ville et environnemental pour le milieu rural.

Le projet vise à réduire les impacts sur le milieu rural grâce à la réutilisation de ces déchets pour la construction de sols. Les remblais sont mélangés avec un apport de matières organiques tel que le compost de déchets verts issue de l'entretien des parcs urbains.

Dans cette expérimentation, nous reconstituons un écosystème à partir du technosol construit. Nous testons plusieurs technosols et plusieurs arbres d'alignement. Je me suis particulièrement intéressée à la macrofaune, qui décompose les matières organiques et participe au recyclage des nutriments.

Deux questions sont apparues :

- Quel technosol construit est le plus favorable à la survie et à la croissance des arbres d'alignement ?
- Quel technosol construit favorise la colonisation par la macrofaune du sol ?

Le site expérimental se trouve à Villeneuve-sous-Dammartin. Des champs et des zones boisées entourent le site, qui se situe par ailleurs à proximité de l'aéroport Charles de Gaulle.

Le dispositif expérimental se compose de douze parcelles sur lesquelles nous testons quatre mélanges différents :

- 100 % remblais ;
- 90 % remblais et 10 % compost ;
- 30 % remblais et 70 % béton concassé ;
- 70 % béton concassé, 20 % remblais et 10 % compost.

Six espèces d'arbres ont été plantées sur les parcelles en 2014.

Les traitements remblais et remblais-béton et remblais-béton-compost ne présentent pas de résultats significativement différents. Un à deux morts sont recensés parmi les 18 arbres. Le traitement remblais-compost présente le plus de mortalité, avec six arbres morts pendant

l'expérimentation. L'érable champêtre et le merisier n'ont connu aucune mortalité. L'essence la plus sensible est le charme, qui présente près de 50 % de mortalité. Toutefois, cette espèce n'a subi aucune mort dans les mélanges remblais-béton-compost.

La croissance se révèle plus importante dans le mélange remblais-béton-compost, qui apparaît donc comme le technosol le plus favorable à la survie et à la croissance des arbres d'alignement.

Nous émettons l'hypothèse que les micro-organismes sont entrés en compétition pour le dioxygène dans le mélange remblais-compost. L'apport de béton concassé apporte davantage de porosité au mélange.

Le PH est légèrement inférieur dans les mélanges remblais-béton-compost et remblais-compost compte tenu de l'activité des micro-organismes. De même, l'apport de matière organique est plus élevé dans le traitement remblais-béton-compost, vraisemblablement en raison de la plus grande croissance et de la plus grande survie dans ce mélange. La capacité d'échange cationique, le potassium échangeable et l'azote biodisponible varient significativement. En revanche, le phosphore assimilable affiche des résultats proches entre les traitements remblais-béton et remblais-compost.

Les mélanges remblais-béton-compost montrent une plus forte abondance. L'ajout de compost impacte donc bien la colonisation de la macrofaune.

Une interaction négative apparaît entre le remblais et le compost. Il conviendrait d'étudier l'origine de ces interactions. L'utilisation de sondes de dioxygène permettrait de vérifier les conditions d'anaérobiose. Des processus physico-chimiques ou des activités biologiques pourraient avoir largué des éléments toxiques. L'analyse montre également que la macrofaune peut coloniser des technosols construits à hauteur des références. Ces résultats gagneraient à être couplés avec une étude sur les vers de terre pour démontrer l'impact sur la porosité des remblais.

Discussion avec la salle

De la salle

Comment être certain que la provenance de chaque arbre, qui pourrait varier au sein d'une même espèce, n'impacte pas les résultats ?

Dans l'étude, vous ajoutez de la matière organique à 1,20 mètre de profondeur, mais ce principe ne se trouve pas dans les sols naturels.

Charlotte PRUVOST

Les arbres proviennent de la même pépinière. Nous ne pouvions pas tester toutes les sous-espèces.

S'agissant de la répartition de micro-organismes en profondeur, il apparaît plus réalisable d'étudier un horizon unique. L'expérimentation pourrait toutefois être étendue.

De la salle

Vous présentez un merisier horticole. Ce choix est-il volontaire ?

Une intervenante

Nous avons fait appel à la pépinière en contact avec le département de la Seine-Saint-Denis. Ces espèces sont celles que nous retrouvons sur ce territoire.

De la salle

Le traitement remblais-béton-compost présente des différences de granulométrie. Comment réalisez-vous ce mélange ?

Charlotte PRUVOST

Nous avons décapé le sol de surface sur les parcelles puis avons incorporé les matériaux. Une machine est intervenue pour homogénéiser les matériaux.

De la salle

Vos parcelles ont-elles été arrosées ?

Charlotte PRUVOST

Les arbres ont été suivis à l'aide de tensiomètres pour s'assurer de l'absence de déficit hydrique. Ils ont été arrosés à chaque fois qu'un signal de stress apparaissait.

De la salle

Avez-vous estimé le coût de chaque formule ?

Charlotte PRUVOST

L'école d'ingénieurs de la ville de Paris a défini ces coûts. La réutilisation des matériaux réduit les dépenses. Au Bois de Vincennes, nous avons récupéré les matériaux de déconstruction de l'anneau cyclable.

De la salle

La croissance des arbres pourrait-elle être comparée aux moyennes observées en milieu naturel ?

Charlotte PRUVOST

Malgré mes recherches, je n'ai pas trouvé ces références.

De la salle

Avez-vous conduit des expertises en milieu anthropisé ?

Charlotte PRUVOST

Non, je n'ai pas mené ces travaux dans le cadre de ma thèse. Je sais que des études sont en cours dans le parc de Créteil.

De la salle

Alain VERGNES a mené une étude sur la succession dans les technosols.

2. Trame brune et restauration d'habitats pour les abeilles terricoles à Lille

Yohan TISON, écologue, Ville de Lille

Trois actions sont possibles pour les sauver abeilles : stopper l'usage des pesticides, déseutrophiser les sols ou agir sur la ressource floristique et la création de micro-habitats.

A Lille, l'arrêt des gyrobroyeurs et la remontée du niveau d'eau a permis un changement bactérien et une déseutrophisation. Deux espèces d'abeilles monolectiques sont présentes. La présence de variétés à fleurs doubles nuit à l'implantation d'espèces polylectiques. Pour attirer les espèces oligolectiques, il convient de favoriser certaines espèces de plantes telle que la campanule. La disparition des fabacées est à l'origine de la disparition de plusieurs espèces. Surtout, cette faune et cette flore ne peuvent pas se développer lorsque l'azote est trop important.

Les abeilles terricoles nidifient dans le sol. Elles sont doublement défavorisées par l'eutrophisation et par la fermeture du milieu, qui induit un refroidissement du sol.

Nous nous sommes concentrés sur un groupe d'abeilles sabulicoles de trois espèces oligolectiques printanières. Nous avons tout d'abord restauré une ressource florifère puis nous avons créé un réseau de neuf sites de nidifications. Ces sites se trouvent dans les anciens marais. Ils se composent de poches de sable de carrière et de gravillons calcaires. Nous disposons de peu de recul, mais nous observons d'ores et déjà que plusieurs espèces terricoles sont réapparues.

D'autres actions en lien avec le sol ont été menées. Nous avons créé des passages à « hérissons » sous la voirie de la porte de Valenciennes. Nous restaurerons cette année plusieurs centaines de mètres carrés de berges et créerons des réseaux de sites de nidification pour les martins-pêcheurs.

Discussion avec la salle**De la salle**

Qu'entendez-vous par « refroidissement du sol » ?

Yohan TISON

Lorsque le recouvrement est trop important, les rayonnements solaires ne parviennent plus dans les couches profondes.

De la salle

Comment les écologues interviennent-ils dans la mise en œuvre et la gestion de ces chantiers ?

Yohan TISON

Mon intervention dépend de l'urbaniste en charge du secteur. Je peux participer très en amont dans la programmation ou n'être appelé que tardivement. J'interviens aussi dans le cadre de concours ou de maîtrise d'œuvre interne. Il m'arrive de rédiger le cahier des charges d'études scientifiques ou d'études faunes/flores. La gestion est partagée avec les services des parcs et jardins. Chaque année, j'encadre environ 500 bénévoles sur les chantiers.

La métropole vient de retravailler son PLU. J'ai émis des préconisations, mais j'ignore ce qu'il ressortira de ces travaux.

De la salle

Qu'est-ce que l'étrépage ? Comment le mettre en œuvre et en apprécier les résultats ?

Yohan TISON

L'étrépage consiste à retirer la terre de couche pour récupérer les sous-couches plus stériles qui se trouvent dessous. En retirant les sols récents, nous pouvons récupérer des banques de semences beaucoup plus anciennes. Nous avons expérimenté cette méthode sur les fortifications de Vauban.

3. Phytoremédiation : l'exemple du Parc départemental du peuple de l'Herbe à Carrières-sous-Poissy.

Jean-Louis DUCREUX, Atelier d'écologie urbaine

Le parc de Carrières-sous-Poissy s'étend sur 130 hectares. Les travaux ont débuté en 2014 pour un montant de 23 millions d'euros. Le site se trouve sur d'anciennes gravières remblayées par des produits divers. Nous souhaitons éviter d'exporter les terres polluées et de traiter les matériaux sur place dans des casiers de phytoremédiation. Nous avons installé trois de ces casiers sur une partie du parc.

Comment traiter les sols urbains sans les confiner ?

La phytoremédiation est l'utilisation de plantes vasculaires pour traiter les sols, l'air et la nappe. Elle regroupe plusieurs techniques. La phytovolatilisation, encore peu développée, consiste à utiliser la respiration d'un végétal pour relâcher l'air. La phytocapture, plus simple à mettre en œuvre en ville permet à un arbre de confiner des poussières. Avec la

phytoextraction, la plante capte des polluants et les concentre dans ses tiges, ses feuilles et ses racines. La pollution est transférée du sol vers le végétal, ce qui ne résout pas la problématique. Avec le phytobiomining, le végétal sert uniquement de structure haute pour extraire les métaux et les concentrer dans les sols ou les plantes. La phyto-transformation se sert du végétal pour dégrader les polluants organiques. Enfin, la phytostabilisation vise à utiliser la rhizosphère pour transformer les polluants et les confiner. Elle est principalement employée pour les métaux lourds.

Nous utilisons parfois le phyto-rabattement pour abaisser et dépolluer une nappe grâce à la capacité d'évapotranspiration des plantes. Cette technique est relativement répandue pour l'assainissement des eaux.

La phytoremédiation peut être naturelle ou assistée. Dans ce second cas de figure, le sol est engraisé avec des bactéries et des champignons pour augmenter la capacité de l'écosystème. Pour que la phytoremédiation fonctionne, les plantes doivent avoir une biomasse importante et être à même de supporter l'écotoxicité.

Que faire des plantes polluées ? Actuellement, nous les brûlons en centrale thermique. Au global, le système n'est donc pas parfaitement écologique.

Nous avons testé trois techniques dans le parc de Carrières-sous-Poissy. Deux jardins sont réalisés dans des casiers étanches, l'un avec acidification, l'autre avec un PH basique. La troisième technique repose sur un jardin *in situ*, dans lequel nous avons épandu la couche polluée avant de planter des saules.

Il est prématuré de fournir des données chiffrées puisque les mesures sont en cours. Le suivi s'étendra sur trois ans.

Discussion avec la salle

De la salle

Disposez-vous d'estimation du temps de dépollution ? Quels sont les ratios entre les surfaces polluées et les surfaces traitées ?

Jean-Louis DUCREUX

Nous essayons depuis 20 ans de mettre en place des écosystèmes dépolluants. En ville, les promoteurs n'ont pas le temps pour ces pratiques. L'atténuation de matières métalliques dans le sol requiert plus d'une dizaine d'années. En remédiation assistée, nous parvenons à éliminer l'organique en un à deux ans. Ces techniques s'adaptent uniquement sur de grandes friches industrielles dévolues à du parc. Outre la question du temps, l'épaisseur de la pollution est une problématique importante.

Gilles LECUIR

Saluons l'initiative consistant à conserver la pollution sur site.

De la salle

Que pensez-vous des travaux de l'Université de Nancy sur la récupération du nickel dans les plantes ?

Jean-Louis DUCREUX

Ces techniques bio-minières existent depuis longtemps. En Nouvelle-Calédonie, une flore hyper-accumulatrice récupère le nickel dans la partie aérienne. En biomining, l'objectif est d'acidifier le sol et de l'enrichir en bactéries et champignons. Il y a 30 ans, nous réalisons des forages d'injection et de pompage d'uranium. Ces opérations sont très peu coûteuses. Les rendements restent toutefois faibles.

Christophe SCHWARTZ

La capacité d'espèces végétales à accumuler, voire hyper-accumuler, des métaux dans leurs tissus est scientifiquement démontrée. Nous savons domestiquer ces espèces sauvages, les cultiver sur des sites et récupérer le métal. Nous parvenons à récupérer plusieurs dizaines de kilos de métal par hectare et par an grâce à des procédés hydrométallurgiques. La rentabilité économique dépend du cours des métaux. Nous n'avons pas d'autre moyen d'extraire ces métaux des sols de manière sélective. Une start-up a récemment vu le jour sur la base de ces travaux. Ces procédés ne présentent pas de risques.

De la salle

Les différentes techniques de phytoremédiation peuvent-elles être combinées ?

Jean-Louis DUCREUX

Les combinaisons de techniques que nous avons expérimentés n'ont pas réellement fonctionné. Dans le jardin *in situ*, nous avons associé la luzerne et le saule. Nous essayons de mixer les plantes et les strates. L'objectif est bien de définir des écosystèmes complexes.

Yohan TISON

Connaissez-vous des expériences de remédiation avec des organismes filtreurs ?

Jean-Louis DUCREUX

J'ai mis en place à Lille des jardins filtrants à partir de roselières.

4. Construire en préservant les sols en place ? L'exemple du quartier du Séqué à Bayonne**Patrick AROTCHAREN, Architecte**

En tant qu'architectes, nous sommes loin de vos préoccupations. Nous nous occupons des aménagements. Les sols sont notre matière première pour construire et nous implanter.

Le pays basque a un régime de fortes pluies. La frange côtière est particulièrement étroite. La pression démographique et immobilière rend presque impossible la construction d'une ville sur la ville. Le quartier du Séqué témoigne d'une manière différente de travailler avec le milieu naturel. Sur les collines vallonnées, les constructeurs sont longtemps intervenus lourdement. Nous nous sommes positionnés pour un travail en douceur grâce à des constructions sur pilotis, à travers les végétaux.

L'opération concerne une unité de 50 logements sociaux sur une parcelle de 50 000 mètres carrés. La densité y est importante. L'enjeu était de faire coexister le logement, le stationnement et les plantations existantes. La densité pose la question de la promiscuité, de la visibilité sur et depuis la rue. Nous avons pensé l'architecture en termes de parcours pour apposer des objets entre les arbres et leurs racines.

La construction sur pilotis évite de créer un parking en sous-sol ou tout autour du bâtiment. Nous ne nous sommes pas préoccupés de la qualité des sols.

La nature a longtemps été considérée comme un objet d'ornement. Or elle est avant tout un élément de confort en apportant de l'ombre et de l'intimité. Les bâtiments sont pensés différemment. Le jeu des arbres et de leurs branches trouve un écho en architecture.

Discussion avec la salle

De la salle

Avez-vous travaillé avec des écologues ?

Patrick AROTCHAREN

Nous souhaitions entrer en réaction avec une forme d'urbanisation qui éradiquait les végétaux sur les coteaux. Petit à petit, nous avons réalisé que nous manquions de maîtrise sur l'écoulement des eaux, par exemple. Aujourd'hui, nous formons des équipes pluridisciplinaires, nous nous rapprochons de personnes compétentes sur le sujet, mais nous avons débuté sans eux. Le projet a débuté en 2008 et a été livré en 2012.

Gilles LECUIR

Qui, en 2008, portait ce discours sur l'aménagement et la préservation des sols ?

De la salle

D'où est venue l'initiative de cette construction ?

Patrick AROTCHAREN

La commande a été passée par un organisme de gestion de logements sociaux. Ces constructions sont plus onéreuses que celles au ras du sol. Elles relèvent d'une volonté propre.

De la salle

Dans certains endroits de la région Ile-de-France, la végétation est présente, mais les projets font table rase de l'existant pour en rajouter par la suite.

De la salle

Votre travail a-t-il entraîné des initiatives similaires ?

Patrick AROTCHAREN

Nous avons été appelés sur plusieurs autres dossiers. De tels projets doivent être portés par des personnes engagées.

De la salle

Vous soulignez l'importance des équipes et des compétences pluridisciplinaires. Les associations environnementales peuvent apporter un regard dès l'amont des projets, pour ne pas être des intervenants critiques à l'issue du projet. Il serait opportun de co-construire systématiquement ces projets.

Gilles LECUIR

A Strasbourg, la collectivité mobilise des collectifs d'habitants pour proposer un cahier des charges environnemental. Je souscris à ce principe d'habitat participatif.

De la salle

Comment parvenez-vous à faire accepter ces aménagements végétaux aux habitants ?

Patrick AROTCHAREN

Ce projet était un projet de logements en accession sociale. Il a établi le record de vente du promoteur.

De la salle

Intégrez-vous la biodiversité dans votre travail après cette journée ? Les collectivités doivent intégrer très en amont le choix de la destination des sols.

Patrick AROTCHAREN

Nous nous posons désormais des questions avec davantage d'acuité. Nous travaillons sur le projet de transport en commun en cycle propre de l'agglomération en nous interrogeant sur le confort climatique. Notre cabinet cherche des compétences, au-delà de la demande classique de la maîtrise d'œuvre. Nous devons encore démontrer que nos actions permettent d'abaisser la température sur une place.

De la salle

Les habitants participent-ils à la gestion des végétaux et à la transformation du milieu ?

De la salle

Comment avez-vous préservé les sols et les plantes pendant la construction ?

Patrick AROTCHAREN

Le syndic de copropriété est très vigilant sur les questions de gestion. Il a été choisi par le porteur de projet et associé au projet. Par exemple, un peuplier qui touchait une construction a été retiré. Pendant la phase du chantier, nous avons balisé tous les arbres. Les habitations ont été implantées de façon à ce que les engins sur roues puissent déposer les structures bois. Nous n'avons pas utilisé de grue.

Gilles LECUIR

Je vous invite à consulter le site www.capitale-biodiversité.fr pour retrouver plusieurs autres retours d'expériences.

V. Synthèse collective : quels enseignements et recommandations pour l'action publique et privée ?

Christophe SCHWARTZ, Laboratoire Sols et Environnement, Université de Lorraine/INRA

Nous ne connaissons pas toutes les caractéristiques des sols urbains ni leur aptitude à rendre des services et être porteurs de biodiversité.

Nous avons souvent l'image d'une ville qui dégrade le sol. Or la ville s'appuie aussi sur des sols fonctionnels pouvant être un support de vie et de biodiversité. De même, une forêt spontanée peut se développer sur un technosol résidu de l'industrie sidérurgique. La présence de polluants n'est pas nécessairement un problème. Des investigations et des diagnostics permettent de considérer le danger et le risque. En milieu urbain, les systèmes sont très hétérogènes : évitons les caricatures et les *a priori*. La terre qui compose le sol est source de contamination, mais aussi de fertilité.

Les sols se trouvent au cœur du métabolisme urbain. La ville doit être multifonctionnelle, verte, durable, nourricière et adaptée aux changements locaux et globaux.

Quels services écosystémiques sont rendus par les sols urbains végétalisés ? Pour répondre à cette question, nous devons connaître le fonctionnement, l'évolution et l'état de ces sols. A l'échelle des micro-organismes, les agrégats minéraux et organiques sont le siège du fonctionnement du sol, des interactions avec l'atmosphère et des circulations d'eau, notamment.

Nous avons étudié les terres de surfaces françaises – forêts, prairies, parcelles agricoles cultivées, vignes et vergers, jardins potagers urbains et sols urbains industriels (SUITMA). Les sols forestiers sont plus acides et s'alcalinisent progressivement en allant vers les milieux urbains. Nous observons un important contraste dans la constitution des sols en milieu urbain, particulièrement en PH. Ce constat impacte le fonctionnement des organismes vivants et l'adaptation des plantes. Par ailleurs, il apparaît que les teneurs en carbone organique sont

plus élevées dans les sols forestiers et les sols urbains industriels. Cette observation interroge quant à la capacité des sols urbains à stocker du carbone. Le phosphore assimilable connaît des valeurs extrêmes et contrastées en SUIITMA. L'étude des teneurs en cuivre permet de distinguer les forêts, prairies agricoles, qui présentent de faibles taux, et les sols urbains, les vignes, vergers et jardins potagers, où la teneur est importante. La contamination urbaine et industrielle ainsi que les pratiques intensives expliquent ces taux. Les teneurs en plomb et en zinc, pour leur part, augmentent en suivant le gradient d'anthropisation.

Après la phase d'observation des sols, de leur état, de leur fonctionnement, de leur évolution, il est nécessaire de connaître le fonctionnement des plantes et des cultures sur sol urbain, afin de mieux connaître et modéliser le système sol urbain, plantes, organismes et de l'optimiser pour qu'il puisse rendre des services.

En un an, un « technosol » construit de toute pièce connaît une évolution importante. Les racines se développent. Les vers de terre jouent progressivement leur rôle. Le sol se structure. La porosité est explorée par les organismes. Un tel sol est donc capable de fonctionner.

Des approches de génie écologique permettent de concevoir des procédés, des itinéraires de culture de végétaux pour construire des sols ou mettre en œuvre du génie végétal. Grâce à ces techniques, nous valorisons ce qu'on a observé, compris, et modélisé. Dès lors, la végétation présente en ville n'est pas subie, mais peut être construite avec une finalité précise. La construction de sols différenciés permet de créer un nouvel écosystème à même de rendre une large gamme de services. Les systèmes construits de toute pièce en milieu urbain connaîtront une évolution au cours du temps. Contrairement aux *a priori*, une pédogénèse rapide se met en place. Nous pourrions imaginer que des technosols puissent fonctionner comme des sols naturels.

L'agronomie urbaine conduit à s'interroger sur l'inventaire et la caractérisation de l'écosystème urbain, sur la résilience et la vulnérabilité des cultures et végétaux, sur l'analyse et la compréhension des pratiques et sur la modélisation de ces systèmes. Il est complexe de caractériser un milieu urbain dynamique. Nous avons tout intérêt à mesurer la qualité des compartiments des agrosystèmes urbains par des observatoires et des réseaux de mesure. Nous devons faire des liens entre compartiments, développer la pédologie urbaine et définir une typologie de formes urbaines en fonctions des services attendus.

Sur la résilience et la vulnérabilité des cultures, les questions posées sont relatives aux conditions de croissance des plantes dans un environnement contraignant. Nous devons redéfinir les pratiques, sélectionner les variétés adaptées à la ville. L'analyse des risques sanitaires liés au transfert des polluants est également un enjeu fort.

En termes d'analyse et de compréhension des pratiques, il convient de définir les pratiques d'agriculture urbaines et en évaluer l'évolution, proposer des innovations techniques et organisationnelles et orienter les décisions publiques ou privées au regard des connaissances de l'écosystème urbain.

Nous sommes confrontés à des enjeux de modélisation intégrée. Les modèles développés doivent nous permettre de créer des outils d'aide à la décision. Nous devons faire venir le laboratoire sur le terrain.

Ces démarches emportent des enjeux socio-économiques. L'un d'eux est d'accepter de travailler avec d'autres disciplines.

Il est important de proposer une procédure d'évaluation des services rendus sur les sols urbains basée sur la connaissance des propriétés et des indicateurs de qualité. Nous travaillons avec l'ADEME sur une traduction de l'état du sol en services écosystémiques.

Gilles LECUIR

Je remercie l'ensemble des participants ainsi que les équipes IFORE et Natureparif qui ont travaillé à l'organisation de cet événement.