

Agroécologie urbaine: la question des sols

Marion Mauclin, Vincent Zaninotto, Jean Autard, ENS Ulm, cours d'Agroécologie

Résumé :

Dans un contexte mondial de rareté croissante des terres arables et de développement de l'agriculture urbaine, nous nous sommes interrogés sur la possibilité de reconverter des surfaces imperméabilisées en sols agricoles. Les sols urbains sont fortement altérés et pollués, souvent dans un état de mort biologique et de déstructuration, au point qu'on importe souvent du sol agricole pour créer les espaces verts. La restauration d'un sol demande d'abord de restructurer les composantes organiques et minérales du sol à l'aide de substrat minéral et de compost, il faut ensuite ramener de la vie, soit en introduisant du bois mort en décomposition, soit en ensemençant le sol. L'utilisation de matériaux locaux de déconstruction issus de bâtiments urbains est envisagée pour l'apport minéral, tandis que du compost peut servir pour l'élément organique. Le problème crucial est celui de l'échelle de temps : les échéances de l'aménagement s'accommodent mal de la lenteur des rythmes biologiques. Pour restaurer les sols victimes de pollutions intenses, la phytoremédiation peut être utilisée. Il s'agit d'utiliser des plantes dont l'appareil racinaire absorbe les polluants, en particulier les métaux lourds, pour faciliter leur extraction. Cette technique est en plein développement.

Mot clefs : Sols urbains, imperméabilisation, pollution, restauration des sols, remédiation, technosol, matériaux de déconstruction, phytoremédiation

Introduction :

I Les impacts de l'urbanisation sur les sols

Les dernières projections démographiques prévoient une augmentation de la population mondiale de 2 milliards d'habitants d'ici à 2050 sans stabilisation avant 2100 (UN Population division 2015), alors même que 800 millions de personnes souffrent déjà de la faim. Certes, il s'agit d'un problème économique de pauvreté et d'inégalité plus qu'un problème quantitatif. Toutefois l'intersection entre la nécessité de préserver les dernières forêts et espaces naturels du monde pour des raisons climatiques et des pratiques agricoles et sociales insoutenable massivement consommatrices d'espace font craindre un manque global de surfaces arables. Sur les 4 milliards d'hectares disponibles pour l'agriculture, 1,5 milliards sont déjà exploités (dont 720 millions pour des cultures céréalières), mais depuis le

Néolithique, l'homme en a rendu 2 milliards inexploitable par érosion, désertification ou artificialisation (source: Meadows et al. 2004 d'après FAO, FRB, UN). Depuis deux siècles, l'explosion de la population urbaine amène à une imperméabilisation de surfaces agricoles croissante, de plus les villes sont souvent construites sur les terres les plus fertiles (Paris et la Beauce...). Ainsi en France, les surfaces imperméabilisées représentent l'équivalent de 6% du territoire soit l'équivalent de la région Aquitaine: Tout les 7 ans, l'équivalent de la surface agricole d'un département est consommée par l'urbanisation. Ces phénomènes sont encore amplifiés dans les pays émergents : si en 2050 la Chine avait un niveau d'équipement automobile équivalent à celui des États-Unis en 2000, cela exigerait en infrastructures 13 millions d'ha soit la moitié des terres utilisées pour la production des 120 millions de T de riz du pays (Lester Brown, Earth Policy Institute). Les 2,2 milliards d'urbains supplémentaires en 2050 obligeront à imperméabiliser entre 20 et 160 millions d'ha selon le type d'habitat, dense ou pavillonnaire, soit jusqu'à 10% des surfaces agricoles disponibles (idem).

Face à ces perspectives inquiétantes se pose donc la question de l'irréversibilité de cette conversion: Ces terres sont elles définitivement improductives ? Serait il possible d'inverser le processus et de réintroduire l'agriculture dans des espaces aujourd'hui urbain ? Sans rentrer dans les questions sociales et économiques relatives à l'agriculture urbaine, la question même de la qualité des sols se posent: comment est il possible de recréer des sols sur des surfaces imperméabilisées ?

La première partie décrit l'état des sols urbains, la seconde engage la réflexion sur la restauration de sols à partir de substrat et de matériaux urbains et la troisième s'attache plus spécifiquement à la pratique de la phytoremédiation.

Les sols urbains sont soumis d'une part à des perturbations anthropiques directes et constantes et d'autres part à des conséquences environnementales indirectes de l'urbanisation. Ils présentent en conséquence des caractéristiques physiques, chimiques et biologiques altérées en comparaisons des sols ruraux. Ces particularités font de la restauration écologique des sols urbains un vrai défi. Il s'agit d'opérer avec un milieu complexe soumis à de fortes interactions et dont la dynamique peut mener à plusieurs états stables. Les sols sont par ailleurs sous l'influence durable de leurs usages passés, tandis que la création de nouveaux types de sols présente toujours un risque de prolifération de plantes invasives.

Jenny (1941) fait appel à cinq grand facteurs pour décrire le processus de formation d'un sol. Ainsi le **climat**, les **organismes vivants**, la **topographie**, la nature de la **roche mère**, et le **temps** déterminent le type de sol formé et toutes ses caractéristiques. Or, l'Homme peut jouer sur ces cinq facteurs et laisser une marque profonde dans les processus pédologiques. Ainsi, l'urbanisation influence la nature du sol à travers les perturbations

directes, les changements de disponibilité des ressources et l'altération des conditions physico-chimiques.

De façon directe, l'Homme est responsable, en milieu urbain, de perturbations directes physico-chimiques. Les propriétés du sols sont en effet impactées par le tassement caractéristique des environnements urbains. Ceux-ci sont également soumis à l'effet de bulle de chaleur, à des modifications locales des précipitations, et à des régimes hydrologiques conditionnés par les infrastructures urbaines. Ceci affecte fortement les micro-climats du sol, la disponibilité en eau et l'activité des micro-organismes (Oke 1995, Brazel et al. 2000). L'urbanisation est également responsable d'une perturbation de l'équilibre chimique des sols, concentrant parfois métaux lourds, azote et soufre (Groffman et al. 1995, Pouyat et al. 1995). Ces modifications souterraines mènent alors à des altérations des fonctions écosystémiques et des cycles biogéochimiques dans les environnements urbains (Kaye et al. 2006). Cependant, les différents types d'organisations urbaines et leurs contextes affectent les sols de façons différentes : certains processus décrits dans une ville peuvent ne pas s'appliquer dans une autre (Pavao-Zuckerman & Coleman 2005).

Les effets indirects de l'urbanisation sur les sols sont dûs aux innombrables interactions et rétroactions qui caractérisent les écosystèmes complexes. Ainsi, les subtiles modifications de la composition atmosphérique autour des villes sont susceptibles de mener à des modifications physiologiques des plantes, ce qui pourrait altérer indirectement les qualités du sol (Gregg et al. 2003). Quant aux polluants hérités d'anciens usages des sols, ils peuvent, au delà de leur toxicités, induire des modifications métaboliques dans la microfaune, perturber les réseaux trophiques, les processus de décomposition et les cycles biogéochimiques dans les sols. Afin de mieux comprendre comment ces systèmes très connectés, aux dynamiques non linéaires, évoluent dans les sols urbains, Pavao-Zuckerman (2008) propose de faire appel à la théorie de la résilience. Du point de vue de l'écologie de la restauration, il définit la résilience comme la capacité à gérer et manipuler un système afin de guider son évolution depuis un état dégradé vers un état désirable. Ces systèmes peuvent en effet évoluer naturellement vers plusieurs états stables différents, dont certains ne sont pas souhaitables: absence de biodiversité, infertilité... Par exemple, les sols urbains ont une forte propension à promouvoir la prolifération de plantes invasives. On peut alors parvenir à un état stable du système, envahit par des plantes exotiques. Dans ces conditions, la simple éradication des espèces non-natives est souvent inefficace et mènent inexorablement au retour des espèces non désirées. Un mode de gestion intégrée, considérant l'amélioration des conditions pédologiques qui promeuvent l'invasion, est plus efficace (Vidra et al. 2006): on guide le système vers un état désirable.

Entretien avec Sébastien Barot (Partie 1):

“La qualité des sols en ville est variable, on peut distinguer deux questions distinctes: D’abord, **les espaces verts** qui sont produits en important des sols agricoles. La mairie de Paris achète ces sols qui sont au mieux récupérés à la campagne, là où on construit. Ce sol qui arrive est donc un bon sol fertile... Il en est de même pour les arbres d’alignement : Ils sont plantés dans des pots de 4 m³ de sol de campagne. Quant aux **sols urbains d’origine**, on les imperméabilise, on y met du bitume etc. Dans une grande ville comme Paris il n’y a donc plus de sols: quand on creuse une tranchée pour installer une canalisation, on trouve un mélange de remblais, sable... C’est artificiel.

On peut trouver ça assez absurdes : quand on construit un parc ou quand les arbres d’alignement meurent, on lève le sol et on importe 4 m³ de sol agricole. Il est donc intéressant de se demander comment créer les sols à partir de matériaux issus de destruction, béton, brique ... auxquels il faut ensuite ajouter de la matière organique, le béton fournit la matière minérale, et on peut mettre du compost de déchets urbains, issus de la restauration collective...”

J.A. : Donc les sols sont pris à la campagne, mais est-ce que c’est une ressource renouvelable? Est-ce qu’ils se reforment ? En combien de temps ?

“Les sols ne sont pas renouvelables : ils se forment par une dynamique très lente, en gros les sols sont issus de la dégradation de la roche mère et de l’interaction avec les plantes et autres organismes vivants. Il faut donc du temps. Si on décape 1m de sol, il ne va pas se reformer. Quand on fait ça on ne prend pas du sol à un agriculteur, on prend le sol agricole là où il est inutile: par exemple là où seront construits des bâtiments. Quelque part ça revient au même, c’est une perte nette pour l’agriculture. Pour se reformer le sol a besoin de temps, une durée en siècles ou en millénaires. On a pourtant toujours utilisé les sols comme une ressource inépuisable. Que ce soit pour l’agriculture intensive qui épuise les sols ou pour l’artificialisation: on s’est dit jusque-là qu’on pourrait toujours prendre du sol à la campagne.

Pour l’agriculture urbaine se pose la même problématique : On pourrait apporter du sol agricole et cultiver un toit, mais beaucoup ne cultivent que sur de la matière organique. Pourtant un vrai sol doit abriter des interactions organique / minéral. Le mélange produits divers agrégats, ce qui crée une porosité. Il peut donc retenir les nutriments minéraux. J’ai tendance à penser que si on ne met que de la matière organique dans un substrat, cela va moins bien retenir les nutriments. “

J.A. : Donc quand on change un arbre ou que l’on replante un parc on change le sol ?

“Pour le moment c’est ce qu’ils font, en tout cas à Paris, je pense que c’est pareil ailleurs. Pour les parcs on ne change pas tout le sol du parc, mais, si on décide de refaire une

zone, il y a des endroits où ils décapent tout et ré-importent un sol. La justification donnée pour les arbres est la suivante : l'arbre aurait épuisé le sol, il faudrait donc le renouveler. Or, on observe plutôt une tendance à s'enrichir en nutriment et matière organique au cours de la vie de l'arbre. Il serait donc plus logique de garder le sol."

J.A. : Mais dans ce petit espace autour des arbres, est ce que c'est un vrai sol, avec des interactions.. ?

"C'est un vrai sol qui interagit avec l'arbre, par le biais de microorganismes. Mais pour une raison qui m'échappe il n'y a pas de vers de terre. On ne sait pas pourquoi. Je peux comprendre qu'on n'ait pas de vers qui se nourrissent de la litière en surface, ils ne pourraient pas survivre car on enlève les feuilles. Par contre il n'y a pas de raisons connues de l'absence des vers qui mangent le sol. Il y en a dans les pelouses mais pas dans les pieds des arbres. Pour mieux comprendre, j'ai essayé d'introduire des vers de terre endogés dans les sols des arbres d'alignements. "

M.M. : Et qu'en est-il en général de la diversité du vivant dans la ville ?

"La ville a tendance à homogénéiser la biodiversité : à la campagne il y a une plus grande diversité des niches écologiques : Déjà un parc ce n'est pas énorme, et tous les parcs de Paris se ressemblent. Donc il ne doit pas y avoir beaucoup de biodiversité à Paris.

J.A. : Et on se demandait aussi quel rôle jouent les crottes de chiens ? Parce que je suppose que ça contient beaucoup d'azote donc ça peut changer la composition du sol.

"Quelqu'un dans notre laboratoire a fait une thèse sur les arbres d'alignements, et on s'est posé la question. L'idée c'était de faire un bilan de l'entrée et de la sortie des nutriments dans les pieds, et en gros on en est resté là. Les crottes de chiens ne sont peut-être pas négligeables dans le bilan de l'azote de l'arbre. Toutefois les crottes de chiens sont de plus en plus rares, elles sont souvent nettoyées et l'hétérogénéité est probablement très forte entre les arbres.

Un autre problème important est la pollution des sols : les villes sont sources de métaux lourds. A Paris, c'est surtout du Plomb et du Zinc. Le Zinc vient des toitures, le plomb probablement des combustibles fossiles. Il y a des métaux lourds qui sont caractéristiques des villes. C'est différent des pollutions ponctuelles aux métaux lourds sur les sites industriels. "

J.A. : Et du coup vous l'avez évoqué au départ, comment se passe la circulation de l'eau ?

“Pour la circulation de l’eau on ne sait pas trop. Dans les villes il faut récupérer l’eau pour s’en débarrasser et éviter les crues, les inondations. On collecte l’eau. Des toits verts, des espaces verts stockent de l’eau et font s’évaporer une partie. Si on rajoute des sols ce sera autant d’eau en moins à gérer. On ne sait pas trop où les arbres d’alignement prennent leur eau. Si on imperméabilise, l’eau ne s’infiltré plus. De plus si les arbres n’ont que 4 m³ cela ne leur suffit pas. La thèse sur les arbres d’alignement montre que les arbres s’en sortent bien, le sol garde sa fertilité et ils trouvent de l’eau. Toutefois, en regardant les cernes des arbres pour évaluer leur croissance, il apparaît que les arbres en ville semblent contraints, peut-être par un problème de sécheresse en été. La croissance pourrait être diminuée de près de 25 %.

Ce qui est sûr c’est que les racines vont ailleurs. Plus profond, et latéralement. Certains arbres, s’ils manquent d’eau, peuvent faire descendre leurs racines jusqu’à 20-30m. Autour ce sont plutôt des remblais, presque du sable, avec peu de nutriment.”

II Comment restaurer les sols urbains?

L’urbanisation altère profondément les sols. Afin de rétablir les services écosystémiques perdus, il est nécessaire d’employer des méthodes de restauration drastiques et prenant en compte les particularités des milieux urbains.

Il peut être difficile d’établir un état de référence pour guider la restauration de sols urbains. De plus, les milieux urbains sont souvent étendus sur des surfaces autrefois occupées par des activités agricoles, industrielles ou minières. Celles-ci auront induit des altérations physico-chimiques à prendre en compte. Néanmoins, les effets de l’urbanisation diffèrent selon les climats, les qualités initiales des sols, les dynamiques urbaines et infrastructures construites.... La restauration est à penser au cas par cas.

Le succès de la restauration peut dépendre de la compréhension de la dynamique du système. Il est donc crucial de tout mettre en oeuvre pour connaître son sol malgré le coût important des expertises. Par ailleurs, la restauration des sols en ville ne peut se limiter à une action très locale : elle est sous l’influence du milieu urbain qui l’entoure.

Entretien avec Laura Albaric:

(Pôle aménagement et gestion de l’Observatoire départemental de la biodiversité urbaine SSD) : cf. http://parcsinfo.seine-saint-denis.fr/On-y-travaille.html#outil_sommaire_3

V.Z : Quelle est la mission de l’observatoire départemental de la biodiversité urbaine?

“Nous sommes chargés d'accumuler des connaissances en matière de biodiversité urbaine à travers des études, des relevés et des expérimentations que nous menons avec des établissements tels que le MNHN et des associations qui promeuvent la biodiversité sur le territoire. De plus, nous sommes chargés de traduire ces connaissances en actions et en préconisations auprès des gestionnaires. Enfin, nous devons également les traduire auprès du grand public. En effet, en tant que collectivité, notre mission est de diffuser le savoir au sein de la population et de répondre à ses attentes. Pour cela, nous nous reposons en partie sur la médiation scientifique et les sciences participatives en traitant de grandes questions actuelles.”

V.Z. : A ce propos, la question des sols urbains est-t-elle une question actuelle essentielle quand on traite de biodiversité? Pourquoi ?

“C'est en effet une question très importante. Elle était d'ailleurs au centre de l'une de nos récentes rencontres techniques au lycée Fénélon. A cette occasion, nous avons organisé des tables rondes afin de répondre aux questions : Comment préserver les sols ? Comment les restaurer ? Comment recréer des technosols ?

Cette réflexion était précédée d'une conférence animée par Claude et Lydia Bourguignons, figures scientifiques et médiatiques en ce qui concerne l'écologie des sols. Ils avaient alors rappelés le rôle du sol et ses enjeux : le sol est un écosystème à part entière, en lien étroit avec d'autre écosystème dont il ne doit pas être isolé. Il procure de nombreux services écosystémiques essentiels, dans la mesure où ses qualités et sa biodiversité sont préservée, ou restaurées.”

V.Z. : Qu'est-ce qu'un technosol au juste?

“Ce sont des sols créés par l'Homme. Ils ont donc été remaniés, créant un nouvel écosystème. Les technosols désignent aussi bien les sols perturbés involontairement lors du processus d'urbanisation que les sols créés par ingénierie écologique dans le but même d'être fertiles et d'accueillir une grande biodiversité. Ils ne sont donc pas forcément stériles.”

V.Z. : Comment reconstituer un technosol fertile ?

“Il s'agit d'abord de restructurer les composantes organiques et minérales du sol à l'aide de substrat minéral et de compost. Ces composantes déterminent alors la création de complexe argilo-humiques qui retiennent les cations échangeables (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ ...) dans le sol. Mais il faut également relancer la vie dans le technosol ! Il existe pour cela deux méthodes.

La première méthode est indirecte : il s'agit de déposer du bois mort à la surface afin de promouvoir sa dégradation par des basidiomycètes. Ceux-ci retiennent l'eau nécessaire à la colonisation par des bactéries qui vont créer un environnement favorable pour les végétaux et mycorhizes. C'est une méthode d'ingénierie écologique : très peu d'énergie est injectée dans le système, on mise sur la colonisation spontanée par le vivant.

En revanche la seconde méthode repose sur l'inoculation d'organismes vivants lorsque les conditions de leur accueil sont réunies : onensemence le technosol par des bactéries, mycorhizes, vers de terre... Le risque est alors d'inoculer des organismes mal-adaptés, ou même potentiellement envahissants. Il faut donc prendre des précautions et privilégier des espèces (écotypes) locales.”

V.Z. : Dans quelle mesure le projet de reconstitution de sols fertiles à partir de matériaux recyclés, mené en partenariat avec l'entreprise ECT et l'université Paris Est Créteil, est-il innovant ?

“Tout part du constat d'une situation aberrante : afin d'aménager des zones vertes urbaines, il est nécessaire d'apporter dans les villes des quantités considérables de terre végétales collectées dans les zones rurales. En retour, la destruction de bâtiments urbains génère énormément de déchets de déconstruction, la plupart inerte, qui sont entreposés dans ces mêmes zones rurales. Cet échange de matériaux constitue une exploitation peu considérée de ressources naturelles ainsi qu'une pollution, et son bilan carbone doit être désastreux.

Il nous a donc paru préférable de shunter ce processus en créant une dynamique de circuit courts. Serait-il possible de rendre des sols fertiles à l'aide de substrat minéral et de compost produit sur place ? Pourrait-on utiliser du béton broyé issu de la déconstruction pour restructurer des sols urbains et les fertiliser grâce à des déchets verts ?

C'est à ces questions que doit répondre le projet mené avec ETC et l'UPEC, dans le cadre de la thèse de Charlotte Pruvost. Menée à Villeneuve-sous-Dammartin, l'expérimentation se concentre autour de 26 placettes aménagées de façon à mesurer l'effet de l'incorporation de béton broyé et de compost dans de la terre « stérile » provenant de chantiers de démolition. Une approche d'ingénierie écologique est favorisée : on suit le retour spontané de la macrofaune du sol, ainsi que le développement racinaire.

L'objectif au terme de trois premières années d'expérimentation est d'être capable de fournir des préconisations aux gestionnaires et entreprises pour la reconstruction de technosols fertiles.”

V.Z. : Les premiers résultats sont-ils encourageants ?

“Bien que premières données de suivi tendent à montrer que le béton broyé et le compost ont favorisé le développement racinaire et la diversité de la macrofaune, nos technosols ne fournissent au bout d'un an qu'un rendement agricole 50% plus faible que les sols classiques. La dimension temps est très importante ! Sans inoculation, il faut que les organismes aient le temps de venir reconquérir le sol. Et pourtant nos placettes expérimentales sont situées dans un contexte rural favorable. En conditions « réelles », en ville, la maturation des technosols prendra encore plus de temps, à cause de la fragmentation du territoire qui limite la circulation des organismes. D'où l'importance des stratégies de trames verte et bleue, afin de favoriser la colonisation de tous les milieux par la vie.”

V.Z. : Cette technique est-elle envisageable pour des toitures végétalisées ?

“C'est l'une des questions auxquelles nous essayons de répondre en expérimentant la végétalisation des toitures du parc départemental Georges-Valbon à La Courneuve, ici sans but de production agricole. Traditionnellement, les substrats utilisés sont la pouzzolane, une ressource non-renouvelable, et les billes d'argile expansée. A nouveau, les bilans carbone de l'usage de ces matériaux sont mauvais. Pourquoi-donc ne pas privilégier l'usage de matériaux de déconstruction générés sur place ?

L'inquiétude réside dans la basicité du béton, son poids difficile à soutenir pour les toitures et le risque qu'il dégrade les filtre d'étanchéité des toits. En revanche, les résultats obtenus sont très bons en utilisant des briques concassées comme substrat.”

V.Z. : Quelles sont les perspectives de projets basés sur ces méthodes de reconstruction de sols ?

“Elles sont nombreuses. Tout d'abord nous sommes, en Seine-Saint-Denis, gestionnaires de parcs aménagés au dessus d'anciennes carrières de gypse. Cette roche, autrefois exploitée, devient friable lorsque l'eau s'infiltré, provoquant des effondrements. Nous nous retrouvons donc à devoir combler des trous ! Il serait donc très intéressant de pouvoir combler ces trous avec des déchets inertes de déconstruction générés localement, en créant des technosols fertilisés grâce aux déchets verts. Certains bailleurs sont également intéressés par ces techniques pour créer des parcs au pied d'immeubles.

Enfin la Ville de Paris s'est engagée à créer 700ha de nouveaux espaces verts. La réutilisation de matériaux générés localement permettrait de les valoriser et d'éviter la surconsommation de ressources naturelles.”

Entretien avec Sébastien Barot (Partie 2):

M.M. : Que pensez-vous de la phytoremédiation ?

“Il y a plein de travaux la dessus, mais j’ai du mal à y croire : c’est compliqué et long : les plantes absorbent les métaux lourds mais ensuite il faut récolter les plantes, les brûler, récupérer les métaux lourds. Pleins de gens s’y intéresse mais moi je n’ai pas vu d’étude qui me convainque vraiment.”

M .M. : Et pour refaire un sol ?

“Si on a juste un sol avec des gravats, c’est sûr qu’il faut du temps pour recréer un sol fonctionnel. Mais on a déjà une idée de ce qu’il faut faire. On peut très bien aménager des parcs sur des sols pollués aux métaux lourds. Ceux-ci sont toxiques pour certaines plantes mais normalement elles arrivent à pousser. En revanche, pour l’agriculture c’est différent : les plantes concentrent les métaux lourds puis notre corps les accumule ce qui pose un problème sanitaire. On arrive vite au-dessus des normes.

Il faut donc s’y prendre différemment pour l’agriculture. Par exemple, si l’on utilise du compost issu de déchets ménagers, cela permet de recycler les nutriments. Aujourd’hui le gros problème en agriculture c’est que l’on produit à la campagne intensivement de la nourriture envoyée vers les villes. Les nutriments minéraux (azote, phosphore, etc...) contenus dans ces produits sont perdus dans les égouts. La fertilité part dans les égouts et les stations d’épuration. Si on les recyclait, on aurait moins besoin d’engrais à mettre dans les champs. Aujourd’hui on ne peut pas utiliser les boues d’épuration dans les champs car elles sont pleines de produits chimiques, d’antibiotiques, de bactéries pathogènes. Une partie de la matière solide qui reste est brûlée. C’est assez rigolo parce que dans les stations d’épuration on cherche à se débarrasser de l’azote en dénitrifiant et en produisant de l’oxyde d’azote alors qu’on utilise à côté du pétrole pour fixer l’azote atmosphérique en engrais. Il faudrait boucler le cycle, on pourrait imaginer des mini-stations d’épuration sur les toits des immeubles. Avec des plantes ou des poissons pour recycler l’eau, récupérer les déchets... C’est de la science-fiction mais ce n’est pas impossible.”

J.A. : D’où viennent les autres éléments minéraux ? L’azote vient de l’air mais le reste ?

“Le phosphore vient des mines, il va s’épuiser dans 50 ans, et pour les autres minéraux ce doit être pareil. C’est un des gros problèmes de l’agriculture actuelle, les sols sont drainés, s’épuisent et cela oblige à mettre des doses d’engrais de plus en plus fortes. Parce qu’une partie des nutriments est exporté et une autre partie des nutriments minéraux reste dans les sols et se fait entraîner dans la nappe phréatique. L’azote part dans l’eau sous forme de nitrates ou dans l’atmosphère par des bactéries qui font de la dénitrification. Les

autres nutriments sont sous formes de cations donc ils sont moins mobiles. C'est un vrai problème de l'agriculture, on a perdu une part croissante des engrais."

M.M. : Mais du coup quand on crée un sol avec des restes urbains, d'où viennent les nutriments ?

"Et bien de la matière organique qu'on met. Du compost... Comparons la nature à un champ: il n'y a rien qui est exporté dans la nature, les plantes et les animaux qui meurent restent sur place. Sur des milliers d'années, ceci abouti à un sol fonctionnel, alors qu'avec l'agriculture moderne on a perdu une partie de la fertilité des sols cultivés en 50 ans."

M.M. : Et qu'est-ce que l'on fait pour faire venir les bactéries du sols, les vers de terre... ?

"Quand on veut reconstruire un sol, par exemple avec des déchets de déconstruction, il faut ensuite apporter de la vie : pour ça il faut apporter de la matière organique : cela suffit car cela sert de nourriture pour tout le reste. Il y a des bactéries partout, donc quand on met en place un substrat, les bonnes bactéries s'installent, et sont à la base d'un nouveau réseau trophique. Des boites agroalimentaires ont développé des cocktails de bactéries et champignons. Cependant, aucune garantie que ces bactéries commercialisée vont survivre après les avoir incorporées dans le sol. Des gens réfléchissent aussi à accélérer le processus en ajoutant des vers de terre. Ensuite, il faut ajouter des plantes qui apportent leur propre matière organique. Entretenu par des rétroactions positives, cet écosystème va accélérer la dégradation des matériaux de construction de départ. Dans les grandes lignes c'est ce que l'on sait.

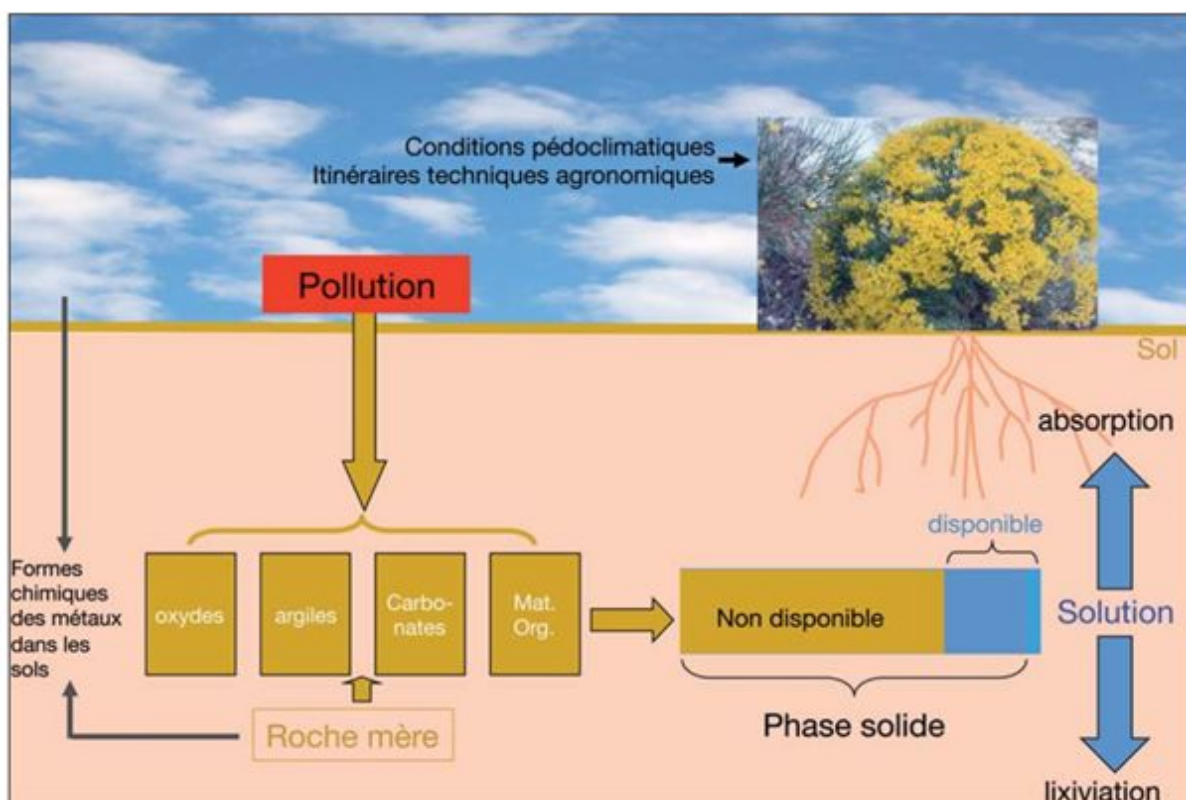
Combien de temps cela va-t-il prendre ? Si on avait cent ans devant nous il n'y aurait aucun problème. Mais si on veut accélérer, il faut agir."

J.A. : Mais du coup est ce qu'on est sûr que ça va repartir ou est-ce que ça peut être comme un désert : supposons que par magie tout Paris disparaît, est ce que ce sera un désert ou ça va recoloniser ?

"Moi je pense que tout va revenir. Mais après il existe des théories en écologie sur les états alternatifs stables. Cela provient du comportement d'équations différentielles. En climat tempéré, si on laisse vraiment faire, le seul état stable est la forêt. En 50 ou 500 ans on arrivera à une forêt, il n'y a qu'un seul équilibre. Après il y a des gens qui pensent qu'il existe parfois des états alternatifs stables si plusieurs équilibres sont possibles. Par exemple en zone Sahélienne, soit on a de la végétation, des petits arbres et des herbacées, soit la végétation a disparue. On va vers un équilibre ou un autre selon les conditions initiales pour un même climat. Toutefois prouver que de telles hystérésis (NDLR: existence d'états alternatifs stables) existent vraiment n'est pas évident."

III Des plantes pour guérir les sols : la phytoremédiation des sols contaminés

Issus des activités agricoles, industrielles ou urbaines, les polluants des sols sont analogues à ceux trouvés dans l'eau : on les classe en polluants organiques et inorganiques, tous étant très fortement associés à la matrice des sols, ce qui les rend difficiles à éliminer. Dès lors qu'un sol est contaminé, il représente une menace pour la sécurité alimentaire, car il permet l'absorption par les végétaux d'une fraction disponible de polluants (exemple des métaux lourds ci-dessous).



Devenir des métaux lourds dans les sols

Les différentes stratégies de remédiation des sols qui ont été développées suivent l'un des trois principes suivants, voire deux à la fois : immobilisation, destruction ou extraction du polluant. Il existe deux voies générales :

- **le traitement ex situ**, qui consiste à excaver le sol, puis à lui faire subir différents types de traitements : désorption thermique, oxydation ou dégradation biologique, etc. La terre traitée est ensuite réutilisée sur place ou transférée dans un centre de stockage ;

– **le traitement in situ**: le sol pollué reste en place et on lui applique des procédés chimiques (oxydation, réduction, lixiviation) et/ou biologiques (atténuation naturelle, phytoremédiation). Par exemple, les polluants organiques peuvent être éliminés en injectant dans le sol des oxydants puissants (procédé Oxysol par exemple). On peut aussi décider de laisser faire la nature tout en contrôlant l'évolution : c'est l'atténuation naturelle. On peut même utiliser le potentiel des plantes pour réduire le risque lié aux contaminations : c'est la phytoremédiation. Elle représente aujourd'hui l'une des voies possibles pour traiter de grandes surfaces contaminées, et faire passer la friche à une surface traitée qui peut être ensuite utilisée pour d'autres objectifs.

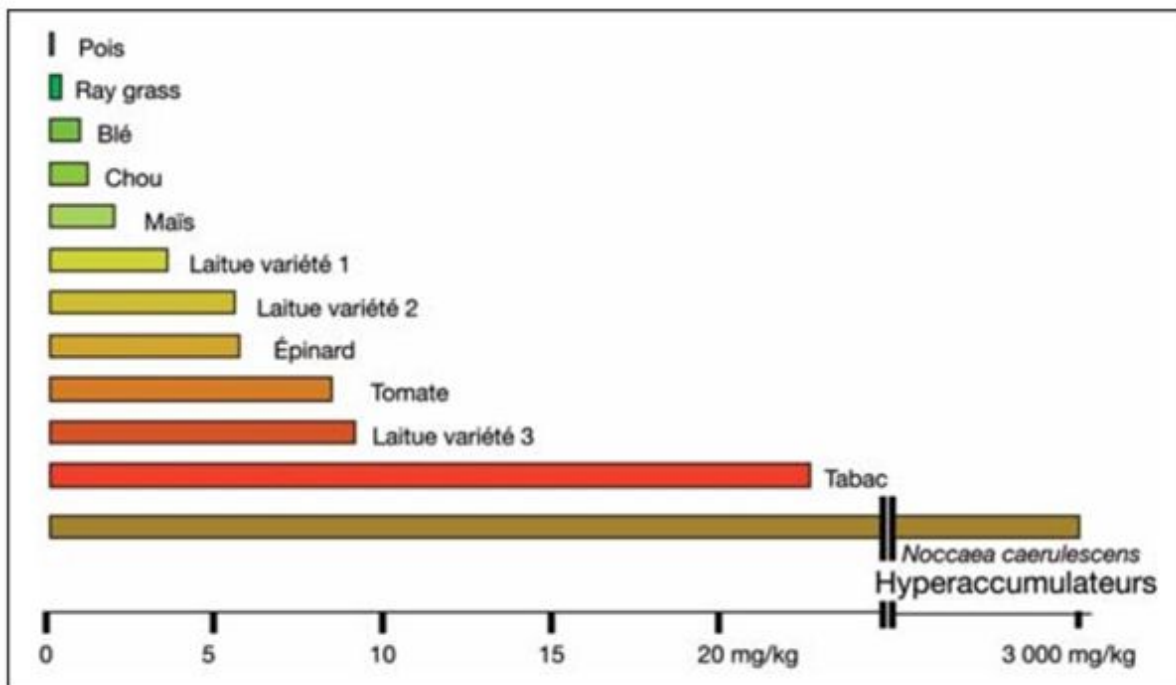
La phytoremédiation pourrait aussi s'appeler « rhizoremédiation » car le travail est principalement réalisé par les racines. Les parties aériennes de la plante jouent un rôle important, dans la mesure où elles captent l'énergie solaire et assurent les flux de polluants par la transpiration, mais c'est dans l'environnement racinaire que se passe l'essentiel des processus. Le système racinaire peut développer une très grande surface (plusieurs mètres carrés) qui constitue le lieu des interactions avec le sol. Si l'on examine ce qui se passe au niveau de l'extrémité d'une racine (l'apex), on constate que beaucoup de composés organiques, appelés exsudats, y sont libérés. Ils servent de substrats aux micro-organismes présents, de sorte qu'autour de la racine on observe une activité biologique particulièrement intense. Une racine se comporte donc comme un puits d'eau, de solutés et d'oxygène, et comme une source de dioxyde de carbone et de composés organiques, qui stimulent la croissance et le développement des micro-organismes, lesquels vont alors se multiplier autour de la racine et constituer ce que l'on appelle la rhizosphère

La phytoremédiation regroupe quatre modes d'action différents :

– **la phytostabilisation** : c'est le premier effet observé dès lors qu'une surface est cultivée. Elle est ainsi protégée contre des phénomènes de dégradation comme l'érosion, ce qui limite le transport de particules chargées en polluants par l'eau et le vent. Lorsqu'on implante un couvert végétal, quel qu'il soit, on stabilise le sol. Ce procédé est largement utilisé par le génie civil pour stabiliser les ouvrages, comme, par exemple, les talus routiers. Au-delà des effets mécaniques, les plantes contribuent aussi à stabiliser les polluants. On peut citer notamment le peuplier qui, en prélevant beaucoup d'eau via ses racines, contribue ainsi à diminuer les flux de polluants vers les profondeurs du sol. Cela suppose que les espèces végétales utilisées soient tolérantes, et permet l'installation d'un couvert végétal et l'initiation de nouveaux écosystèmes dans lesquels les flux de polluants sont diminués.

- **la rhizoatténuation** : ce processus intervient dans la rhizosphère, résultant en premier lieu de la stimulation de l'activité biologique, qui peut contribuer à la dégradation des polluants organiques, avec production in fine de dioxyde de carbone, mais aussi de produits intermédiaires ; les racines contribuent aussi à transformer les polluants organiques.

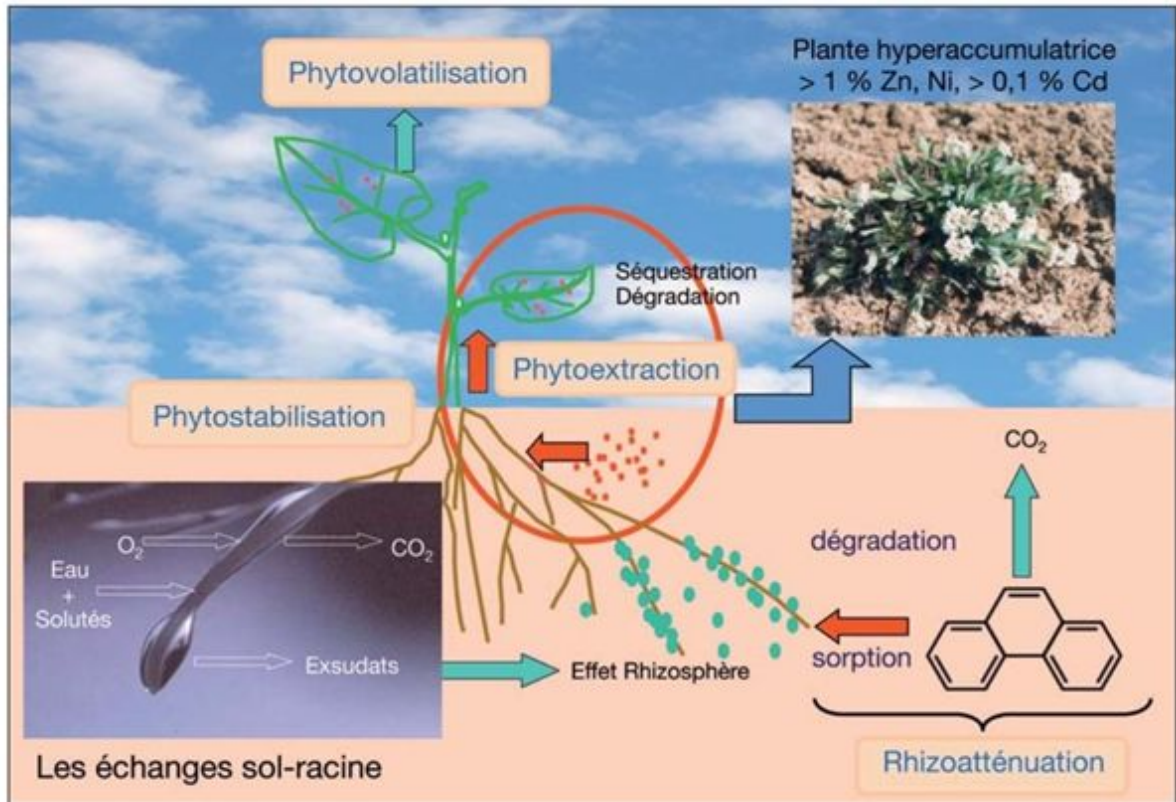
- **la phytoextraction** : c'est le principe de l'aspirateur. La plante prélève les polluants par ses racines. Ils sont transférés dans les parties aériennes où ils sont séquestrés dans les feuilles. Pour les métaux, des plantes particulières, décrites plus loin, sont dites hyper accumulatrices : elles sont capables d'absorber jusqu'à mille fois plus de métaux que les autres espèces végétales. Il existe deux voies principales : La première voie emploie des plantes accumulatrices à forte production de biomasse, comme la *Brassica juncea* (moutarde indienne), dont la taille compense le faible pourcentage d'accumulation. La seconde voie, au contraire, repose sur l'utilisation de plantes de biomasse parfois plus faible mais qui sont capables d'hyperaccumuler des éléments en traces. La concentration en nickel, cadmium ou zinc y atteint parfois le même ordre de grandeur que leurs éléments majeurs, comme azote, phosphore, potassium! La culture de ces plantes sur des sols de natures différentes a montré que l'activité hyperaccumulatrice des plantes dépend beaucoup du sol. Ainsi, il existe une relation étroite entre la capacité de la plante à prélever le métal et la quantité de métal disponible dans le sol : si le métal est peu disponible, la plante aura beaucoup de mal à l'extraire et à l'accumuler.



Comparaison des activités accumulatrices des plantes hyperaccumulatrices, mesurées en concentrations de cadmium dans les feuilles

Les métaux absorbés par les plantes hyperaccumulatrices sont soumis à des processus de transport puis de séquestration dans les parties aériennes, les feuilles en particulier. Le nickel a tendance à se localiser dans les cellules de l'épiderme des feuilles. Chez d'autres espèces et avec d'autres métaux tels que le zinc, les cellules de l'épiderme assurent une part importante de la séquestration. Pour la phytoextraction des métaux dans des sols pollués, l'approche générale est la suivante : les plantes sont cultivées, récoltées, séchées et éliminées en centre de stockage. Afin de compenser l'énergie dépensée, il est possible d'utiliser la biomasse comme source d'énergie voire comme source de métaux pour des applications industrielles, la phytomime.

– **la phytovolatilisation** est le prolongement de la phytoextraction, dès lors que la plante est capable de métaboliser les polluants. Ces derniers, comme les polluants organiques de type solvants chlorés très volatils, peuvent alors être volatilisés. Les plantes peuvent aussi transformer des éléments traces comme le sélénium, le mercure ou l'arsenic, qui prennent alors des formes chimiques volatiles. L'exemple le plus notable est la volatilisation du sélénium par des plantes de type *Astragalus* en Californie, qui transforment le sélénium en diméthylsélénide, composé volatil qui passe alors dans l'atmosphère. Ces réactions de méthylation sont aussi réalisées naturellement dans les sols par les micro-organismes. Globalement, la présence de plantes conduit à une élimination du sélénium du sol, mais aussi à un déplacement de la pollution vers l'atmosphère.



Modes d'action des plantes sur les polluants du sol au niveau du système racinaire. La phytoremédiation est fondée sur les interactions sol-racine-polluants. L'effet rhizosphère correspond à une stimulation de la croissance microbienne

En conclusion, la phytoremédiation recouvre une large gamme de procédés agro-écologiques. Générée par l'énergie solaire et sans altération de la fertilité du sol, elle répond aux critères du développement durable. Elle peut donc s'appliquer à de très grandes surfaces et à des contaminations superficielles, et c'est une approche efficace pour abaisser les risques liés aux sols contaminés. Elle permet d'élaborer un tampon entre les zones polluées et la biosphère. La phytoremédiation comporte néanmoins des limites, qui sont d'abord agronomiques : il faut sélectionner les meilleures plantes, disposer de semences et appliquer des itinéraires techniques appropriés. De plus, l'application de ces procédés à la dépollution des friches industrielles et des sols urbains contaminés implique une acceptation au plan technologique par les entreprises et les donneurs d'ordres, qui opposent souvent le temps nécessaire pour privilégier d'autres techniques de traitement. Au-delà de la dépollution, les procédés de phytoremédiation doivent permettre désormais la valorisation des milieux pollués ou naturellement très chargés en métaux. Ainsi, dans le cas de la phytoextraction, le procédé est maintenant intégré dans des filières à intérêt socio-économique telles que la production alimentaire, ou encore dans les cas où la production de biomasse comporte un intérêt industriel comme dans la phytomine, où l'on peut coupler la phytostabilisation des sols à la phytoextraction pour récupérer des métaux à

haute valeur ajoutée. Cette métallurgie verte encore expérimentale reste pour le moment limitée aux métaux pour lesquels il existe des plantes hyperaccumulatrices, comme le cadmium, le nickel, l'arsenic et le zinc. Les perspectives de développement de la phytoextraction sont, d'une part, d'augmenter la gamme d'éléments pouvant faire l'objet de la phytomine en s'appuyant sur les plantes accumulatrices à forte production de biomasse et, d'autre part, d'augmenter la biodisponibilité des métaux par un contrôle des processus rhizosphériques et l'addition de composés appropriés, comme des agents complexants dans les sols. Dans le cas du nickel, nos travaux ont démontré que la phytomine constitue une filière offrant un rendement économique analogue à celui des cultures de céréales. Il y a là une perspective très encourageante pour les agriculteurs et pour le développement de procédés d'extraction minière innovants et répondant aux critères de développement durable.

Conclusion:

Les sols urbains sont gravement altérés et pollués. La restauration de sols anciennement imperméabilisés est complexe, et se fait souvent aujourd'hui de façon non durable par la ponction de sol rural. Nous avons montré que des techniques plus durables, moins coûteuses en énergie et moins destructrices peuvent être mises en place pour la restauration de ces sols, bien que certaines en restent à un stade expérimental. Ainsi, l'utilisation de matériaux de déconstruction et de compost permettrait une restauration des sols en faisant appel à des ressources locales. La phytoremédiation permettrait de même une dépollution et une restructuration des sols peu agressive, et peu coûteuse, bien que demandant du temps. Un des problèmes majeurs de la restauration des sols urbains est en effet d'ordre politique et économique : l'aménagement urbain s'accommode mal des délais de ces méthodes de restauration faisant appel à des processus naturels, et l'importation dans les zones urbaines de sols agricoles pris ailleurs est souvent préféré pour sa rapidité à la restauration d'un sol sur place. Un tel procédé est non durable et manifeste une relation prédatrice aux ressources naturelles : les sols ne se renouvellent que très lentement.

Nous devons toutefois mentionner le fait que la restauration des sols urbains n'est qu'un pis aller et que la priorité devrait être de limiter autant que possible la destruction des sols existant, en limitant l'étalement urbain et par des pratiques agricoles compatibles avec le maintien d'interactions écosystémiques.

Bibliographie:

- Brazel, A., N. Selover, and R. Voes. 2000. The tale of two cities—Baltimore and Phoenix urban LTER sites. *Climate Research* 15:123–135.
- Brown, L. , 2012. Full planet, Empty plates, the New geopolitic of food scarcity, Earth policy institute.
- Gregg, J. W., C. G. Jones, and T. E. Dawson. 2003. Urbanization effects on tree growth in the vicinity of New York City. *Nature* 424:183–187.
- Groffman, P. M., R. V. Pouyat, M. J. McDonnell, S. T. A. Pickett, and W. C. Zipperer. 1995. Carbon pools and trace gas fluxes in urban forest soils. Pages 147–158 in R. Lal, J. Kimble, E. Levine, and B. A. Stewart, editors. *Soil management and the greenhouse effect*. CRC, Inc, London.
- Jenny, H. 1941. *Factors of soil formation: a system of quantitative pedology*. McGraw-Hill, New York.
- Kaye, J. P., P. M. Groffman, N. B. Grimm, L. A. Baker, and R. V. Pouyat. 2006. A distinct urban biogeochemistry? *Trends in Ecology & Evolution* 21:192–199.
- Meadows D. et D., J. Randers, 2004, *Limits to growth The 30 years Update*, Chelsea Green publishing.
- Oke, T. R. 1995. The heat island of the urban boundary layer: characteristics ,causes, and effects. Pages 81–107 in J. E. Cermak, editor. *Wind climate in cities*. Kluwer Academic, Netherlands.
- Pavao-Zuckerman, M. A., and D. C. Coleman. 2005. Decomposition of chestnut oak (*Quercus prinus*) leaves and nitrogen mineralization in an urban environment. *Biology and Fertility of Soils* 41: 343–349.
- Pavao-Zuckerman, M. A. 2008. *The Nature of Urban Soils and Their Role in Ecological Restoration in Cities*. *Restoration Ecology* 16: 642–649.
- Pouyat, R. V., M. J. McDonnell, and S. T. A. Pickett. 1995. Soil characteristics of oak stands along an urban-rural land-use gradient. *Journal of Environmental Quality* 24:516–526.
- Vidra, R. L., T. H. Shear, and T. R. Wentworth. 2006. Testing the paradigms of exotic species invasion in urban riparian forests. *Natural Areas Journal* 26:339–350.