
Du déchet au Technosol fertile : l'approche circulaire du programme français de recherche SITERRE

Laure Vidal-Beaudet

DOI : 10.4000/vertigo.21887

ISSN : 1492-8442

Éditeur

Les Éditions en environnement VertigO

Référence électronique

Laure Vidal-Beaudet, « Du déchet au Technosol fertile : l'approche circulaire du programme français de recherche SITERRE », *VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement* [En ligne], Hors-série 31 | septembre 2018, mis en ligne le 05 septembre 2018, consulté le 16 janvier 2020. URL : <http://journals.openedition.org/vertigo/21887> ; DOI : 10.4000/vertigo.21887

Ce document a été généré automatiquement le 16 janvier 2020.



Les contenus de *VertigO* sont mis à disposition selon les termes de la Licence Creative Commons Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale - Pas de Modification 4.0 International.

Du déchet au Technosol fertile : l'approche circulaire du programme français de recherche SITERRE

Laure Vidal-Beaudet

Introduction

- 1 Les migrations de population des zones rurales vers les zones urbaines (50 % de la population mondiale en 2015 qui devrait atteindre 70 % en 2050, United Nations 2011) engendrent des mutations de l'occupation de l'espace urbain et des consommations de matières premières conséquentes (782 millions de tonnes en 2012 en France, ADEME, 2015). Le citoyen est amateur de parcs verdoyants, squares reposants et arbres élégants, et il ne se doute pas que le sol est le secret d'une belle nature en ville. Il ignore que le sol qu'il foule est obtenu à partir d'une terre décapée sur les meilleurs sols agricoles, puis stockée et déplacée pour satisfaire les besoins des aménagements urbains végétalisés. Ainsi, chaque année en France métropolitaine, plus de trois millions de mètres cubes de ressource primaire terre sont introduits dans la ville pour construire des sols fertiles. Parallèlement, le système urbain exporte des matériaux issus de son activité ou de sa déconstruction (380 millions de tonnes en 2012 dont 240 issus des déchets de construction, dont seulement 50 % sont valorisés et 60 de la classe « terre et cailloux » qui ne sont pas valorisés, ADEME, 2015). Ainsi de très grandes quantités de matières organiques (déchets verts, boues issues de stations d'épuration), ou de terres excavées et de gravats sont produites par la ville, faiblement valorisées, et encore très souvent dirigées vers des installations de stockage des déchets. Le système urbain présente donc un métabolisme linéaire avec des matériaux primaires qui rentrent et des déchets qui sortent. Or le système urbain, support d'une grande partie des activités humaines, doit évoluer vers un écosystème durable, adaptable, et capable de proposer une gestion optimisée des ressources locales en récupérant et valorisant systématiquement l'énergie, l'eau, les matériaux de construction et les déchets

(Comité 21, 2012). C'est un enjeu fort de société à la fois d'ordre sociétal, politique, environnemental et économique.

- 2 En ville, une part importante et croissante de l'espace est dédiée à la végétalisation avec une tendance à réduire les proportions de sols scellés dans les nouveaux projets d'aménagement ce qui accroît les besoins en sol support de végétation. L'utilisation de certaines de ces matières premières secondaires ne serait-elle pas à même de constituer des mélanges fertiles ?

Le programme de recherche Siterre

- 3 Réaliser des économies en ressources primaires terre et granulats de carrière tout en réduisant les impacts environnementaux correspond aux objectifs du programme SITERRE. Un consortium de 9 partenaires (Plante et Cité, Acteon, Agrocampus Ouest, BRGM, IFSTTAR, Université de Lorraine-INRA-GISFI, Groupe Luc Durand, RITMO, VALTERRA, VoxGaia) s'est constitué dans le cadre d'un programme financé par l'ADEME et les partenaires, et piloté par Plante et Cité. Durant 5 ans (2011 à 2015), les travaux scientifiques et expérimentaux du programme SITERRE ont étudié la possibilité de construire des sols urbains fertiles et plurifonctionnels à partir de déchets et sous-produits issus des villes et destinés aux aménagements végétalisés d'agréments. La capacité à cultiver des fruits et légumes destinés à la consommation humaine en l'absence de risque sanitaire n'a pas été étudiée, et n'est donc pas encore démontrée.
- 4 Les objectifs du programme SITERRE consistaient à (i) montrer la faisabilité et le potentiel de construction de sols fertiles à partir de déchets et sous-produits urbains, (ii) développer des modèles de prédiction de la fertilité des mélanges, (iii) évaluer et contrôler les risques potentiels pour la santé des personnes et l'environnement, (iv) créer un outil d'aide à la décision et (v) proposer la mise en place d'une nouvelle filière. Le texte qui suit est un résumé étendu des travaux de recherche réalisés au cours des cinq années. Les résultats complets du programme SITERRE sont publiés dans un livre² qui constitue une première réponse aux problématiques de la ville durable en diffusant l'état des lieux actuel des connaissances scientifiques, techniques et opérationnelles acquises sur la construction de Technosol et ce afin d'aider à structurer une nouvelle filière.

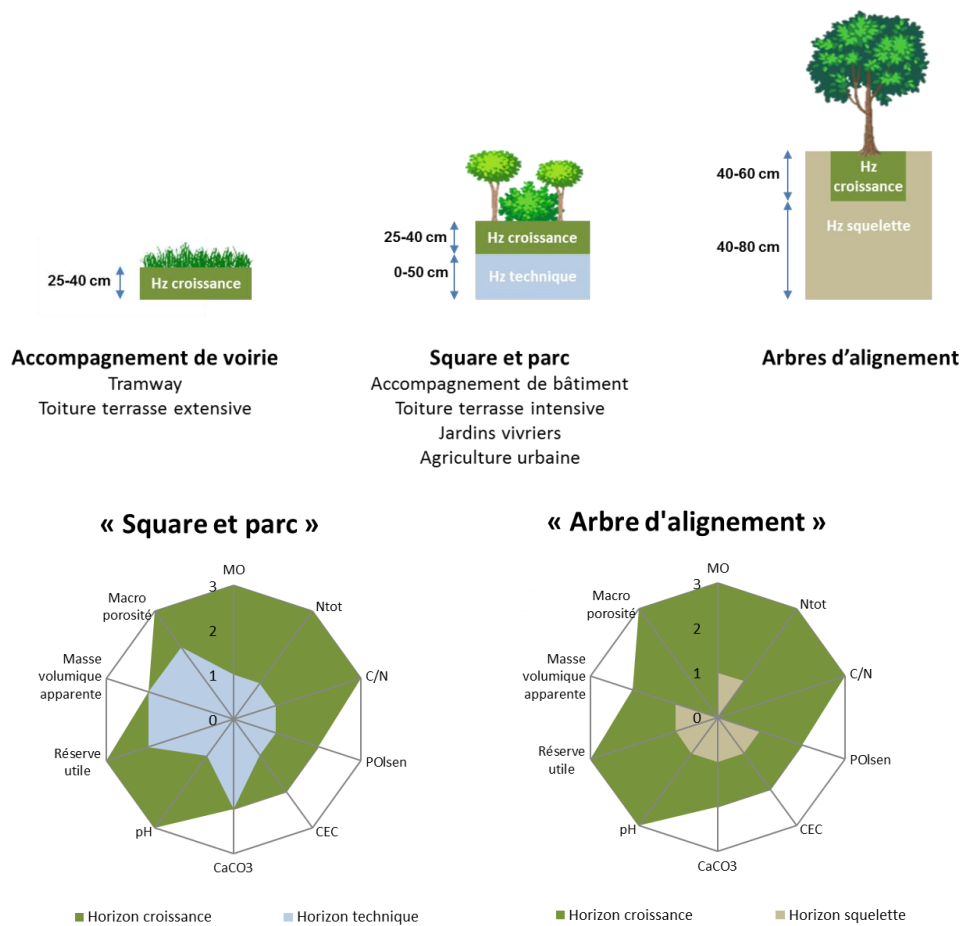
Comment concevoir un sol fertile pour la ville ?

- 5 La technique de construction de sols favorise l'association et la mise en œuvre d'une palette de matériaux plus large que la seule terre végétale, le compost et les granulats de carrière avec une démarche vertueuse sur le plan technique et environnemental. Cette solution permet un contrôle précis des propriétés des matériaux entrants dans le mélange afin de correspondre au mieux avec les propriétés idéales attendues pour le sol construit, et ce en fonction des usages. Les services gestionnaires des villes ont identifié treize types d'espaces végétalisés (AITF, 1995 in Micand, 2011) et leur associent des modalités de gestion et d'entretien. Dans le cadre du programme SITERRE, ces espaces sont regroupés en cinq grandes catégories d'usage qui présentent des opportunités fortes pour la construction de sols fertiles : (i) squares et parcs, (ii) accompagnement des voies de circulation, (iii) accompagnement des bâtiments publics,

(iv) espaces naturels aménagés et (v) arbres d’alignement. Les usages « square et parc » et « arbre d’alignement », qui présentent des contrastes forts en matière de fonctions de support, d’alimentation en eau, de source de nutriments et de filtre-échange, ont été étudiés en détail au cours du programme.

- 6 Pour chaque usage, un niveau de fonctionnalité optimal du sol à construire a été défini avec (i) le nombre d’horizons à mettre en place (deux horizons pour « square et parc », un horizon et un trou de plantation pour « arbre d’alignement ») (ii) le type de chaque horizon (de croissance, technique ou squelette) et (iii) les propriétés idéales attendues pour chaque type d’horizon (Figure 1).

Figure 1. Les profils de sols construits (arrangement et nombre et profondeur d’horizons) définis en fonction des usages. / Constructed soil design (arrangement, number and depth of soil horizons) proposed for the land-uses.



Les couches sont décrites en fonction des propriétés idéales attendues (les paramètres physiques sélectionnés sont : masse volumique apparente, macroporosité, réserve utile en eau, et les paramètres chimiques sélectionnés sont : capacité d’échange cationique, phosphore disponible P_{Olsen} , teneur en matière organique et en azote total, rapport C/N, pH, teneur totale en calcaire) pour les usages modèles « square et parc » et « arbre d’alignement »./ The layers were described in terms of expected levels of ideal soil properties (the selected physical parameters were : bulk density, macroporosity, available water for plants, and the selected chemical parameters were : cation exchange capacity, available phosphorus P_{Olsen} , organic matter and total nitrogen contents, C/N ratio, pH water, and total calcium carbonate content) for the two representative land-uses “square and park” and “street tree”.

- 7 Des recherches bibliographiques et l'expertise des partenaires du programme SITERRE ont permis de définir les propriétés idéales attendues pour chaque horizon. Elles sont associées à dix paramètres physico-chimiques identifiés comme les plus pertinents pour répondre aux objectifs d'un sol optimal support de développement végétal (masse volumique apparente sèche, macroporosité, réserve utile pour les plantes ; pH, teneur en matières organiques, azote total, rapport C/N, phosphore disponible pour les plantes, capacité d'échange cationique et concentration en calcaire). Tous ces paramètres combinés permettent au sol de remplir les fonctions attendues et ainsi de rendre des services associés.

Quels matériaux de substitution pour quels mélanges fertiles ?

- 8 La sélection de matériaux potentiels pour la construction de sol passe par l'identification exhaustive de toutes les ressources disponibles au plan national. Le Catalogue européen des déchets (Commission des communautés européennes, 2014) intègre tous les déchets existants et recense actuellement 836 déchets. Dans un premier temps, une sélection à partir de critères rédhibitoires d'utilisation d'un matériau en construction de sol a été appliquée sur la liste du catalogue européen. Dix-sept critères ont été testés en lien avec la dangerosité, l'impact environnemental ou sanitaire évident, la forme de la matière trop liquide ou trop solide et incompatible avec une formulation de mélange, l'évaluation quantitative des gisements disponibles. L'application de ces critères d'élimination a permis de constituer une première liste de 142 matériaux potentiels utilisables (102 minéraux, plastiques ou inertes, et 40 organiques), le programme SITERRE a ensuite effectué une nouvelle sélection à partir d'études bibliographiques et de « dires d'experts » afin de travailler sur une liste plus réduite. Cette deuxième sélection a distingué les matériaux organiques et minéraux, puis une note a été attribuée pour hiérarchiser les matériaux en fonction de différents critères : (i) importance du gisement sur le territoire national, (ii) propriétés mécaniques, physiques, chimiques du matériau, (iii) nature à caractère toxique, pathogène ou écotoxicologique et (iv) aspects et critères organoleptiques. Vingt-sept matériaux ont été retenus à l'issue de cette deuxième sélection (13 matériaux minéraux ou inertes et 14 matériaux organiques) et regroupés ensuite par typologie de matériaux à partir de critères physique/mécanique, agronomie/chimie et salinité/toxicité (Damas et Coulon, 2016). Les 27 matériaux sélectionnés répartis en quatre groupes de matériaux ((1) briques, tuiles, céramiques, (2) terre d'excavation, (3) déchets de sylviculture, jardins municipaux, tissus végétaux, (4) boue de dragage) présentent tous un potentiel d'utilisation générique pour la construction de sol. Le regroupement a permis de mettre en évidence des matériaux avec des caractéristiques proches et c'est finalement l'importance du gisement et le critère de disponibilité sur le plan national qui ont permis de retenir onze matériaux-modèles de substitution : six matériaux minéraux (écarts de fabrication de briques, béton concassé, ballasts usagés, déchets de déconstruction de bâtiments, terre excavée acide et terre excavée basique) et cinq matériaux organiques ou organo-minéraux (déchets verts broyés, déchets de balayage de rue, boues papetières, boues de station d'épuration, composts de déchets verts et de boues de STEP) (Figure 2).

Figure 2. Les onze matériaux-modèles sélectionnés par le programme SITERRE./ The eleven wastes selected by the SITERRE program.



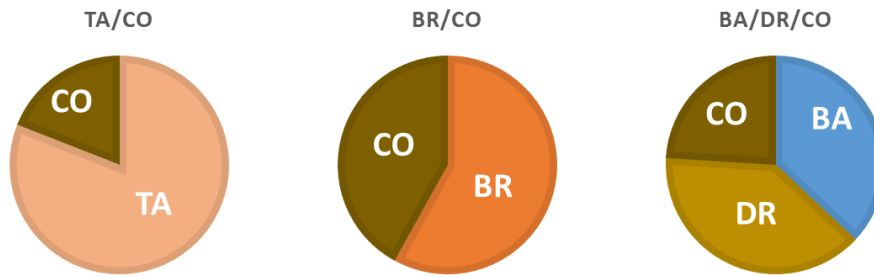
- 9 Le programme SITERRE a émis l'hypothèse qu'aucun matériau ne présente individuellement le niveau de qualité souhaitée pour construire un sol fertile. Des mélanges, 75 au total, résultant de l'association de deux ou trois matériaux (15 binaires et 11 ternaires) et avec différents ratios de matériaux pour un même mélange ont été testés au laboratoire (Rokia et al., 2014). Les paramètres définis précédemment ont permis de caractériser la fertilité physico-chimique des mélanges. Des courbes doses-réponses de chaque paramètre ont pu être modélisées et permettent de prédire de manière satisfaisante (coefficient de corrélation variant de 0,86 à 0,99) au moins quatre des paramètres (masse volumique apparente sèche, réserve utile pour les plantes, phosphore disponible pour les plantes, capacité d'échange cationique).
- 10 Ces résultats ont permis d'alimenter les données techniques d'un outil d'aide à la décision créé pour faciliter la formulation des mélanges et vérifier l'adéquation de leurs caractéristiques avec les usages attendus.

Évaluation de la qualité des sols construits et de leur innocuité

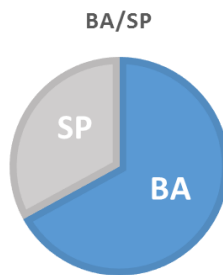
- 11 Six mélanges ont été sélectionnés afin de construire les horizons fonctionnels pour les modalités « square et parc » (un horizon de croissance sur un horizon technique) et « arbre d'alignement » (un horizon de croissance dans un horizon squelette) (Figure 3).

Figure 3. Les six mélanges modèles retenus pour les tests au laboratoire et in situ en proportion massique./ The six mixtures selected for the laboratory and in situ tests in mass proportion.

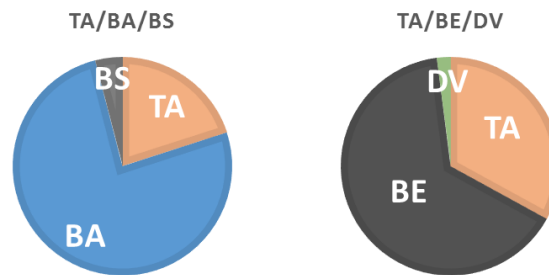
mélanges de croissance



mélange technique



mélanges squelettes



ballast (BA), béton (BE), brique (BR), boues de STEP (BS), compost (CO), déchets verts (DV), déchet de balayage de rues (DR), sous-produits papetiers (SP) et terre excavée acide (TA)/
 Legend : track ballast (BA), concrete (BE), brick (BR), sewage sludge (BS), compost (CO), green waste (DV), street sweeping waste (DR), paper-mill sludge (SP) and excavated acidic earth (TA).

Source : Damas et Coulon, 2016.

- 12 Les propriétés physiques, chimiques, biologiques et écotoxicologiques de chacun des mélanges ont été mesurées à l'instant initial et au cours du temps. Les résultats montrent qu'il existe une bonne superposition entre les paramètres physico-chimiques prédits par le modèle et les valeurs mesurées pour tous les types de mélanges, même si certains paramètres tels que le pH restent très difficiles à estimer. Le paramètre phosphore disponible pour les plantes montre que les mélanges de croissance constituent une très bonne ressource avec des valeurs supérieures aux attentes.

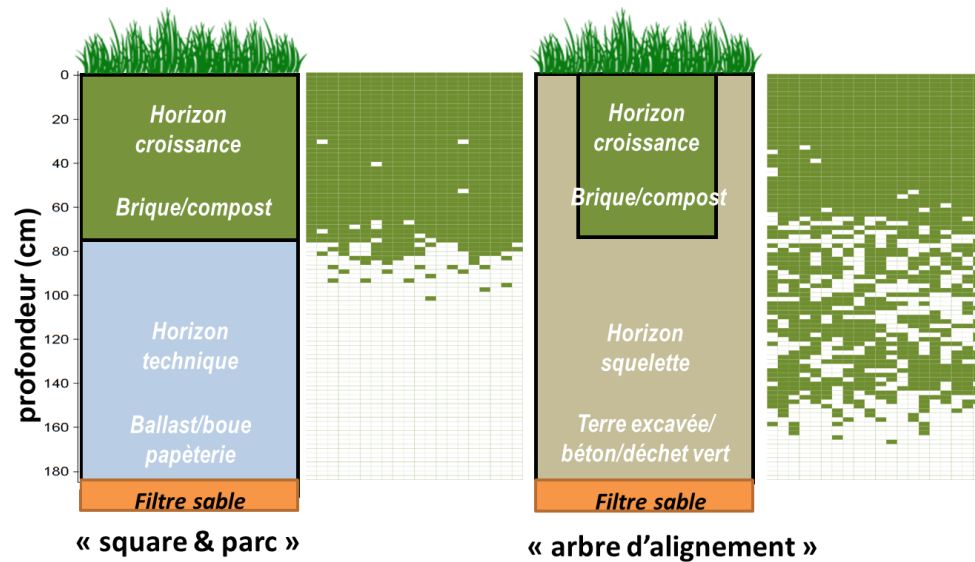
Des sols fonctionnels en conditions naturelles

- 13 L'évolution dans le temps des mélanges a été étudiée au laboratoire en conditions contrôlées et dans des dispositifs *in situ* aptes au vieillissement en conditions naturelles. Les sols placés en conditions naturelles (site GISFI près de Nancy durant 2 ans et site Agrocampus Ouest durant 3 ans) étaient soumis aux facteurs climatiques (pluie, soleil, gel-dégel), chimiques (pH, mise en solution des éléments), et biologiques (activité des micro-organismes, végétation). Le site du GISFI correspondait à deux lysimètres (profondeur 2 m, surface 1 m²), un pour chaque modalité, semés avec du ray-grass. Le site Agrocampus Ouest comportait neuf bacs (480 L, échelle 1 /3) de la modalité « arbre d'alignement », plantés avec des érables planes (*Acer PLATANOÏDES*). Des mesures de bilan hydrique, de caractérisation chimique des percolats, de propriétés physico-chimiques,

hydrauliques et écotoxicologiques des sols construits ont été mesurées et la biomasse produite et les profils racinaires ont été observés (Yilmaz et al., 2016).

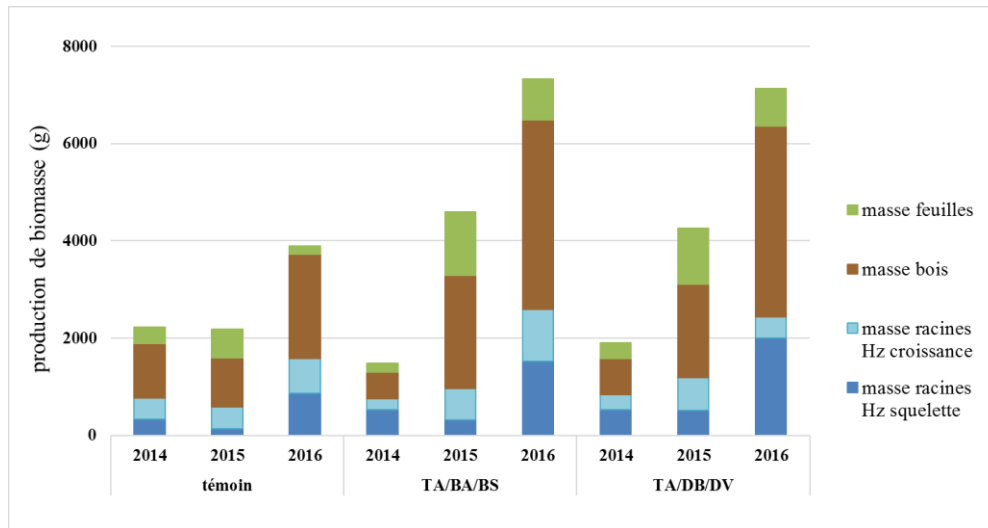
- 14 Dans le dispositif du GISFI, les horizons mis en place ont favorisé le développement racinaire dans l'ensemble du volume de sol disponible (Figure 4) et ont permis la production d'une biomasse aérienne égale (1,4 à 4,2 t ha⁻¹) à celle obtenue sur des prairies extensives en Lorraine (2 à 4 t ha⁻¹).

Figure 4. Développement racinaire et production de biomasse du ray-grass pour les modalités « square et parc » et « arbre d'alignement » sur le site expérimental du GISFI. / Root development and biomass production of ray-grass for the land-uses "square and park" and "street tree" on experimental GISFI site.



- 15 Sur le site d'Agrocampus Ouest, la production de biomasse aérienne et racinaire des *Acer PLATANOÏDES* a été supérieure dans les bacs remplis de Technosols squelette par rapport au mélange témoin squelette (Figure 5).

Figure 5. Production de biomasse racinaire et aérienne des *Acer platanoides* pour la modalité « arbre d'alignement » dans le sol squelette témoin, le mélange squelette « terre excavée acide/ballast/boue de station d'épuration » (TA/BA/BS) et le mélange squelette « terre excavée acide/déchet de démolition du bâtiment/déchet vert » (TA/DB/DV) sur le site expérimental d'Agrocampus Ouest. / Root and aerial biomass production of *Acer platanoides* for the land-uses "street tree" in the control structural soil, the structural mixture excavated "acidic earth/track ballast/sewage sludge" (TA/BA/BS) and the structural mixture "excavated acidic earth/demolition rubble/green waste" (TA/DB/DV) on experimental Agrocampus Ouest site.



Évaluation de l'innocuité pour l'environnement et pour l'homme

- 16 L'évaluation de l'innocuité des mélanges et des sols construits pour l'environnement et pour l'homme a été réalisée en mesurant les concentrations en polluants ou pathogènes préoccupants auxquels l'homme ou les organismes cibles des écosystèmes seront exposés.
- 17 Les concentrations totales en éléments-traces sont généralement peu élevées pour les 6 mélanges testés. Elles sont notamment inférieures aux teneurs limites fixées pour l'épandage de boues sur les sols agricoles (arrêté du 8 janvier 1998) ainsi qu'aux valeurs limites fixées pour les supports de culture par la norme NF U 44-551 (AFNOR, 2002) pour le plomb, le zinc, le cadmium, le chrome, le cuivre et le nickel. Enfin selon les référentiels ASPITET (Baize, 1997) et le réseau de mesure de la qualité des sols (Gis Sol, 2011), les concentrations en éléments traces sont toutes dans les gammes de valeurs couramment observées dans les sols « ordinaires » de France sauf pour le zinc et le cuivre. Des essais au laboratoire de lixiviation ont été réalisés afin d'évaluer les évolutions des phases minérales au cours du temps et leurs impacts potentiels sur d'autres composantes environnementales telles que les nappes souterraines. Les concentrations en éléments traces sont généralement peu élevées dans les lixiviats avec des concentrations inférieures ou très proches des valeurs limites fixées pour l'enfouissement des déchets inertes (arrêté du 12 décembre 2014). Une évaluation écotoxicologique aquatique des mélanges a montré que l'écotoxicité est faible et acceptable pour les mélanges.
- 18 Les effets vis-à-vis des bioindicateurs terrestres (test d'évitement/préférence de substrat par les vers de terre avec un substrat témoin et test de germination/croissance de végétaux) sont marqués. Les deux hypothèses avancées pour expliquer ces résultats portent d'une part sur la forte conductivité électrique des mélanges liée à la présence

de boues de STEP ou de co-compost de déchet vert et de boue de STEP. Et d'autre part, la granulométrie grossière des mélanges est peu compatible avec les tests de laboratoire. Ces deux composantes peuvent occasionner des difficultés d'imbibition/germination, de croissance et jouer sur l'appétence des vers de terre épigés testés. Par ailleurs, une bonne croissance des végétaux a été observée sur les deux sites expérimentaux. Il faut retenir de ces résultats que ces effets sont à relativiser et à considérer avec du recul. L'évaluation écotoxicologique des sols construits est à poursuivre.

- 19 Selon les usages de sol construit, l'homme sera diversement exposé et une évaluation quantitative des risques sanitaires (EQRS) a été réalisée pour des promeneurs, adultes et enfants, et pour les personnels en charge de l'entretien des espaces. À partir d'hypothèses d'ingestion, d'inhalation, de contact cutané et de doses associées, un scénario majorant (ingestion par un enfant pendant 365 jours) révèle que le risque pour la santé humaine est faible (la notion de risque zéro n'existe pas). Précisons que chaque cas de mise en œuvre de sols est particulier et qu'une évaluation de risque (associé à un usage donné, pour une exposition donnée) est à prendre en considération. Concernant les agents pathogènes, dans le cadre réglementaire actuel, il n'existe pas de référentiel pour la construction de sol. Si l'on se réfère à la norme NF U 44-551 des supports de culture (AFNOR 2002), les cinq matériaux organiques et les six mélanges présentent un niveau en salmonelles inférieur à la valeur limite autorisée.

Acceptabilité des matériaux de substitution

- 20 Une analyse sociale a été réalisée afin de mieux comprendre la perception des citoyens et parties prenantes vis-à-vis des matériaux utilisés dans la construction de sols fertiles pour l'aménagement de parcs urbains. À cette fin, plusieurs groupes de discussion impliquant une soixantaine de citoyens ont été animés. Ces ateliers permettent aux personnes d'affronter physiquement les matériaux (texture, couleur) et d'analyser l'évolution de perception de ces personnes avant et après avoir donné des informations objectives.
- 21 L'analyse de l'acceptabilité a permis d'évaluer :
- les préjugés et les sentiments liés à l'aspect visuel des matériaux sans aucun renseignement préalable fourni : par exemple les déchets verts (DV), compost (CO), déchets de balayage de rues (DR) et brique (BR) sont appréciés visuellement ;
 - les préjugés et les sentiments associés au seul nom des matériaux sans explication ni visuel : CO et DV sont très bien perçus alors que DR et boues papetières (SP) le sont très mal ;
 - l'évolution des perceptions lorsque l'on associe le visuel avec le nom : encore une perception positive de DV et CO, toujours négative pour SP et les boues de station d'épuration (BS), mais neutre par exemple pour DR.
- 22 Les participants pensent unanimement qu'il est possible de construire un sol à partir des matériaux et sont à même de proposer des mélanges de matériaux, qui contre toute attente, associent spontanément et presque à chaque fois une fraction organique à une fraction minérale.
- 23 Un travail de communication, d'information et d'explication autour des matériaux, de leurs origines et des impacts qu'ils génèrent se révèle être des éléments déterminants dans l'acceptabilité des matériaux les plus mal notés. Les plaquettes d'information,

panneaux sur site, informations et réunions publiques autour des projets d'aménagement, presse locale et bulletins municipaux, constituent des leviers d'acceptabilité à ne pas négliger.

Compétitivité économique de la construction de sol

- 24 Un outil d'aide à la décision a été élaboré pour faciliter la conception d'un sol construit en prenant en compte les contraintes techniques (disponibilité de matériaux, caractérisation des matériaux), économiques (prix des matériaux, déterminants des coûts de transports) et sociétales (acceptabilité, innocuité) pour un usage donné de sol. L'outil fournit une vision simplifiée des avantages et inconvénients techniques et économiques des mélanges de matériaux disponibles à l'attention du décideur.
- 25 La viabilité économique de cette nouvelle filière de construction de sol a été comparée aux filières existantes de reconstitution de sol à partir de terre végétale et de granulats de carrière. Les coûts totaux de la chaîne technique et logistique de fabrication et mise en place des mélanges ont été évalués sur les communes d'Angers, de Nancy et la région Île-de-France. Les coûts principaux comprennent les coûts d'achats de matériaux, de transport, de mélange, stockage et analyses. Pour l'horizon de croissance et l'horizon squelette, les résultats des estimations montrent que le coût total de la filière de construction de sol est systématiquement inférieur au coût de la filière traditionnelle (Tableau 1).

Tableau 1. Résultats des estimations de coûts pour l'horizon de croissance et l'horizon squelette. / Results of cost estimates for the growth horizon and the structural horizon.

Horizon de croissance (cm)	€/tonne				Horizon squelette (cm)			
	Transport	Achat Matériau	mélange stockage	Coût total	Transport	Achat Matériau	mélange stockage	Coût total
Angers								
Construction sols	2,3	-3,9	6,5	4,9	2	2,5	6,5	11
Traditionnelle	7,5	9	6,5	23,0	6,1	13,7	6,5	26,3
Nancy								
Construction sols	7,5	-3,9	6,5	10,1	5,8	2,6	6,5	14,9
Traditionnelle	8,7	9	6,5	24,2	36,8	13,2	6,5	56,5
Paris/Île-de-France (IDF)								
Construction sols	6,1	-7,9	6,5	4,7	5,2	5	6,5	16,7
Traditionnelle	8,6	15,3	6,5	30,4	49,8	13,8	6,5	70,1

Perspectives et conclusion

- 26 Le programme SITERRE a permis de démontrer que des solutions alternatives à la consommation de ressources naturelles existent pour l'aménagement des espaces végétalisés en milieu urbain. De l'hypothèse à la réalité, les travaux scientifiques et expérimentaux réalisés démontrent la faisabilité de la construction de sols fertiles à partir de matériaux recyclés. Ces sols sont aptes à assurer des fonctions essentielles pour un meilleur fonctionnement de l'écosystème urbain : support fertile pour la végétation, réserve en eau pour les plantes, ressource en éléments nutritifs tels que le phosphore (Vidal-Beaudet et al., 2016), filtre des polluants, résistance à l'érosion et à la battance, support des activités humaines (circulation légère). Une évaluation semi-quantitative des services écosystémiques potentiels rendus par les mélanges du

programme SITERRE en comparaison avec la terre végétale ou le mélange terre-pierre montrent que les sols construits peuvent offrir de meilleures performances pour certains services comme la régulation du climat global (moins de transport, plus de stockage de carbone).

- 27 Tous les résultats du programme démontrent la légitimité et le fort potentiel opérationnel de développement de la construction de sols. Au-delà de l'étape de la recherche, la poursuite de ces travaux pour l'inscrire dans la pratique s'oriente désormais vers deux axes principaux. Tout d'abord, la mise en place de sites pilotes à partir de 2018 au sein d'opérations d'aménagements réelles, pour poursuivre l'acquisition de connaissances sur le plan scientifique (agronomique, sanitaire et environnemental), et opérationnel (économique, itinéraires techniques) et être force de démonstration. Puis, l'encadrement réglementaire actuel de l'emploi de matériaux recyclés dans la construction de sol est partiel, difficile à comprendre, et nécessite d'être précisé rapidement, compte tenu des enjeux soulevés, et des initiatives recensées en matière d'aménagement. Le rapprochement initié au cours du programme avec les instances gouvernementales compétentes (ministères, ANSES par ex) représente l'action prioritaire à mettre en œuvre dès cette année 2017.

Remerciements

- 28 Le programme de recherche SITERRE a été financé par l'ADEME (projet de recherche n° 0906C0063). Les essais sur le terrain ont été conduits sur dans le cadre du GISFI (www.gisfi.fr) et sur le site d'Agrocampus Ouest Campus d'Angers. Tous les partenaires impliqués dans le programme SITERRE doivent être remerciés et plus particulièrement la doctorante Sarah Rokia, l'équipe technique du LSE (Adeline Bouchard, Stéphane Colin), du GISFI (Rémi Baldo, Lucas Charrois), d'EPHOR (Y. Barraud-Roussel, S. Delepine-Bourgeois and C. Mazzega), ainsi que tous les stagiaires étudiants pour leur aide substantielle durant ces cinq années. Enfin tous les membres du consortium SITERRE, partenaires engagés et auteurs du livre doivent être cités : Philippe Bataillard, Bureau de Recherches Géologiques et Minières, Orléans; Mohammed Benbrahim, RITMO agroenvironnement, Colmar; Florimond Brun, ACTeon, Grenoble; Patrice Cannavo, Agrocampus Ouest, campus d'Angers; Pascale Chenon, VoxGaia, Riedisheim; Ylang Chevaleraud, ACTeon, Grenoble; Anaïs Coulon, Plante & Cité, Angers; Samuel Coussy, Bureau de Recherches Géologiques et Minières, Orléans; Olivier Damas, Plante & Cité, Angers; Lucas Gossiaux, Valterra Dépollution Réhabilitation, Vandœuvre-lès-Nancy; Sophie Guimont, Valterra Dépollution Réhabilitation, Vandœuvre-lès-Nancy; Michel Legret, Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux, Nantes; Jean-Christophe Louvet, Groupe Luc Durand, Angers; Pierre-Emmanuel Peyneau, Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux, Nantes; Sarah Rokia, Université de Lorraine, Vandœuvre-lès-Nancy; Christophe Schwartz, Université de Lorraine, Vandœuvre-lès-Nancy; Geoffroy Séré, Université de Lorraine, Vandœuvre-lès-Nancy; Julien Subileau, Groupe Luc Durand, Angers; Laure Vidal-Beaudet, Agrocampus Ouest, campus d'Angers.

BIBLIOGRAPHIE

- Agence française de l'environnement (ADEME), 2015, Déchets : Chiffres-clés. Edition 2015. Collection Données et Référence, Ademe Editions, 96p.
- AFES, 2008, Référentiel pédologique. Editions Quae, 405p.
- Association française de normalisation (AFNOR), 2002, NF U44-551. Support de culture : dénomination, spécification, marquage, 36 p.
- Baize, D., 1997, Teneurs totales en éléments traces métalliques dans les sols (France). Références et stratégies d'interprétation. Programme ASPITET. Editions Quae, 408 p.
- Comité 21, 2012, La ville, nouvel écosystème du XXI^e siècle. Ville, réseaux, développement durable, Rapport 2011-2012 du Comité de prospective de Comité 21, le réseau des acteurs du développement durable [en ligne] URL : <http://www.comite21.org/docs/actualites-comite-21/2012/rapport-la-ville-nouvel-ecosysteme-du-21eme-siecle-06-04-12.pdf>. Consulté le 10 juillet 2015.
- Commission des Communautés Européennes, 2014, Catalogue Européen des Déchets (CED), publié en annexe de la décision de la Commission No 94/3/CEE du 20 Décembre 1993.
- Damas O. et A. Coulon, 2016, Créer des sols fertiles : du déchet à la végétalisation urbaine. Paris, Editions Le Moniteur, 335 p.
- Gis Sol, 2011, L'état des sols de France, Groupement d'intérêt scientifique sur les sols (GISS), 188 p.
- Micand, A., 2011, Référentiel de gestion écologique des espaces verts. Plante & Cité, Angers, 59 p.
- Rokia S., G. Séré, C. Schwartz, M. Deeb, F. Fournier, T. Nehls, O. Damas et L. Vidal-Beaudet, 2014, Modelling agronomic properties of Technosols constructed with urban wastes, *Waste Management*, 34 (11), pp. 2155-2162.
- United Nations, 2011, World population prospect. The 2010 revision. United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division, Volume I, New York, 503 p.
- Vidal-Beaudet, L., S. Rokia, T. Nehls et C. Schwartz, 2016, Interactions between aggregation and chemical reactivity in a constructed Technosol, *JOURNAL of soils AND sediments*, 18(2), pp. 456-466.
- Yilmaz D., P. Cannavo, G. Séré, L. Vidal-Beaudet, M. Legret, O. Damas et P.-E. Peyneau, 2016, Physical fertility of structural soils constructed with waste materials for urban greening, *JOURNAL of soils AND sediments*, 18(2), pp. 442-455.

NOTES

2. Olivier Damas et Anaïs Coulon, 2016, Créer des sols fertiles : du déchet à la végétalisation urbaine. Editions Le Moniteur, Paris.

RÉSUMÉS

Le programme national de recherche (SITERRE, 2011-16) financé par l'Agence française de l'environnement (ADEME) était dédié à la construction de sols avec des déchets urbains pour la végétalisation des villes, en alternative à la consommation de ressources naturelles (terre agricole et granulats de carrière). Les objectifs du programme étaient : (1) exprimer les propriétés optimales attendues des sols pour chaque type d'usage d'espaces végétalisés en termes de fertilité, de capacité de support et d'impacts environnementaux, (2) définir des indicateurs pertinents de la fertilité du sol et la qualité attendue pour les sols construits, (3) proposer des profils de conception de sols construits liés au type d'usages, (4) identifier et signaler les déchets susceptibles d'être adaptés à la construction du sol, (5) évaluer l'évolution des propriétés agronomiques du sol construit *in situ*, et (6) vérifier la sécurité des mélanges pour l'environnement et la santé des habitants. Les mélanges de déchets organiques et minéraux, conçus et testés pour construire des sols, sont efficaces pour développer des sols fertiles alternatifs avec des propriétés physico-chimiques appropriées pour la production de biomasse. Leur innocuité pour l'environnement et la santé humaine a été vérifiée. Le développement de l'horticulture urbaine passe par la sensibilisation des aménageurs aux spécifications optimales attendues pour les sols urbains et à la façon d'établir une gestion durable de ces sols. La construction de Technosols fertiles proposée par le programme SITERRE doit suivre un protocole précis et fait appel à des expertises. Les résultats du travail, publiés dans un livre (Damas et Coulon, 2016) devraient aider à développer un outil d'aide à la décision pour les gestionnaires de paysage urbain.

The national research program (SITERRE, 2011-16) funded by the French Environmental Agency (ADEME) was dedicated to the construction of soils with urban wastes for city greening, as an alternative to the consumption of natural resources (agricultural earth and quarry stones). The objectives of the program were to : (1) express the expected properties of soils that could fulfil optimally the main green area land-uses in terms of fertility, bearing capacity and environmental impacts, (2) define relevant indicators of the soil fertility and the expected quality for constructed soils, (3) propose constructed soil design profiles linked with land-uses, (4) identify and report the wastes that may be suitable for soil construction, (5) evaluate soil agronomic properties evolution under *in situ* conditions, and (6) check the safety of the mixtures for the environment and the health of the inhabitants. The organic and mineral waste mixtures designed and tested to follow constructed soil during the SITERRE project, are efficient to develop alternative fertile soils with relevant physico-chemical properties ensuring root development. Their safety for the environment and human health has been verified. To develop urban horticulture, it is essential to educate all the city makers about optimal soil specifications expected for urban soils and how to establish sustainable soil management. The Technosols construction proposed by the SITERRE program must follow a precise protocol and call on expert appraisals to provide fertile soils. The results of the work, published in a book (Damas and Coulon, 2016) should now help to develop an efficient decision support system for urban landscape managers.

INDEX

Keywords : urban soil, urban metabolism, waste, fertile soil, soil construction sector

Mots-clés : sol urbain, métabolisme urbain, déchets, sol fertile, filière construction de sol

AUTEUR

LAURE VIDAL-BEAUDET

Enseignant-chercheur, pour le consortium SITERRE Plante et Cité (Pilotage), Acteon, Agrocampus Ouest, BRGM, IFSTTAR, Université de Lorraine-INRA-GISFI, Groupe Luc Durand, RITTMO, VALTERRA, VoxGaia. Agrocampus-Ouest Campus d'Angers, France, courriel : laure.beaudet@agrocampus-ouest.fr