



BIODIVERSITE ET FONCTIONNEMENT D'UN TECHNOSOL CONSTRUIT UTILISE DANS LA RESTAURATION DE FRICHES INDUSTRIELLES (BIOTECHNOSOL)

BIODIVERSITY AND FUNCTIONING OF A CONSTRUCTED TECHNOSOL USED FOR THE RESTORATION OF INDUSTRIAL AREAS

Coordination : Jérôme CORTET

Laboratoire Sols et Environnement, UMR Université de Lorraine/INRA 1120
2, avenue de la forêt de Haye - TSA 40602 - 54518 Vandoeuvre-lès-Nancy
Jerome.cortet@univ-montp3.fr

Synthèse du rapport final *Juillet 2013*

Ont contribué à la rédaction de ce rapport :
T. BEGUIRISTAIN, A-M. CHARISSOU, M. HEDDE, F. MARTIN-LAURENT,
J.F. MASFARAUD, D. PIRON, C. SCHWARTZ, G. SERE, C. VILLENAVE, F.
WATTEAU

Numéro de contrat Ministère/ADEME : CON - année 2009 - n° S.6 – 0006653

1 CONTEXTE GENERAL

La dégradation des sols par des activités urbaines ou industrielles entraîne souvent un défaut à remplir la fonction de support de végétation (Burelle *et al.*, 2005) et se traduit par des risques de transferts de polluants (Morel *et al.*, 1999). Ainsi, la réhabilitation durable des sols dégradés devrait passer par leur végétalisation (Tordoff *et al.*, 2000). Restaurer la fertilité d'un sol dégradé nécessite d'améliorer ses propriétés physiques, chimiques et biologiques afin de favoriser l'implantation et le maintien de la végétation à court, moyen et long terme (Barnishel et Hower, 1997; Bacholle *et al.*, 2006). Cet objectif est généralement rempli par le remplacement des sols pollués par des sols naturels prélevés sur un autre site, ce qui implique au final une perte considérable d'énergie (déplacements de sols) et de matériaux (les sols pollués ne sont pas recyclés et des sites naturels sont dégradés)

Il est postulé ici que le même objectif de restauration peut être atteint par l'utilisation de déchets ou sous-produits industriels, qui sont pour une part importants constitués de matières organiques. Ceux-ci sont souvent utilisés comme fertilisants en agriculture, mais leur emploi reste récent en requalification et en construction de sols (Dinger *et al.*, 1999). Pour ce faire, un procédé de construction de sol a été développé au LSE en partenariat avec le Groupe TVD (Séré *et al.*, 2008). Ce Technosol est constitué de déchets et sous-produits industriels (terres thermiquement désorbées) et papetiers (boues), qui sont ainsi valorisés par une autre filière que l'épandage agricole et en préservant la ressource en sols agricoles (limitation de l'excavation de terres agricoles pour la requalification des sols industriels). Les travaux sur ce Technosol ont essentiellement porté sur l'évolution physico-chimique du profil permettant de dresser des scénarios d'évolution à long terme à partir de mesures faites aux stades précoces de la pédogenèse.

2 OBJECTIFS GENERAUX DU PROJET

Dans le cadre du GISFI (Groupement d'Intérêt Scientifique sur les Friches Industrielles), et avec le concours financier de l'ADEME et du groupe TVD, une expérimentation pilote de grande échelle (parcelle de 1ha) a été mise en place en septembre 2007, sur la friche industrielle de l'ancienne cokerie d'Homécourt (54). L'un des objectifs majeurs est de pouvoir suivre l'évolution de ce Technosol sur une période au minimum décennale.

Le questionnement principal du projet BIOTECHNOSOL, financé par GESSOL, porte spécifiquement sur volet biologique ; Il vise à comprendre la place et le rôle des organismes dans ce type de sol. Cette approche est originale, car à notre connaissance, très peu d'études ont concerné ce type de Technosols. Elle est essentielle puisque les organismes participent au fonctionnement des sols et à leur évolution.

Le projet vise donc à comprendre :

1. la dynamique des relations entre la biodiversité et le fonctionnement au sein de ce Technosol,
2. les effets des organismes sur la pédogénèse de ce Technosol, particulièrement durant les premières années suivant sa mise en place.

L'objectif de ce projet est ainsi **d'évaluer la dynamique de colonisation de ce milieu par les principaux groupes biologiques (microflore, microfaune, mésofaune et macrofaune) et leur impact fonctionnel (biostructures, respirométrie, décomposition et croissance végétale).**

Pour ce faire différentes composantes du sol ont été identifiées et étudiées grâce à la mise en place d'un groupe d'experts constitué d'écologistes du sol spécialistes de différents groupes biologiques (bactéries et mycorhizes, nématodes, microarthropodes, macroarthropodes, lombriciens), d'agronomes, et de bio-physiciens du sol.

3 QUELQUES ELEMENTS DE METHODOLOGIE (ET EVENTUELLES DIFFICULTES RENCONTREES)

Le site concerné est une ancienne cokerie localisée sur la commune d'Homécourt (54) et plus particulièrement une parcelle de 1,1 hectares. Ce site est situé au nord-ouest de Metz, à une vingtaine de kilomètres, dans la vallée de l'Orne. La friche industrielle résulte de la cessation d'activité d'un complexe sidérurgique qui comprend l'usine, la cokerie et le crassier.

Après 4 années de développement, le groupe TVD, en collaboration avec le GISFI a souhaité concrétiser ses travaux sur la construction de sol par la mise en place de parcelles de sols construits (Figure 1). Afin de répondre aux problématiques propres aux sols de la zone étudiée et de valoriser un déchet présent sur site (la terre industrielle traitée), les modalités suivantes ont été appliquées.

La parcelle « éponge végétale » est un profil de sol construit avec une réserve en eau pour les végétaux (Figure 2). En effet, il est constitué de compost (0,10 m) comme horizon de croissance, de mélange de sous-produit papetier / terre industrielle traitée (1,0 m) comme horizon de développement et enfin d'un horizon hydrique de sous-produit papetier pur (0,40 m). Cette formulation se base sur les remarquables propriétés de rétention d'eau des sous-produits papetiers. Ce profil est adapté aux substrats filtrants (sables, formations karstiques par exemple).

La parcelle « confinement » est un profil de sol construit avec une option « confinement » (Figure 2). Il est constitué de compost (0,10 m) comme horizon de croissance, de mélange de sous-produit papetier / terre industrielle traitée (1,0 m) comme horizon de développement et enfin d'un horizon de confinement de sous-produit papetier chaulé (5% en volume) et compacté (0,35 m). Cette formulation permet de limiter les transferts d'eau vers les aquifères via les substrats en place présentant éventuellement des pollutions résiduelles.

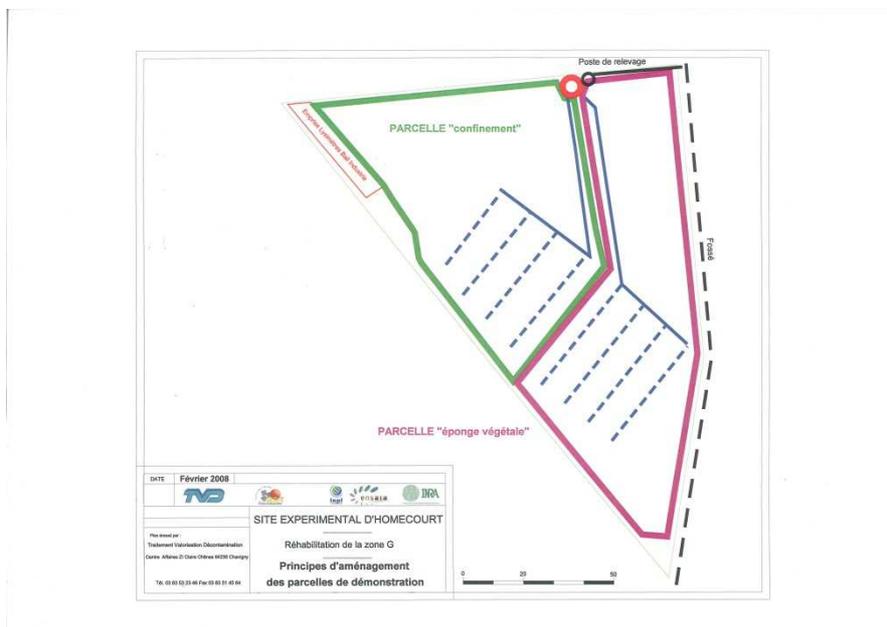


Figure 1 : plan de la parcelle avec ses 2 modalités de Technosol construit

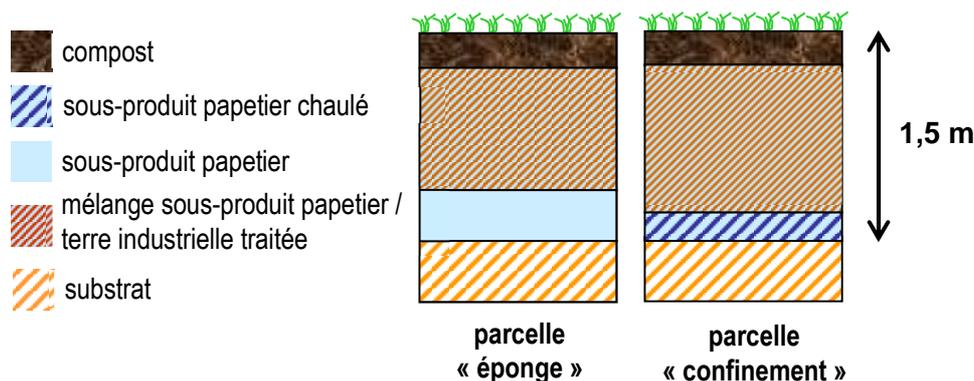


Figure 2. Profils de sols construits

La stratégie d'échantillonnage a été conçue lors des prélèvements initiaux effectués en 2008, juste après la mise en place de la parcelle, de façon à être représentative de l'ensemble des deux modalités (confinement et éponge végétale), mais également de façon à éviter de ré-échantillonner exactement au même endroit tous les ans. Elle consiste à établir une maille sur laquelle un échantillonnage systématique est effectué (Figure 3). Ainsi la parcelle est découpée en 24 zones de 20m x 20m. Chaque zone est redécoupée en carrés de 5m de côté. Chaque carré peut ensuite être fractionné en 25 unités élémentaires de 1 m² chacune. Cette maille est conçue pour permettre de relier statistiquement les paramètres très facilement les uns avec les autres, mais elle tient également compte des spécificités de chaque paramètre étudié.

Pour la plupart des paramètres, l'échantillonnage a été réalisé chaque printemps. Tous les paramètres évalués ont été prélevés au maximum conjointement, sauf pour ceux exigeant un suivi particulier (respirométrie, décomposition de la matière organique) ou une saison spécifique (biomasse végétale).

Par ailleurs, afin de suivre l'évolution des profils, il a été procédé à l'ouverture et la description de trois fosses pédologiques par parcelle le 28 avril 2010.

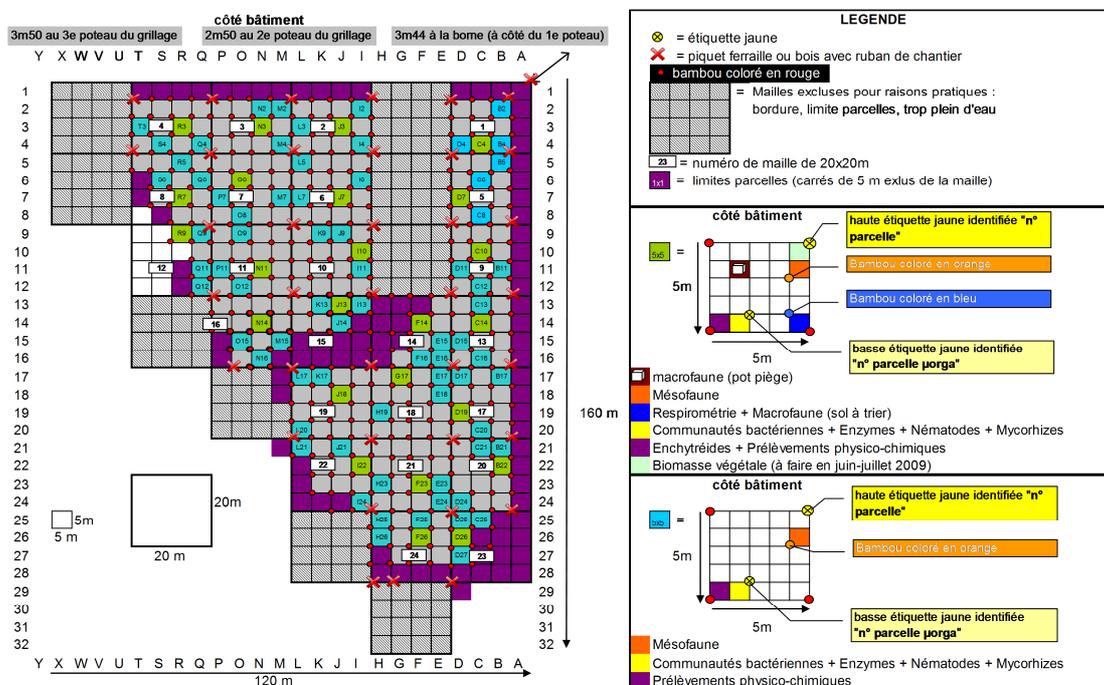


Figure 3 : Maille d'échantillonnage mise en place sur le site (violet ou hachuré : zones non échantillonnables ; gris : zones d'échantillonnage ; vert et bleu : zones prévues pour l'échantillonnage de 2009)

Trois types de paramètres ont été suivis :

- paramètres physico-chimique du sol :
 - o agronomiques, comprenant la texture, l'azote total, le carbone organique, le phosphore assimilable (méthode Olsen), le pH, le calcaire total,
 - o Polluants métalliques (Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Se, Zn) et organiques (16 HAP),
- Paramètres biologiques :
 - o Communautés bactériennes pour caractériser leur niveau de complexité mais également pour évaluer leur niveau d'activité dans l'horizon de surface. Cette étude a ensuite été poursuivie par une analyse détaillée de l'abondance et de l'activité de communautés microbiennes impliquées dans le cycle de l'azote en considérant non plus seulement l'horizon de surface mais le profil des deux Technosols du GISFI. Enfin la résistance et la résilience des communautés microbiennes dénitrifiantes des Technosols du GISFI ont été évaluées par comparaison à des sols de référence,
 - o Communautés de champignons mycorhiziens pour caractériser la fréquence de colonisation racinaire et la structure des communautés,
 - o Activités enzymatiques. Le choix s'est porté sur la mesure de l'hydrolyse de la fluorescéine di-acétate ou FDA (Schnürer et Rosswall, 1982) qui présente l'avantage de concerner plusieurs groupes d'enzymes différentes (lipases, protéases, estérases),
 - o Densités et structure des communautés de nématodes, à la fois en surface et le long de profils de sols,
 - o Abondance et structure des communautés de microarthropodes,
 - o Abondance et structure de la macrofaune épigée et endogée
 - o Abondance et structure des communautés de lombriciens
- Paramètres fonctionnels :
 - o Associations organo-minérales et biostructures
 - o Visualisation de bioturbations le long de profil de sols
 - o Respirométrie en surface
 - o Biomasse végétale produite sur le site
 - o Dynamique de décomposition de la matière organique (méthode des sacs de litière)

4 RESULTATS OBTENUS

Une masse considérable de données a pu être acquise lors de ce projet, sur l'état de sols jeunes et originaux jusqu'alors peu renseignés : les Technosols construits (Figure 4). Ce point est essentiel et, à lui seul, permet de considérer Biotechnsol comme une mine de renseignements qui sera très utile dans les années futures. En effet tous les paramètres qui devaient être échantillonnés dans le projet initial ont été mis en œuvre, aussi bien sur les organismes que sur le plan fonctionnel ou physico-chimique.

Tous ces paramètres ont été intégrés dans une base de données (actuellement sous Excel hébergée au Laboratoire Sols et Environnement). Cette base de données a permis d'effectuer des croisements entre paramètres échantillonnés afin de définir des corrélations.

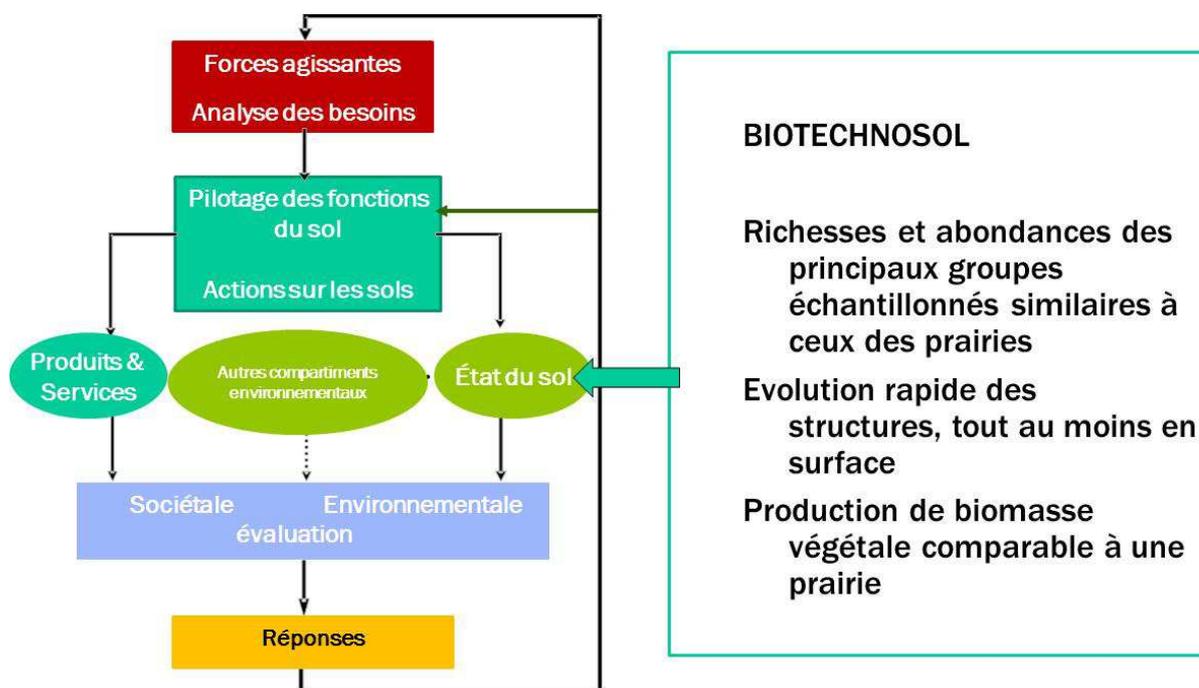


Figure 4 : Positionnement scientifique du projet et bilan des résultats acquis lors du projet Biotechnsol (modifié d'après le comité GESSOL)

Au regard des résultats acquis un certain nombre de points méritent d'être soulignés.

4.1 Des systèmes jeunes et dynamiques susceptibles d'évoluer

- Au niveau agronomique, une évolution rapide de la texture est constatée en surface, avec une diminution des particules fines et une augmentation des sables grossiers. On observe également une augmentation au cours du temps des éléments grossiers. Par ailleurs une décroissance faible et irrégulière des concentrations en carbone organique, azote total et phosphore disponible, est notée. Ces décroissances sont probablement liées à l'installation du couvert végétal, mais les résultats acquis en 2010 et 2011 montrent une certaine stabilisation, ce qui pourrait indiquer un renouvellement de ces ressources. Les deux Technosols sont fortement carbonatés, ce qui leur confère un pH élevé.
- Les organismes échantillonnés montrent une dynamique de colonisation des Technosols très variable en fonction des groupes (Figure 5). Si les nématodes et la macrofaune tend à se diversifier au cours du temps, avec l'apparition de nouveaux groupes trophiques et de nouvelles catégories écologiques, les microarthropodes ont tendance à montrer une

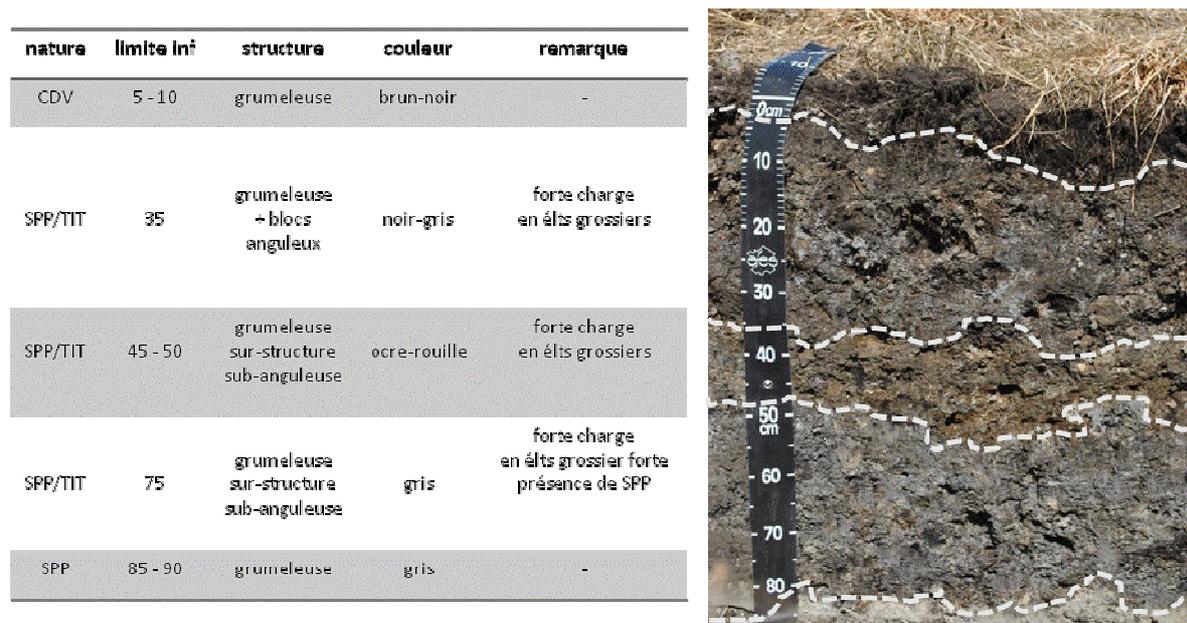


Figure 6. Profil de Technosol construit, modalité « éponge végétale ». De nouveaux horizons apparaissent au cours de la pédogénèse

4.2 Des systèmes qui remplissent les mêmes fonctions que les sols naturels

- Concernant les polluants dans les sols, les mesures effectuées permettent de conclure à une innocuité des Technosols, dans la limite des connaissances actuelles sur le sujet.
- Globalement, l'étude des communautés montre que les Technosols présentent de fortes similitudes avec les sols naturels. Ainsi les abondances des communautés microbiennes ou de microarthropodes apparaissent similaires à celles de milieux naturels. Les mycorhizes, même s'ils évoluent au cours du temps, sont relativement abondants. La colonisation progressive par la macrofaune tend également à montrer une installation de taxons communément rencontrés sur les systèmes prairiaux, avec des abondances élevées.
- D'un point de vue fonctionnel, le système permet de remplir les fonctions essentielles. Ainsi, le recyclage des matières organiques est assuré, avec des dynamiques de décomposition de la matière organique conformes aux sols agricoles. Par ailleurs le développement de biomasses végétales aériennes et racinaires est comparable à celui observées en prairies dans la région (Figure 7).

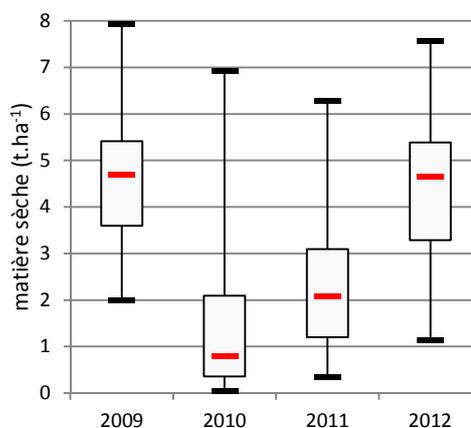


Figure 7 : Rendements en biomasse moyens annuels pour les deux modalités de construction de sols confondus. Les biomasses produites sont comparables à des systèmes de prairies lorraines

4.3 Des systèmes originaux et diversifiés

- Dans le détail, la structure des communautés révèle des particularités propres aux Technosols. Ainsi, contrairement aux sols naturels, ce sont les bactéries et non les Crénarchées qui semblent contrôler le cycle de l'azote sur les Technosols. Par ailleurs si les abondances de macrofaune et microarthropodes atteignent des niveaux comparables aux sols naturels, la composition des communautés en est distincte, avec encore globalement peu d'espèces. Mais la jeunesse du système pourrait expliquer ces résultats.
- Des différences apparaissent entre les deux modalités de Technosols, suggérant une évolution future distincte. Ainsi, les profils pédologiques apparaissent très différents, notamment à cause de leurs capacités différenciées à retenir l'eau. On constate d'ailleurs un développement de la biomasse végétale et des dégagements de CO₂ plus important dans la partie « confinement », qui retient mieux l'eau, par rapport à la modalité « éponge végétale ». Un phénomène d'hydromorphie dans la modalité « confinement » semble également limiter l'installation de certaines espèces de lombriciens (Figure 8), et ainsi limiter l'activité de bioturbation des lombriciens, ce qui pourrait impliquer des différences plus marquées dans le futur, étant donné que la présence de ce groupe est surtout remarquée à compter de 2011, la dernière année étudiée pour ce paramètre. La pédogénèse pourrait ainsi être plus rapide dans la modalité « éponge végétale » comparativement à la modalité « confinement ». Toutefois, à ce stade, les groupes d'organismes échantillonnés vivant principalement en surface (bactéries, nématodes, microarthropodes) ne montrent pas de différences d'abondance marquées entre les deux modalités.

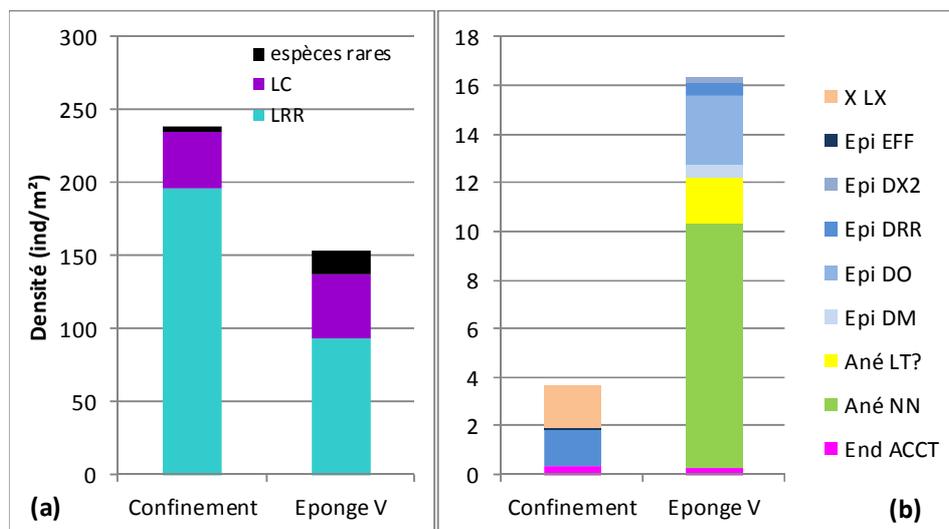


Figure 8 : Abondances des espèces lombriciennes dominantes (a) et des taxons rares (b) au sein des deux Technosols. On distingue une plus grande diversité d'espèces dans la modalité « Eponge végétale »

5 IMPLICATIONS PRATIQUES, RECOMMANDATIONS, REALISATIONS PRATIQUES, VALORISATION

5.1 Implications pratiques :

Les implications pratiques concernent la restauration des sites pollués. Ce travail permet de valider les efforts d'ingénierie environnementale mis en œuvre. Il confirme que les bases de la pédologie et des sciences des sols peuvent être mis au service de projets structurants pour la collectivité.

5.2 Recommandations :

Le projet de recherche BIOTECHNOSOL a eu pour principal objectif d'évaluer la dynamique de colonisation d'un Technosol construit par les principaux groupes biologiques (microflore, microfaune, mésofaune et macrofaune) et leur impact fonctionnel (biostructures, respirométrie, décomposition et croissance végétale). La connaissance du fonctionnement et de l'évolution d'un écosystème nouveau, initié à partir de son compartiment sol, apporte alors un éclairage sur les principes de gestion des sites dégradés. Il a en effet été démontré que les Technosols construits sont des systèmes jeunes et dynamiques, présentant des potentialités fortes d'évolution. Ces sols remplissent les mêmes fonctions de filtre et d'échange, de support de végétation et plus généralement de support de biodiversité que les sols naturels. Le génie pédologique permet ainsi d'amorcer la refunctionalisation écologique de sites dégradés et de créer les conditions pour la réalisation de services écosystémiques (de soutien aux conditions favorables à la vie, d'approvisionnement, de régulation et d'aménités) attendus par les gestionnaires et utilisateurs de ces sites. Les résultats du projet apportent ainsi un éclairage, du point de vue des sols, du concept de développement durable des délaissés péri-urbains, urbains et industriels.

Après avoir présenté les différentes approches de réhabilitation de sites et sols dégradés envisageables actuellement, nous clarifierons leur cadre réglementaire actuel. Nous déclinerons ensuite les apports du projet Biotechnosol en termes d'éclairage scientifique de la décision publique, de proposition d'ingénierie de mis en œuvre et de suivi de réhabilitation de sites. L'accent sera également mis sur la démonstration de faisabilité, en vraie grandeur, de la refunctionalisation écologique d'un site dégradé par la mise en œuvre du génie pédologique sous la forme de construction de sols à partir de déchets et produits dérivés. Enfin des perspectives seront décrites en montrant la convergence de Biotechnosol et d'autres projets menés actuellement vers le développement de filières intégrées de gestion de sites dégradés.

5.2.1 Les différentes approches pour la réhabilitation d'écosystèmes dégradés

Les trois approches de réhabilitation décrites ci-dessous se distinguent d'opérations de restauration écologique qui visent à recréer un site dégradé à l'identique de l'écosystème d'origine. L'objectif est dans ce cas d'implanter un nouvel écosystème, différent en termes de structure et de fonction de l'original.

La démarche classiquement mise en œuvre pour assurer des opérations de réhabilitation de sites dégradés (e.g. friche industrielle) consiste à recourir à des matériaux naturels - terre végétale, tourbe - ou des produits - fertilisants, mulch -. Bien souvent, ces matériaux sont appliqués en couche de faible épaisseur (10 – 30 cm) pour le développement de strates herbacées, voire en fosses de plantations pour l'installation d'arbres. Ces approches ont un coût économique considérable, et leur mise en œuvre présente un impact environnemental significatif relatif à la consommation de ressources non renouvelables à laquelle s'ajoute également un transport de matériaux sur de longues distances.

Des pratiques d'amendement par des produits organiques résiduels au sol en place se sont développées comme alternative à l'utilisation massive de ressources naturelles. Regroupées sous le vocable de « reconstitution de sol », elles sont souvent basées sur l'incorporation, en une seule fois, d'une quantité importante (2 à 3 fois les doses mises en œuvre en agriculture) de résidus organiques au sol dégradé. Ce type d'opération est largement basé sur l'utilisation de sous-produits organiques tels les composts, les boues urbaines ou industrielles. Il est ainsi possible d'améliorer la structure du

sol en lui redonnant par exemple une aération correcte, sa fertilité en apportant des matières organiques et des nutriments, et de favoriser l'activité biologique.

Pour sa part, la construction de sol proposée par Biotechnsol est basée sur la création d'un nouveau sol assurant un niveau de fonctionnalité élevé (support de végétation, cycle de l'eau et des nutriments, habitat biologique) et permettant d'envisager la réalisation de services écosystémiques. Ce procédé du génie pédologique repose sur l'utilisation de sous-produits aussi bien organiques que minéraux (composts, boues urbaines ou industrielles, cendres d'incinération, terres dépolluées, matériaux de démolition). Il s'agit alors d'associer et de mélanger les matériaux entre eux afin de construire un sol structuré en couches ou horizons fonctionnels, base du développement d'une nouvelle activité biologique des sols.

5.2.2 Encadrement réglementaire des pratiques de réhabilitation

L'absence de cadre réglementaire rénové est un verrou à la requalification de sites dégradés par des procédés du génie pédologique mettant en œuvre des déchets et sous-produits, voire des terres « naturelles ». Les pratiques de valorisation de matériaux terreux « naturels » (e.g. terres de déblais de chantiers, terres excavées) ne font en effet l'objet d'aucune réglementation spécifique, l'utilisation de ces ressources n'étant pas contrainte par la Loi. Ces filières sont, le cas échéant, seulement contrôlées par la DREAL, administration en charge de la mise en sécurité sanitaire et environnementale du site, dans le cas d'une contamination préalable avérée. Les modalités de mise en œuvre sont souvent discutées, voire gérées par l'aménageur. L'utilisation de déchets et sous-produits est pour sa part inscrite dans le cadre de l'article 17 du décret 97-1133 : « *Lorsqu'ils sont destinés à la reconstitution ou la revégétalisation des sols, les épandages doivent être adaptés en quantité et en qualité à la reconstitution d'un couvert végétal ou des propriétés physiques de sols, compte tenu des autres apports de substances épandues sur les sols. L'épandage de boues est interdit sur le site d'anciennes carrières. ... Un arrêté conjoint des ministres chargés de l'Environnement, de l'Agriculture et de la Santé fixe les règles et prescriptions techniques et les caractéristiques de produits permettant de répondre aux exigences de l'alinéa précédent.* ». Cet article prévoit que l'usage des boues en revégétalisation et reconstitution de sols soit possible. Les règles et prescriptions techniques n'étant toujours pas fixées, il est encore à ce jour impossible d'utiliser cette filière.

Le Ministère du développement durable, le BRGM et l'INERIS ont rédigé un guide paru le 19 avril 2012, exposant les règles de l'art et les modalités sous lesquelles certaines terres excavées (et dépolluées) peuvent être réutilisées dans une optique de développement durable, de protection des populations et de l'environnement. Les valorisations envisagées, selon des modalités précisément décrites, sont :

- i) la réutilisation en technique routière ;
- ii) l'usage dans des projets d'aménagement :
 - a. sous bâtiment au niveau des bureaux, des locaux commerciaux et industriels,
 - b. sous couverture de terre végétale (sic !) pour des aménagements paysagers, sous des revêtements de type parkings, chaussées,... dans le cadre de projets d'aménagements urbains.

Il est ainsi explicitement exclu que ces matériaux terreux faiblement contaminés ou dépollués soient utilisés en surface. Néanmoins, ce guide ébauche les modalités d'une utilisation de certains des matériaux parents utilisés en construction de sol

Enfin, à notre connaissance, aucune procédure nationale n'évoque l'utilisation possible d'autres matériaux, assimilables à des déchets inertes, en aménagement paysager. Ainsi, l'encadrement réglementaire de pratiques de reconstitution ou de construction de sol en réhabilitation de sites dégradés n'est-il géré qu'en local par la DREAL, au cas par cas. En particulier, c'est la législation des installations classées, en raison du transit et de la valorisation de déchets non dangereux non inertes (i.e. sous-produits organiques) qui s'applique. Les projets doivent par conséquent faire l'objet d'une demande d'autorisation provisoire en vertu de la rubrique ICPE 2791-2 (Installation de traitement de déchets non dangereux à l'exclusion des installations visées aux rubriques 2720, 2760, 2771, 2780, 2781 et 2782).

5.2.3 Contribution du projet Biotechnsol à l'aide à la décision publique

Les résultats du projet Biotechnsol apportent avant tout un éclairage scientifique pour aider à la décision publique. Le fonctionnement et l'évolution d'un écosystème construit à partir du compartiment Technosol sont décrits pour une large gamme de groupes fonctionnels des organismes vivants du sol et les implications en termes de dynamique du fonctionnement biologique du sol sont quantifiées. Ces fondements expérimentaux sont une base essentielle pour apporter de la crédibilité scientifique à la filière de gestion envisagée. Au-delà, les résultats scientifiques illustrent la capacité d'un écosystème entièrement construit avec des déchets à assurer la réhabilitation d'une friche industrielle. Les sorties de Biotechnsol sont alors également de l'ordre de la proposition d'ingénierie de mise en œuvre et de suivi de réhabilitation de sites. Une démonstration de faisabilité de la refunctionalisation écologique d'un site dégradé est faite, en vraie grandeur à l'échelle de l'hectare et en conditions climatiques réelles. La mise en œuvre du génie pédologique sous la forme de construction de sols à partir de déchets et produits dérivés est dimensionnée dans sa phase chantier et répond à des attentes des décideurs, des opérateurs et des usagers du site. Le projet Biotechnsol a ainsi démontré la pertinence économique et environnementale de cette approche. En effet, les phases d'approvisionnement et de chantier ont pu être financées dans une très large mesure par les revenus issus de la valorisation des sous-produits papetiers qui ont été valorisés. En effet, le producteur du déchet, en l'occurrence les papetiers lorrains, ont contribué très significativement au financement par l'intermédiaire du recyclage des boues pour un montant identique à celui de l'épandage en agriculture. De plus, les terres industrielles traitées et valorisées *in situ* en construction de sol (8000 t) n'ont pas nécessité de transport et n'ont pas fait l'objet d'une transaction financière. Ainsi, en réduisant le transport des matières premières et en contribuant au recyclage de déchets dont les voies de recyclage en France tendent vers la saturation, la filière proposée par Biotechnsol a un impact environnemental positif.

5.2.4 Perspectives de développement ultérieur

Les résultats de Biotechnsol vont pouvoir être agrégés à des résultats de programmes de recherche en cours afin de proposer des solutions intégrées de gestion de site et sols dégradés. Deux exemples sont décrits plus précisément (GISFI AME Région Lorraine – LORVER ; ADEME-SITERRE) afin de montrer les complémentarités des approches envisagées. Un enjeu fort et commun à ces différents projets est d'éclairer scientifiquement la décision publique tout en faisant la démonstration de la faisabilité de la construction de Technosols pour la requalification de sites dégradés et/ou la végétalisation de territoires urbains et industriels.

Le projet LORVER (Agence de Mobilisation Economique de Lorraine)

LORVER est un projet destiné à créer une filière de production de biomasse végétale à usage industriel à partir de sites et matériaux délaissés (e.g. friches industrielles à faible pression foncière, matériaux et sous-produits industriels et urbains). Il s'appuie en particulier sur une approche de construction de sol pour assurer la requalification de sites dégradés. La biomasse produite sera valorisée pour la production d'énergie, de matériaux fibreux. Le projet prévoit notamment une démarche poussée d'Analyse du Cycle de Vie du procédé.

Le projet SITERRE (ADEME)

Le projet de recherche SITERRE (Procédé de construction de Sols à partir de matériaux Innovants en substitution à la TERRE végétale et aux granulats de carrière) a débuté début 2011 avec le soutien financier de l'ADEME afin de trouver des substituts aux plus de 3 millions de m³ de terre végétale et de granulats utilisés annuellement en aménagement paysager urbain. Les recherches s'attacheront à valoriser des sous-produits de l'activité urbaine (e.g. compost, boue de STEP, déchets de briques) pour construire des sols pérennes, support des différents types d'espaces verts en ville. Le projet prévoit en particulier une évaluation avancée de l'acceptation sociale de ces pratiques en mesurant le bilan environnemental, ainsi que la conception d'un outil d'aide à la décision.

5.3 Réalisations pratiques et valorisation :

La parcelle mise en place en 2007 reste aujourd'hui un système ouvert à la recherche, et a pour vocation d'accueillir, au sein du GISFI, des projets de recherches. Il serait d'ailleurs sans doute souhaitable de poursuivre les travaux engagés lors du projet Biotechnsol, pour évaluer le devenir du site sur le long terme.

Quoi qu'il en soit la parcelle constitue un excellent site de démonstration, et a été utilisé comme tel à plusieurs reprises.

A ce jour, plusieurs dizaines de chercheurs, au niveau national et international ont eu la possibilité de le visiter. Citons pour l'exemple l'école chercheurs « Dynamique et Impacts à long terme des contaminants dans les écosystèmes continentaux » du 8 au 12 juin 2009, ou le congrès « Ecotrons and Lysimeters: key tools for studying terrestrial ecosystem responses to global change, to pollutants, and the ecological engineering », ayant eu lieu à Nancy du 29 au 31 mars 2010.

Par ailleurs, le site est utilisé comme support pédagogique chaque année par le corps enseignant de l'Université de Lorraine (par exemple : module gestion des sites dégradés de la formation d'ingénieurs ENSAIA spécialisation Sciences et Génie de l'Environnement).

5.4 Partenariats mis en place, projetés, envisagés

Le projet Biotechnsol a permis de mettre en place un consortium de chercheurs qui ont pu partager leur expérience. Il constitue une des bases de collaborations actuelles sur d'autres projets (par exemple le projet BETSI (Biological and Ecological Traits of Soil Invertebrates), coordonné par Mickael Hedde. Par ailleurs, un consortium a été mis en place avec des spécialistes des sciences du sol, mais également des économistes et sociologues, afin de répondre à différents appel d'offre (Projet « Terra nova » soumis à l'ANR Agrobiosphère ou à l'appel d'offre ADEME GESIPOL).

6 LISTE DES OPERATIONS DE VALORISATION ET DE TRANSFERT ISSUES DU CONTRAT (ARTICLES DE VALORISATION, PARTICIPATIONS A DES COLLOQUES, ENSEIGNEMENT ET FORMATION, COMMUNICATION, EXPERTISES...)

PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES	
Publications scientifiques parues	<p>Hafeez F., Martin-Laurent F., Beguet J., Bru D., Cortet J., Schwartz C., Morel J.L., Philippot L. 2012. Taxonomic and functional characterization of microbial communities in constructed Technosols. <i>J. Soil & Sediments</i>, 12 :1396-1406.</p> <p>Hafeez F., Spor A., Breuil M.C., Schwartz C., Martin-Laurent F., Philippot L. 2012. Distribution of bacteria and nitrogen-cycling microbial communities along constructed Technosol depth-profiles. <i>J. Hazardous Materials</i>, 231: 88-97.</p> <p>Jangorzo N.S., Watteau F. and Schwartz C., 2013. Evolution of the pore structure of Technosols during early pedogenesis quantified by image analysis. <i>Geoderma</i>, 207-208, 180-192</p>
Publications scientifiques à paraître	<p>Jangorzo N.S., Schwartz C. and Watteau F., 2013. Image analysis of soil thin sections for a non-destructive quantification of aggregation in the early stages of pedogenesis . <i>Accepté EJSS</i></p> <p>Hafeez F, Spor A, Philippot L, Martin-Laurent F. 2013. Assessment of the resilience and resistance of remediated soils using denitrification as model process <i>J. Soil & Sediments</i></p>
Publications scientifiques prévues	
COLLOQUES	
Participations passées à des colloques	<p>Cortet J., Béguiristain T., Charissou A.M., Cluzeau D., Hedde M., Leyval C., Masfaraud J.F., Martin-Laurent F., Morel J.M., Nahmani J., Pey B., Rougé L., Schwartz C., Séré G., Villenave C., Watteau F. 2010. The BIOTECHNOSOL project: Biological dynamics and functioning of a constructed Technosol at the field scale. 1st-6th august, Brisbane, Australia.</p> <p>Hedde M., Lamy I., Cortet J., Nahmani J. 2010. Les traits biologiques des Invertébrés : un outil pour l'évaluation de la restauration des sols ? Colloque de la SEFA, 31 mars-1^{er} avril, Versailles</p> <p>Hedde M., Lamy I., Cortet J., Nahmani J. 2010. Soil macrofauna biological traits to monitor soil restoration. SETAC, 23-27 May, Sevilla.</p> <p>Schwartz C., Séré G., Cortet J., Watteau F., Ouvrard S., Leguedois S. et Morel J.L, 2011. Le génie pédologique au service d'une refonctionnalisation écologique d'espaces urbains dégradés. 6^{èmes} Rencontres du Végétal, 10-11 janvier, Angers.</p> <p>Villenave, C., Coll P., Cortet J. 2010. Colonisation of a constructed Technosol by nematodes at the field scale in three years. <i>European Society of Nematology</i>, 19-23 sept. Vienna.</p> <p>Salifou N., Séré G., Watteau F., Casel V., Cortet J. and Schwartz C., 2012. Evolution of the poral structure of a constructed Technosol during its early pedogenesis. <i>EGU Vienne 2012, SSS1</i>.</p> <p>Hafeez F., Martin-Laurent F., Spor A., Schwartz C.,</p>

<p>Participations futures à des colloques</p>	<p>Philippot L. 2012. Technosols to reclaim industrial wastelands: depth distribution of abundance and activity of N-cycling microbial communities. Eurosoil 2012, Bari, Italie, 2-6 juillet 2012 (poster, résumé).</p> <p>Pey B, Cortet J, Watteau F, Cheynier K, Schwartz C., 2012. Effects of two earthworms from two ecological groups on organic matter dynamics of a constructed Technosol. XVI International colloquium of soil zoology, Coimbra, 2012. Poster session soil biodiversity and monitoring.</p> <p>Jangorzo N.S., Séré G., Watteau F., Casel V., Cortet J., Schwartz C., 2012. Image analysis of soil thin sections to predict the evolution of a constructed Technosol's structure: quantification of descriptors of porosity and aggregation. "Soil micromorphology: a journey from soils genesis to new interdisciplinary advancements". Eurosoil, Session S9.1, 2-6 juillet 2012, Bari, Italie. Poster.</p> <p>Watteau F., Villemin G., Begin JC, Séré G. Cortet J., 2012. Impact of biological activity on soil structure by the combined analysis of soil thin sections and 0-20 µm soil fractions. Eurosoil, Session S9.3. Soil micromorphology, 2-6 juillet 2012, Bari, Italie. Communication orale.</p> <p>Farhan Hafeez, Fabrice Martin-Laurent, Jérémie Béguet, David Bru, Jérôme Cortet, Christophe Schwartz, Jean-Louis Morel and Laurent Philippot. 2013. Structure and abundance of microbial communities in Technosols constructed for the restoration of an industrial wasteland. Suitma 2013, Torun, Poland, 16-20 septembre 2013 (communication orale, résumé).</p> <p>Cortet J., Béguiristain T., Charissou A.M., Chenot E.D., Corbel S., Cluzeau D., Hedde M., Leyval L., Masfarau J.F., Martin-Laurent F., Nahmani J., Piron D., Schwartz C., Séré G., Villenave C., Watteau F., 2013. Early colonisation of a constructed Technosol by soil organisms after industrial site rehabilitation. SUITMA 7, Torun Pologne. Communication orale.</p>
	THESES
<p>Thèses passées</p>	<p>Benjamin Pey (2010). Contribution de la faune du sol au fonctionnement et à l'évolution des Technosols. 17 décembre 2010. Ecole doctorale RP2E, Institut National Polytechnique de Lorraine,</p> <p>Farhan Hafeez (2012) Characterization of microbial communities in Technosols constructed for industrial wastelands restoration. 6 septembre 2012, Ecole Doctorale E2S, Université de Bourgogne (mention très honorable),</p> <p>Nouhou Salifou Jangorzo (2013). Quantification du processus d'agrégation dans les Technosols. 12 février 2013, Ecole doctorale RP2E, Université de Lorraine.</p>
<p>Thèses en cours</p>	
ARTICLES DE VALORISATION-VULGARISATION	
<p>Articles de valorisation parus</p>	
<p>Articles de valorisation à paraître</p>	
<p>Articles de valorisation prévus</p>	
AUTRES ACTIONS VERS LES MEDIAS	
<p>Actions vers les médias</p>	

(interviews...) effectuées

Actions vers les médias prévues

ENSEIGNEMENT – FORMATIONEnseignements/formations
dispensésmodule gestion des sites dégradés de la formation
d'ingénieurs ENSAIA spécialisation Sciences et Génie
de l'Environnement

Enseignements/formations prévus

EXPERTISES

Expertises menées

Expertises en cours

Expertises prévues

METHODOLOGIES (GUIDES...)

méthodologies produites

Mise au point du protocole de quantification de la porosité
et de l'agrégation sur lames minces par analyse
d'images (thèse N.S. Jangorzo)méthodologies en cours
d'élaboration

méthodologies prévues

AUTRES

Rapports de master

Grisard G. 2009. Suivi *in situ* des communautés de
mésafaune sur un Technosol construit à partir de
déchets. Master 2 FAGE Nancy Université. 37p
Corbel S. 2010. Impact de Technosols construits sur les
macro-invertébrés. Master 1 Sciences de
l'Environnement. Université de Bourgogne. 32p.